

ISSN 2072-9502 (Print)
ISSN 2224-9761 (Online)

**ВЕСТНИК
АСТРАХАНСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

**СЕРИЯ
УПРАВЛЕНИЕ,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 2009 ГОДА
ВЫХОДИТ ЧЕТЫРЕ РАЗА В ГОД**

**Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий
Высшей аттестационной комиссии РФ
для публикации результатов диссертационных работ (К2)**

**ИНДЕКСИРОВАНИЕ ЖУРНАЛА,
ВКЛЮЧЕНИЕ В БАЗЫ ДАННЫХ**

База данных «Российские научные журналы»

База данных Ulrich's Periodicals Directory

База Applied Science & Technology Source компании EBSCO Publishing

Международная система библиографических ссылок CrossRef

Общероссийский математический портал Math-Net.ru

Российский индекс научного цитирования – РИНЦ

Реферативный журнал и база данных ВИНТИ РАН

**3 2024
ИЮЛЬ**

**АСТРАХАНЬ
ИЗДАТЕЛЬСТВО АГТУ**

УЧРЕДИТЕЛЬ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Астраханский государственный технический университет»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

И. Ю. КВЯТКОВСКАЯ – доктор технических наук, профессор,
Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

В. А. АТРОЩЕНКО – доктор технических наук, профессор, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Е. А. БАРАБАНОВА – доктор технических наук, доцент, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия

П. А. БЕЛОВ – доктор физико-математических наук, PhD (технические науки), профессор, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

А. А. БОЛЬШАКОВ – доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Т. И. БУЛДАКОВА – доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

А. А. ВОЕВОДА – доктор технических наук, профессор, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

К. А. ВЫГОВТОВ – доктор технических наук, доцент, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия

А. В. ДВОРКОВИЧ – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Ю. А. КОМИССАРОВ – доктор технических наук, профессор, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва, Россия

В. В. КОПЫТОВ – доктор технических наук, профессор, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

А. Г. КРАВЕЦ – доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Ю. В. ЛИТОВКА – доктор технических наук, профессор, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

О. Н. ПИЩИН – кандидат технических наук, доцент, Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Г. А. ПОПОВ – доктор технических наук, профессор, Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

О. М. ПРОТАЛИНСКИЙ – доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

И. Б. ФУРТАТ – доктор технических наук, профессор, Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

А. А. ХАНОВА – доктор технических наук, доцент, Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Т. В. ХОМЕНКО – доктор технических наук, доцент, Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

А. В. ХОПЕРСКОВ – доктор физико-математических наук, профессор, Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия

А. В. ЧАСТИКОВ – доктор технических наук, профессор, Вятский государственный университет, Киров, Россия

В. Ф. ШУРШЕВ – доктор технических наук, профессор, Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Адрес редакции:

414056, Астраханская область,
г. о. город Астрахань,
г. Астрахань, ул. Татищева, стр. 16/1,
Астраханский государственный технический университет.
Тел.: (8512) 61-42-98
Факс: (8512) 61-43-66
E-mail: vestnik_astu@astu.org
<http://vestnik.astu.org/>

© ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»,

Вестник Астраханского государственного
технического университета.

Серия: Управление, вычислительная техника
и информатика, 2024

ISSN 2072-9502 (Print)
ISSN 2224-9761 (Online)

**VESTNIK
OF ASTRAKHAN
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY**

**SERIES
MANAGEMENT,
COMPUTER SCIENCE
AND INFORMATICS**

SCIENTIFIC JOURNAL

**PUBLISHED SINCE JANUARY 2009
ISSUED FOUR TIMES A YEAR**

**The journal is included in the List of peer-reviewed scientific journals
of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation
for publishing theses' results (K2)**

**JOURNAL INDEX,
REGISTRATION IN DATABASES**

RIEPL's database "Russian scientific journals"

Ulrich's Periodicals Directory

Applied Science & Technology Source of EBSCO Publishing, Inc.

International Bibliographic Reference System CrossRef

All-Russian Mathematical Portal Math-Net.Ru

Russian Index of Scientific Citation

**Abstract Journal and Data Base
of All-Russian Institute of Scientific and Technical Information
of Russian Academy of Sciences**

**3 2024
JULY**

**ASTRAKHAN
PUBLISHING HOUSE ASTU**

FOUNDER

FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER EDUCATION
“Astrakhan State Technical University”

EDITOR-IN-CHIEF

I. YU. KVIYATKOVSKAYA – Doctor of Technical Sciences, Professor,
Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

EDITORIAL BOARD

V. A. ATROSCHENKO – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

E. A. BARABANOVA – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

P. A. BELOV – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, PhD (Technical Sciences), Professor, ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

A. A. BOLSHAKOV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

T. I. BULDAKOVA – Doctor of Technical Sciences, Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

A. A. VOEVODA – Doctor of Technical Sciences, Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

K. A. VYTOVTOV – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

A. V. DVORKOVICH – Doctor of Technical Sciences, Correspondence Member of Russian Academy of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

YU. A. KOMISSAROV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

V. V. KOPYTOV – Doctor of Technical Sciences, Professor, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

A. G. KRAVETS – Doctor of Technical Sciences, Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

YU. V. LITOVKA – Doctor of Technical Sciences, Professor, Tambov State Technical University, Tambov, Russia

O. N. PISHCHIN – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

G. A. POPOV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

O. M. PROTALINSKIY – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia

I. B. FURTAT – Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

A. A. KHANOVA – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

T. V. KHOMENKO – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

A. V. KHOPERSKOV – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Volgograd State University, Volgograd, Russia

A. V. CHASTIKOV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vyatka State University, Kirov, Russia

V. F. SHURSHEV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Editors address:

16 Tatishchev st. b. 1, Astrakhan urban district,
Astrakhan, 414056, Russia,
Astrakhan State Technical University.
Tel.: (8512) 61-42-98
Fax: (8512) 61-43-66
E-mail: vestnik_astu@astu.org
<http://vestnik.astu.org>

