

УДК 621.396

DOI: 10.25559/SITITO.18.202201.119-133

Научная статья

Опыт разработки методического обеспечения инновационной оценки качества функционирования одного класса сложных систем

К. З. Билятдинов^{1*}, Д. В. Досиков²

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Адрес: 197101, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А

* k74b@mail.ru

² Независимый исследователь

Аннотация

Согласно общепринятым критериям классификации систем представлены особенности одного класса сложных систем. Предложены методы и способы оценки качества и эффективности функционирования сложных систем. Методы и способы разработаны в целях учета специфики функционирования различных систем, а также для проведения оценки в условиях возрастающего объема разнородных источников информации в комплексе со стохастическим характером динамики структурированных и неструктурированных данных о сложных системах. Представлены модель и формулы алгоритмов управления в сложных системах, в которых управленческие решения принимаются на основе оценки качества функционирования сложных систем и (или) их подсистем (элементов) и с учетом воздействия внешней среды. Модифицированный метод DEA, предназначенный для оценки эффективности систем, представляет собой симбиоз классического метода DEA, расчета корреляции зависимости значений показателей и применения коэффициентов вето. Представлены направления совершенствования способов расчета вероятностных характеристик сложных систем различной физической природы на основе применения методики оценки вероятности выхода из строя заданного количества элементов сложной системы в зависимости от вероятности выхода одного элемента в ее составе в процессе функционирования. В методике на основе системного подхода разработана последовательность оценки соответствующих вероятностных характеристик, для рациональной реализации в компьютерных программах. В способах расчета комплексных показателей качества разработаны базовые формулы и сформулированы условия их применения. Описаны программы для ЭВМ, реализующие методики и приведены примеры оценки эффективности и вероятностных