© FSBEI HE “Astrakhan State Technical University”,

Vestnik of Astrakhan State Technical University.
Series: Management, computer science
and informatics, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

- Орлов С. П., Яковлева А. Е., Сусарев С. В.* Многофакторный анализ эффективности автономных транспортных средств на основе метода анализа среды функционирования7
- Колтыгин Д. С., Седельников И. А.* Разработка кроссплатформенного приложения для управления робототехническим комплексом17
- Игнатьев М. А.* Применение машинного обучения и интеллектуального анализа данных в автоматизированной системе неразрушающего вихретокового контроля поверхностного слоя деталей подшипников26
- Корнеев А. М., Огаджанян О. И., Сметанникова Т. А., Огаджанян М. О.* Управление процессом обслуживания высокотехнологичного оборудования с использованием сетей Петри35
- Фомин И. Н.* Модель процесса формирования каталога сценариев для анализа и оценки функциональной безопасности автоматизированных систем вождения автомобилей41
- Морозов А. В., Обухов К. О.* Разработка алгоритма оперативного планирования серийного дискретного производства с альтернативными цепочками операций в технологических процессах48

КОМПЬЮТЕРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Котенко И. В., Паращук И. Б.* Особенности оценки вредоносной активности в инфраструктуре Умного города на основе гранулирования информации и гранулярных моделей вычислений56
- Hajjouz A., Avksentieva E. Yu.* An approach to configuring CatBoost for advanced detection of DoS and DDoS attacks in network traffic.....65

УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

- Логонова А. А., Денисов А. Р.* Использование алгоритмов Process Mining для выявления паттернов поведения студентов.....75

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Микулик И. И.* Методика для решения задачи выбора признаков в регрессионной модели Кокса85
- Боровский А. В., Галкин А. Л., Козлова С. С.* Аппроксимация статистических данных заболеваемости коронавирусной инфекцией с учетом расслоения по сопутствующим диагнозам95

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

«ВЕСТНИК АСТРАХАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА»..... 107

CONTENTS

CONTROL, MODELING, AUTOMATION

- Orlov S. P., Yakovleva A. E., Susarev S. V.* Multifactorial analysis of autonomous vehicles effectiveness based on the method of analyzing the operating environment 7
- Koltygin D. S., Sedelnikov I. A.* Development of a cross-platform application for controlling a robotic complex..... 17
- Ignatiev M. A.* Application of machine learning and data mining in an automated system of non-destructive eddy current control of the surface layer of bearing parts..... 26
- Korneev A. M., Ogadzhanian O. I., Smetannikova T. A., Ogadzhanian M. O.* Managing the maintenance process of high-tech equipment using Petri nets 35
- Fomin I. N.* Model of the process of generating a scenarios catalog for analyzing and assessing the functional safety of automated driving systems 41
- Morozov A. V., Obukhov K. O.* Development of an algorithm for operational planning of serial discrete production with alternative chains of operations in technological processes 48

COMPUTER ENGINEERING AND SOFTWARE

- Kotenko I. V., Parashchuk I. B.* Features of the assessment of malicious activity in the Smart City infrastructure based on information granulation and fuzzy granular calculations 56
- Hajjouz A., Avksentieva E. Yu.* An approach to configuring CatBoost for advanced detection of DoS and DDoS attacks in network traffic 65

MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS

- Loginova A. A., Denisov A. R.* Using Process Mining algorithms to identify patterns of student behavior..... 75

MATHEMATICAL MODELING

- Mikulik I. I.* Methodology of solving the feature selection problem for the Cox regression model..... 85
- Borovsky A. V., Galkin A. L., Kozlova S. S.* Mathematical modeling of statistical data on the incidence of new coronavirus infection, taking into account the stratification by concomitant diagnoses 95

RULES TO THE AUTHORS OF THE JOURNAL

- “**VESTNIK OF ASTRAKHAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. SERIES: MANAGEMENT, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS**” 107

УПРАВЛЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

CONTROL, MODELING, AUTOMATION

Научная статья
УДК 004.942
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-3-7-16>
EDN VDOIWU

Многофакторный анализ эффективности автономных транспортных средств на основе метода анализа среды функционирования

*Сергей Павлович Орлов,
Анастасия Евгеньевна Яковлева[✉], Сергей Васильевич Сусарев*

*Самарский государственный технический университет,
Самара, Россия, nastya-yakovleva-97@mail.ru[✉]*

Аннотация. Проектирование роботизированных и беспилотных транспортных средств включает этап виртуального ввода в эксплуатацию, обеспечивающего анализ работы объектов с помощью цифровых двойников. Проведение большого числа экспериментов на моделях обуславливает использование методов оценки полученных результатов для выбора лучшего проектного решения. Предложена методика многофакторного анализа эффективности работы комплекса автономных транспортных средств (АТС) агропромышленного назначения. Многофакторный анализ выполняется на этапе виртуального ввода в эксплуатацию с целью раннего планирования мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту. Использован метод анализа среды функционирования для сравнительной оценки различных сценариев эксплуатации. Метод базируется на решении комплекса оптимизационных задач линейного программирования. Предложено формальное описание сценариев виртуальных испытаний. Методика многофакторного анализа реализуется в процессе виртуальных испытаний с использованием системных моделей оптимального назначения и имитационного моделирования АТС. Разработана процедура виртуальных испытаний АТС, включающая поэтапное моделирование и многофакторный анализ. Определены множества входных и выходных ключевых параметров АТС и анализируемых сценариев. Предложено выполнять последовательно две задачи оценки эффективности. Первая задача заключается в сравнительной оценке эффективности отдельных АТС и определении границы их эффективности. Решение второй задачи позволяет оценить эффективность сценариев эксплуатации системы АТС. Получены целевые значения изменения ключевых параметров АТС и сценариев эксплуатации, приводящие к повышению эффективности эксплуатации и технического обслуживания. Проведение многофакторного анализа результатов виртуальных испытаний позволяет сформулировать требования и рекомендации при проектировании систем технического обслуживания АТС.

Ключевые слова: автономные транспортные средства, виртуальный ввод в эксплуатацию, техническое обслуживание, многофакторный анализ, метод анализа среды функционирования, оценка эффективности

Для цитирования: Орлов С. П., Яковлева А. Е., Сусарев С. В. Многофакторный анализ эффективности автономных транспортных средств на основе метода анализа среды функционирования // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 3. С. 7–16. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-3-7-16>. EDN VDOIWU.

Original article

Multifactorial analysis of autonomous vehicles effectiveness based on the method of analyzing the operating environment

Sergey P. Orlov, Anastasia E. Yakovleva[✉], Sergey V. Susarev

*Samara State Technical University,
Samara, Russia, nastya-yakovleva-97@mail.ru[✉]*

Abstract. The design of robotic and unmanned vehicles includes a virtual commissioning stage that provides an analysis of the operation of objects using digital twins. Conducting a large number of experiments on models leads to the use of methods for evaluating the results obtained to choose the best design solution. A method of multifactorial analysis of the efficiency of the complex of autonomous vehicles (AV) for agro-industrial purposes is proposed. Multivariate analysis is performed at the virtual commissioning stage in order to plan early maintenance and repair activities. The paper uses the method of analyzing the operating environment for a comparative assessment of various operating scenarios. The method is based on solving a complex of optimization problems of linear programming. A formal description of virtual test scenarios is proposed. The method of multifactorial analysis is implemented in the process of virtual tests using optimal purpose system models and AV simulation. A procedure for virtual AV tests has been developed, including step-by-step modeling and multivariate analysis. The sets of input and output key parameters of the AV and analyzed scenarios are determined. It is proposed to perform two consecutive efficiency assessment tasks. The first task is to compare the effectiveness of individual AV and determine the limits of their effectiveness. The solution of the second task makes it possible to evaluate the effectiveness of AV system operation scenarios. The target values of changes in the key parameters of the AV and operating scenarios are obtained, leading to an increase in the efficiency of operation and maintenance. Conducting a multifactorial analysis of the results of virtual tests allows you to formulate requirements and recommendations for the design of AV maintenance systems.

Keywords: autonomous vehicle, virtual commissioning, maintenance, multi-factor analysis, Data Envelopment Analysis method, efficiency evaluation

For citation: Orlov S. P., Yakovleva A. E., Susarev S. V. Multifactorial analysis of autonomous vehicles effectiveness based on the method of analyzing the operating environment. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics.* 2024;3:7-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-3-7-16>. EDN VDOIWU.

Введение

Разработка и внедрение автономных транспортных средств (АТС) в различные отрасли промышленности является одним из компонентов концепции «Индустрия 5.0» [1, 2]. Характерная особенность АТС как киберфизических систем – наличие в составе оборудования большого числа измерительных устройств, подсистем автономного управления и средств передачи данных на удаленные центры обработки и анализа технического состояния транспортных средств. Это позволяет в реальном времени контролировать режимы работы и проводить диагностику узлов и агрегатов. В то же время возникает проблема предварительного определения структуры и средств технического обслуживания и ремонта (ТОиР) на этапе проектирования

и производства АТС. В современной индустрии развивается подход, основанный на виртуальных испытаниях проектируемых изделий на этапе виртуального ввода в эксплуатацию [3–5].

В настоящей статье описывается методика проведения виртуальных испытаний и оценки полученных результатов применительно к комплексу АТС сельскохозяйственного назначения, обслуживающему производственно-логистическую систему агропромышленного предприятия. Исследования проводились в рамках НИР, выполненных Самарским государственным техническим университетом совместно с АО «КАМАЗ», по Федеральной целевой программе по созданию робототехнического автомобиля сельскохозяйственного назначения [6, 7].

Задача организации ТОиР АТС в процессе виртуального ввода в эксплуатацию

Подход к организации эксплуатации, ТОиР комплекса АТС описан в работе [8]. На основе предложенного комплекса системных моделей формируется процедура виртуальных испытаний, которая включает решение оптимизационной задачи назначений, имитационное моделирование динамики производственных процессов и выполнение многофакторной оценки эффективности работы виртуальных АТС в заданных условиях внешней среды.

Рассматривается производственно-логистическая система, включающая:

- парк A автономных грузовых автомобилей семейств КАМАЗ;
- парк U автономных комбайнов моделей TORUM 785 и CLAAS LEXION 580;
- множество обрабатываемых полей с зерновыми культурами;
- множество маршрутов между полями и зернохранилищем [8].

Сценарии виртуальных испытаний зависят от планового графика работ G на множестве полей P , состояния готовности АТС к эксплуатации, ожидаемых погодных условий W .

Сценарий S_j определяется как

$$S_j = (G, D, P_j, A_j, U_j, W), j = \overline{1, J},$$

где $U_j = \{u_{jm}\} \subseteq U, m = \overline{1, M}$ – множество комбайнов и $A_j = \{a_{jn}\} \subseteq A, n = \overline{1, N}$ – множество автомобилей, назначенных на работы G на полях $P_j = \{p_{jk}\} \subseteq P, k = \overline{1, K}$ с дорожной структурой D ; J – множество анализируемых сценариев. В свою очередь, множества U_j и A_j включают подмножества активных, резервных и каннибализируемых АТС.

На первом этапе проводится решение задачи целочисленного линейного программирования с булевыми переменными для оптимального назначения автономных автомобилей и комбайнов на поля в соответствии с календарно-сетевым графиком работ G :

$$x_{knm} = \begin{cases} 1 & \text{если для выполнения работы на} \\ & \text{поле } k \text{ назначен } n\text{-й автономный} \\ & \text{автомобиль и } m\text{-й автономный комбайн;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Целевая функция C есть общая стоимость эксплуатации АТС при выполнении работ на заданном

множестве полей:

$$C = \min \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M c_{knm} x_{knm} \right\}, \quad (1)$$

где c_{knm} – суммарная стоимость выполнения производственных операций одним АТС на поле p_k . Ограничения для задачи (1) учитывают технические параметры АТС, а также степень загруженности автономных автомобилей в соответствии с площадью убираемых полей и объемами бункеров зерноуборочных комбайнов.

На следующем этапе выполняются имитационные эксперименты на иерархической модели, построенной на стохастической раскрашенной сети Петри. Методика построения таких моделей для исследования эксплуатации и технического обслуживания киберфизических систем разработана и описана в [9]. По результатам имитационного моделирования при необходимости проводится коррекция условий оптимизационной задачи. При удовлетворении требований выполняется переход к многофакторной оценке эффективности функционирования комплекса АТС для различных сценариев и заданных наборов параметров.

Многофакторный анализ выполняется по методу АСФ – анализ среды функционирования (Data Envelopment Analysis – DEA) [10–14]. Этот метод позволяет оценить интегральную эффективность комплекса однородных объектов DMU (Decision Making Unit) по заданному набору их параметров. В качестве анализируемых объектов в настоящей статье предлагается рассматривать множество сценариев, генерируемых в процессе виртуальных испытаний, и множества АТС, участвующих в сценарии.

Будем рассматривать 2 задачи многофакторного анализа:

– задача 1 – оценка эффективности эксплуатации и технического обслуживания отдельных АТС в заданном сценарии S_j ;

– задача 2 – оценка эффективности выполнения заданного множества производственных работ G в различных сценариях $S_j, j = 1, \dots, J$.

Таким образом, процедуру виртуальных испытаний комплекса АТС при различных сценариях можно представить в виде, показанном на рис. 1.

Если в результате виртуального испытания требования к проектируемой системе АТС не удовлетворяются, проводится коррекция либо частных моделей, либо условий выполнения сценария в целом. Такую коррекцию выполняет аналитик, специализирующийся на проектировании АТС.

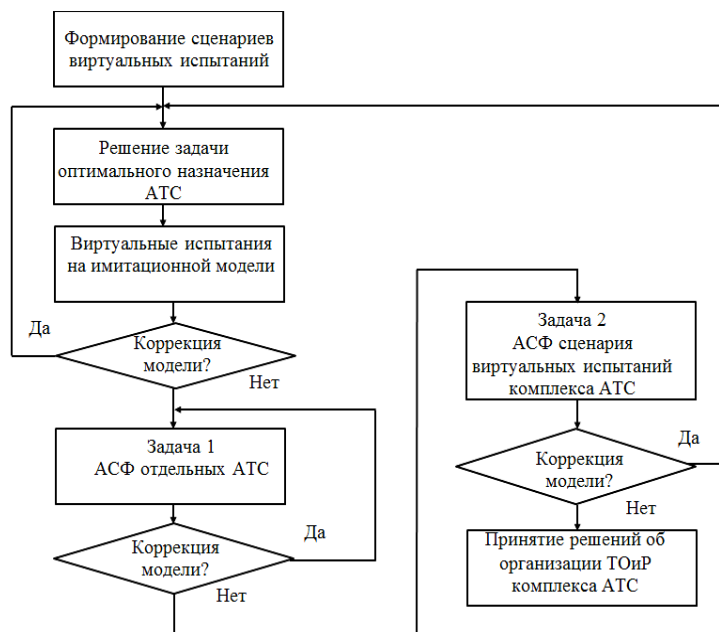


Рис. 1. Процедура виртуальных испытаний автономных транспортных средств

Fig. 1. The procedure for virtual testing of autonomous vehicles

Метод многофакторного анализа оценки эффективности АТС

Техническая эффективность T_E комплекса АТС

$$T_E = \sum \text{взвешенные выходные параметры} / \sum \text{взвешенные входные параметры.}$$

Каждый сценарий $S_j, j = \overline{1, J}$, описывается вектором входных параметров $\mathbf{X}_j = (x_{j1}, \dots, x_{jL})$ и вектором выходных параметров $\mathbf{Y}_j = (y_{j1}, \dots, y_{jR})$. Соответственно, для всех оцениваемых сценариев формируются матрица $\mathbf{X} = (x_{jl}), l = \overline{1, L}, j = \overline{1, J}$, и матрица $\mathbf{Y} = (y_{jr}), r = \overline{1, R}, j = \overline{1, J}$.

Задача многофакторного анализа при оценке эффективности работы комплекса АТС на множестве различных сценариев при использовании метода АСФ сводится к нахождению минимума критерия эффективности θ (задача Банкера – Чарнуса – Купера [10])

$$\min_{\theta, \lambda} (\theta) \quad (2)$$

при ограничениях

$$\left. \begin{aligned} -y_j + \mathbf{Y}\lambda &\geq 0 \\ \theta x_j + \mathbf{Y}\lambda &\geq 0 \\ \mathbf{e}\lambda &\geq 1 \\ \lambda &\geq 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

рассчитывается как соотношение суммы взвешенных результатов производственной деятельности АТС к сумме взвешенных использованных средств:

где θ – интегральный критерий эффективности j -го сценария, $\theta \in (0; 1]$; λ – вектор-столбец искомым неизвестных весовых коэффициентов; \mathbf{e} – единичная вектор-строка.

Решение системы уравнений (2), (3) дает расположение всех анализируемых сценариев в многомерном пространстве параметров относительно границы эффективности. Далее находятся целевые изменения параметров каждого сценария для вывода его точно на границу эффективности.

Выбор наборов входных и выходных параметров объекта в методе АСФ не связан с направлением обработки каких-либо информационных потоков в объекте или преобразованием некоторого материального продукта, а обусловлен характером воздействия изменений параметра на величину критерия эффективности в целом. В input-ориентированной модели к повышению эффективности приводит уменьшение входных параметров. В output-ориентированной модели эффективность повышается при увеличении выходных параметров.

Алгоритм многофакторного анализа сценариев при виртуальных испытаниях представлен на рис. 2.

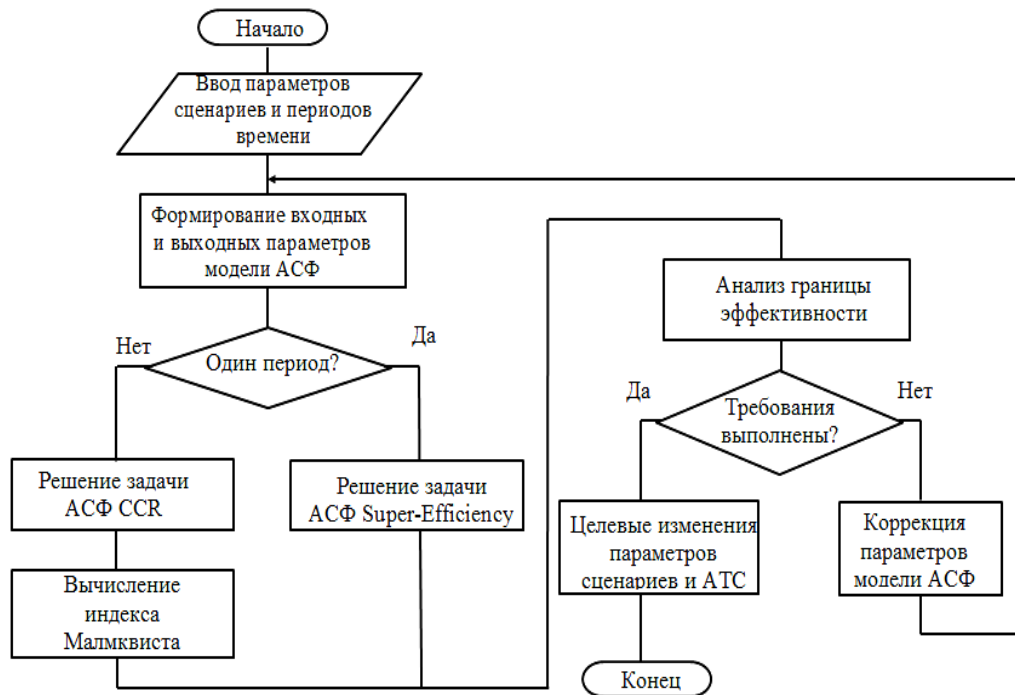


Рис. 2. Алгоритм многофакторного анализа эффективности сценариев виртуальных испытаний

Fig. 2. Algorithm for multifactorial analysis of the effectiveness of virtual test scenarios

Если рассматриваются сценарии с двумя или более периодами работы комплекса АТС, то выполняется решение задачи CCR Чарнеса – Купера – Родеса и рассчитывается индекс Малмквиста, который характеризует динамику эффективности производственного процесса. При анализе одного периода решается задача BCC Банкера – Чарнеса – Купера с построением границы суперэффективности [11]. Конечным результатом применения метода АСФ является набор целевых изменений параметров (Target Values – TV), улучшающих ключевые характеристики производст-

венно-логистической системы.

Анализ эффективности АТС

Сначала при проведении виртуальных испытаний в рамках одного сценария S_j решается задача 1 (см. рис. 1). Рассматриваются два множества типов АТС:

- а) множество A_j автономных автомобилей;
- б) множество U_j автономных комбайнов.

Определены входные F_1-F_4 и выходные Z_1-Z_3 показатели эффективности функционирования транспортных средств (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Показатели для оценки эффективности АТС

Indicators for evaluating the effectiveness of AV

Обозначение	Показатель эффективности
F_1	Потребление топлива автомобилем, л/100 км
F_2	Коэффициент сходов с маршрута, %
F_3	Коэффициент простоя на ТОиР, %
F_4	Удельная величина затрат на перемещение груза, руб./т
Z_1	Средняя скорость движения автомобиля в наблюдаемый период, км/ч
Z_2	Пробег месячный, км
Z_3	Удельное грузоперемещение, т/км

В табл. 2 приведены значения этих показателей для парка из восьми автономных автомобилей

A_1-A_8 и пяти автономных комбайнов U_1-U_5 .

Таблица 2

Table 2

Значения параметров для оценки эффективности АТС

Parameter values for evaluating the effectiveness of AV

DMU	F_1	F_2	F_3	F_4	Z_1	Z_2	Z_3
A_1	35	2	1	12	25	2 700	0,14
A_2	30	0,6	0,6	8	36	3 200	0,22
A_3	34	1,2	0,77	10,3	30	3 000	0,18
A_4	31	0,7	0,7	7,8	36	3 200	0,21
A_5	29	0,66	0,6	7,4	35	3 250	0,27
A_6	36	1,6	0,85	11,5	26	2 800	0,11
A_7	33	1	0,73	10	29	3 100	0,2
A_8	32	0,95	0,75	9	31	2 900	0,16
U_1	36	1,8	0,9	12,3	24	2 750	0,03
U_2	37	1,4	1,1	11,8	26	2 650	0,027
U_3	29	0,5	0,65	8,6	37	3 400	0,06
U_4	28	0,57	0,62	7,9	35	3 600	0,07
U_5	32	0,8	1,5	10,1	27	2 710	0,046

Для оценки эффективности была использована программа Efficiency Measurement System (EMS) [15], реализующая метод АСФ. В результате решения получены целевые значения TV изменений пара-

метров, которые следует выполнить для повышения эффективности АТС в анализируемом сценарии (табл. 3).

Таблица 3

Table 3

Целевые корректировки параметров АТС

Targeted adjustments of AV parameters

DMU	Изменение параметров TV, %						
	F_1	F_2	F_3	F_4	Z_1	Z_2	Z_3
A_1	-10,03	13,53	13,53	13,53	32,08	5,58	22,19
A_2	1,36	-41,62	-29,94	-31,66	0	11,66	0
A_3	-46,57	-38,32	-41,38	64,25	0	27,42	0
A_4	0,65	0,65	-2,4	-19,96	0	2,9	36,89
A_5	-1,12	-73,66	-1,12	-6,41	17,14	0	0
A_6	5,84	3,27	-15,61	-23,73	27,57	23,67	0,71
A_7	-2,32	-2,32	-11,05	-7,71	0	44,54	44,94
A_8	14,02	14,02	14,02	-2,98	33,65	0	74,04
U_1	20,44	60,45	30,69	22,16	0	52,58	5,16
U_2	4,81	4,81	-38,23	-31,43	0	0	63,43
U_3	13,09	-43,59	-5,04	13,09	0	0	80,32
U_4	5,99	-42,41	5,99	-19,55	47,73	11,03	29,93
U_5	6,3	-34,8	4,37	-15,82	27,4	0	36,22

Например, из табл. 3 следует, что для достижения границы эффективности автомобилем A_3 следует уменьшить коэффициент простоя F_3 до 0,6 % при неизменных средней скорости Z_1 автомобиля и удельном грузоперемещении Z_3 . При этом также уменьшается потребление топлива F_1 и коэффициент сходов с маршрута F_2 . Однако эти меры вызывают довольно значительный рост (64 %) удельных затрат F_4 на перемещение груза.

Сравнительная оценка эффективности АТС в различных сценариях виртуальных испытаний

Для сценариев производственно-логистической системы определен набор входных параметров X_1 – X_5 и набор выходных параметров Y_1 и Y_2 для формирования задачи АСФ. Описание этих параметров приведено в табл. 4 (ТО – техническое обслуживание, АА – автономный автомобиль, АК – автономный комбайн).

Таблица 4

Table 4

Входные и выходные параметры для оценки сценариев

Input and output parameters for scenario evaluation

Параметр	Описание параметра
X_1	Средняя удельная стоимость ТО АА, руб./км
X_2	Средняя удельная стоимость ТО АК, руб./га
X_3	Расход топлива АА, л/100 км
X_4	Расход топлива АК, л/га
X_5	Задержка планового срока завершения графика работ, %
Y_1	Коэффициент использования АА
Y_2	Отношение веса убранный зерна к расчетному значению, %

Величина Y_1 определяется как отношение перевезенного груза зерна к максимально возможному объему при полном заполнении кузовов автомобилей во всех поездках. Параметр $Y_2 = (V_i / V_c) \cdot 100$ % показывает, какая доля расчетного веса V_c зерна на поле вывозится при данном сценарии, где V_i – вес убранный и вывезенного зерна. Вес V_c определяется по ожидаемой урожайности зерновой культуры на полях.

Проводился многофакторный анализ восьми DMU, а именно сценариев S_1 – S_8 для производственных работ, выполняемых парком автономных автомобилей и комбайнов на пяти полях с заданной сетью дорог. В табл. 5 показаны значения входных и выходных параметров для сценариев на одном периоде времени.

Таблица 5

Table 5

Значения входных и выходных параметров для оценки сценариев

Values of input and output parameters for scenario evaluation

DMU	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_1	Y_2
S_1	8,1	13,2	32,3	15,1	8	0,75	98
S_2	6,9	10,6	34,5	16,2	2,8	0,94	98,7
S_3	5,7	14	30	15,5	5	0,9	98
S_4	7,3	9,3	27	14,9	4,3	0,96	99
S_5	6,2	8,7	33	15,8	1,8	0,99	94
S_6	8,2	11,8	32,5	16,2	8,2	0,85	84,5
S_7	25	15,1	38,6	20	12	0,78	80
S_8	7,8	10,4	26	15,2	6,3	0,82	93

В результате решения задачи получены значения критерия эффективности для каждого сценария (табл. 6).

Таблица 6

Table 6

Эффективность сценариев

The effectiveness of scenarios

Сценарии	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
Эффективность, %	97,68	98,53	116,16	115,22	163,83	81,44	60,53	97,55

Согласно табл. 6, эффективны сценарии S_3 , S_4 , S_5 . Целевые изменения TV неэффективных сценариев S_1 , S_2 , S_6 , S_7 , S_8 для вывода их на границу эф-

фективности приведены в табл. 7, в которой величины δ равны процентным значениям увеличения или уменьшения исходных параметров из табл. 5.

Целевые корректировки параметров сценариев
Targeted adjustments to scenario parameters

Параметры	Сценарии									
	S ₁		S ₂		S ₆		S ₇		S ₈	
	TV	δ	TV	δ	TV	δ	TV	δ	TV	δ
X ₁	7,41	-0,69	6,89	-0,01	5,49	-0,21	15,8	-9,2	7,05	-0,75
X ₂	9,51	-3,69	9,34	-1,26	12,62	-1,38	13,52	-1,58	8,99	-1,41
X ₃	27,48	-4,82	32,3	-2,14	27,4	-2,56	24,57	-5,43	26	0
X ₄	15,17	0	16,2	0	15,5	0	20	0	14,37	-0,83
X ₅	4,44	-3,56	2,8	0	2,13	-2,87	8,23	-3,77	4,19	-2,11
Y ₁	0,77	0,2	1,0	0,07	0,85	0	0,78	0	0,9	0,08
Y ₂	98	0	98,7	0	92,4	7,9	91,6	11,6	93	0

Например, для сценария S₇ необходимо выполнить значительное уменьшение удельных затрат на техническое обслуживание (на 9,2 руб./км для автомобиля и на 1,58 руб./га для комбайна) (см. табл. 7). Кроме того, следует сократить задержку завершения графика работ до 8 %. В этом случае интегральная оценка эффективности сценария S₇ сравнивается с другими сценариями. Анализ других сценариев проводится аналогичным образом.

Обсуждение

Разделение многофакторного анализа результатов виртуальных испытаний на две задачи позволяет вносить коррективы в проектные и организационные решения по техническому обслуживанию парка транспортных средств до начала производства и эксплуатации. Различные сценарии «проигрываются» на имитационных моделях с заданием исходных данных как по внешним условиям эксплуатации, так и по техническим и производственным показателям комплекса АТС. В то же время при моделировании одного сценария использование метода АСФ позволяет оценить ключевые параметры отдельных АТС.

Преимущество применения иерархических сетей Петри в сочетании с многофакторным анализом АСФ заключается в том, что на разных уровнях детализации используются цифровые двойники агрегатов АТС на стохастических сетях. В результате имитируется воздействие множества случайных факторов и затем проводится сравнительная оценка эффективности функционирования системы в целом.

Заключение

Применение разработанной методики виртуальных испытаний и многофакторной оценки эффективности транспортных средств дает возможность осуществить переход от профилактического к прогнозному техническому обслуживанию, что является современной тенденцией при организации технического обслуживания киберфизических систем [5, 16]. Таким образом, формируются наборы организационных, технических и финансовых мероприятий по ТОиР, которые передаются эксплуатирующим предприятиям одновременно с поставкой изготавливаемых автономных транспортных средств.

Список источников

1. Möller D. P. F., Vakilzadian H., Haas R. E. From Industry 4.0 towards Industry 5.0 // Proc. 2022 IEEE International Conference on Electro Information Technology (Manakato, MN, USA). IEEE Xplore. 2022. P. 61–68.
2. Бабкин А. В., Федоров А. А., Либерман И. В., Кладчик П. М. Индустрия 5.0: понятие, формирование и развитие // Экономика промышленности. Russian Journal of Industrial Economics. 2021. Т. 14 (4). С. 375–395.
3. Novak P., Kadera P., Wimmer M. Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study // Proc. 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. IEEE Xplore. 2017. P. 1–4.
4. Орлов С. П., Бизюкова Е. Е., Яковлева А. Е. Виртуальные испытания агрегатов для виртуального ввода в производство роботизированного автомобиля // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. 2021. Т. 29 (1). С. 46–57.
5. Щербаков М. В., Сай Ван К. Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0 // Программные продукты и системы. 2020. № 2. С. 186–194.
6. Губанов Н. Г., Михеев Ю. В., Одинцов В. П., Ахтямов Р. Н., Морев А. С. Архитектура системы диагностики и прогнозирования технического состояния роботизированного транспортного средства // Проблемы управления и моделирования в сложных системах:

тр. XXI Междунар. конф. Самара: ООО «Офорт», 2019. С. 171–174.

7. Orlov S. P., Susarev S. V., Kravets O. Ya., Morev A. S. Information system of agricultural robotic KAMAZ cars // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1399 (3). P. 033020 (1–5).

8. Орлов С. П., Волхонская Е. Е. Системные модели парка автономных транспортных средств для виртуальных испытаний при организации технического обслуживания // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2023. № 3. С. 7–16.

9. Волхонская Е. Е., Орлов С. П. Моделирование системы автономных транспортных средств в процессе виртуального запуска в эксплуатацию // *Математические методы в технологиях и технике*. 2022. № 1. С. 97–103.

10. Cooper W. W., Seiford L. M., Zhu J. *Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations* // *Handbook on Data Envelopment Analysis*. US, N. Y.: Springer, 2011. P. 1–39.

11. Sowlati T., Paradi J. C. Establishing the “practical frontier” in data envelopment analysis // *Omega*. 2004. V. 32 (4). P. 261–272.

12. Моргунов Е. П., Моргунова О. Н. Многомерная классификация сложных объектов на основе оценки их эффективности // *Вестн. НИИ СУВПТ: сб. науч. тр. / под общ. ред. проф. Н. В. Василенко*. Красноярск, 2003. Вып. 14. С. 222–240.

13. Хаммершмидт М., Макаров А., Щербак А. Применение метода анализа среды функционирования (АСФ) для оценки эффективности деятельности бизнес-структур предприятия // *Практический маркетинг*. 2012. № 3 (181). С. 15–20.

14. Яковлева А. Е., Сусарев С. В., Орлов С. П. Анализ эффективности роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей // *Системы управления и информационные технологии*. 2021. № 3 (85). С. 94–100.

15. EMS: Efficiency Measurement System. Data Envelopment Analysis (DEA) Software. URL: <http://www.holgerscheel.de/ems/> (дата обращения: 15.01.2024).

16. Sang G. M., Xu L., Vrieze P., Bai Y., Pan F. Predictive Maintenance in Industry 4.0 // *Proceedings of the 10th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST' 2020)*. Lecce, Italy. 2020. Article N. 29. P. 1–11.

References

1. Möller D. P. F., Vakilzadian H., Haas R. E. From Industry 4.0 towards Industry 5.0. Proc. 2022 IEEE International Conference on Electro Information Technology (Mankato, MN, USA). *IEEE Xplore*, 2022, pp. 61-68.

2. Babkin A. V., Fedorov A. A., Liberman I. V., Klachek P. M. *Industria 5.0: poniatie, formirovanie i razvitie* [Industry 5.0: concept, formation and development]. *Ekonomika promyshlennosti. Russian Journal of Industrial Economics*, 2021, vol. 14 (4), pp. 375-395.

3. Novak P., Kadera P., Wimmer M. Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study. Proc. 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. *IEEE Xplore*, 2017, pp. 1-4.

4. Orlov S. P., Biziukova E. E., Iakovleva A. E. Virtual'nye ispytaniia agregatov dlia virtual'nogo vvoda v proizvodstvo robotizirovannogo avtomobilia [Virtual testing of units for virtual commissioning of a robotic car]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2021, vol. 29 (1), pp. 46-57.

5. Shcherbakov M. V., Sai Van K. Arkhitektura sistemy predskazatel'nogo tekhnicheskogo obsluzhivaniia slozhnykh mnogoob'ektnykh sistem v kontseptsii Industrii 4.0 [The architecture of the predictive maintenance system for complex multi-object systems in the concept of Industry 4.0]. *Programmye produkty i sistemy*, 2020, no. 2, pp. 186-194.

6. Gubanov N. G., Mikheev Iu. V., Odintsov V. P., Akhtiamov R. N., Morev A. S. Arkhitektura sistemy diagnostiki i prognozirovaniia tekhnicheskogo sostoiianiia robotizirovannogo transportnogo sredstva [Architecture of the diagnostic and forecasting system for the technical condition of a robotic vehicle]. *Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh: trudy XXI Mezhdunarodnoi konferentsii*. Samara, ООО «Офорт», 2019. Pp. 171-174.

7. Orlov S. P., Susarev S. V., Kravets O. Ya., Morev A. S. Information system of agricultural robotic KAMAZ cars.

Journal of Physics: Conference Series, 2019, vol. 1399 (3), p. 033020 (1-5).

8. Orlov S. P., Volkhonskaia E. E. Sistemnye modeli parka avtonomnykh transportnykh sredstv dlia virtual'nykh ispytaniia pri organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniia [System models of the fleet of autonomous vehicles for virtual tests in the organization of maintenance]. *Vestnik Astrakhsanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika*, 2023, no. 3, pp. 7-16.

9. Volkhonskaia E. E., Orlov S. P. Modelirovanie sistemy avtonomnykh transportnykh sredstv v protsesse virtual'nogo zapuska v ekspluatatsiiu [Simulation of an autonomous vehicle system in the process of virtual commissioning]. *Matematicheskie metody v tekhnologiiakh i tekhnike*, 2022, no. 1, pp. 97-103.

10. Cooper W. W., Seiford L. M., Zhu J. *Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. Handbook on Data Envelopment Analysis*. US, New York, Springer, 2011. Pp. 1-39.

11. Sowlati T., Paradi J. C. Establishing the “practical frontier” in data envelopment analysis. *Omega*, 2004, vol. 32 (4), pp. 261-272.

12. Morgunov E. P., Morgunova O. N. Mnogomernaia klassifikatsiia slozhnykh ob'ektov na osnove otsenki ikh effektivnosti [Multidimensional classification of complex objects based on an assessment of their effectiveness]. *Vestnik NII SUVPT: sbornik nauchnykh trudov. Pod obshchei redaktsiei prof. N. V. Vasilenko*. Krasnoarsk, 2003. Iss. 14. Pp. 222-240.

13. Khammershmidt M., Makarov A., Shcherbak A. Primenenie metoda analiza sredy funktsionirovaniia (ASF) dlia otsenki effektivnosti deiatel'nosti biznes-struktur predpriiatiia [Application of the method of analysis of the operating environment (OEA) to assess the effectiveness of the business structures of the enterprise]. *Prakticheskii marketing*, 2012, no. 3 (181), pp. 15-20.

14. Iakovleva A. E., Susarev S. V., Orlov S. P. Analiz effektivnosti robotizirovannoi sistemy sel'skokhoziaistvennykh avtomobilei [Analysis of the effectiveness of the robotic system of agricultural vehicles]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii*, 2021, no. 3 (85), pp. 94-100.

15. EMS: Efficiency Measurement System. *Data Envelopment Analysis (DEA) Software*. Available at: [http://www.hol-](http://www.hol-ger-scheel.de/ems/)

[ger-scheel.de/ems/](http://www.hol-ger-scheel.de/ems/) (accessed: 15.01.2024).

16. Sang G. M., Xu L., Vrieze P., Bai Y., Pan F. Predictive Maintenance in Industry 4.0. *Proceedings of the 10th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST' 2020)*. Lecce, Italy. 2020. Article No. 29. Pp. 1-11.

Статья поступила в редакцию 20.03.2024; одобрена после рецензирования 02.05.2024; принята к публикации 04.07.2024
The article was submitted 20.03.2024; approved after reviewing 02.05.2024; accepted for publication 04.07.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Павлович Орлов – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры вычислительной техники; Самарский государственный технический университет; orlovsp1946@gmail.com

Анастасия Евгеньевна Яковлева – аспирант кафедры вычислительной техники; Самарский государственный технический университет; nastya-yakovleva-97@mail.ru

Сергей Васильевич Сусарев – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой автоматизации и управления технологическими процессами; Самарский государственный технический университет; susarev_sergey@mail.ru

Sergey P. Orlov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Computer Technology; Samara State Technical University; orlovsp1946@gmail.com

Anastasia E. Yakovleva – Postgraduate Student of the Department of Computer Technology; Samara State Technical University; nastya-yakovleva-97@mail.ru

Sergey V. Susarev – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Automation and Technological Process Control; Samara State Technical University; susarev_sergey@mail.ru

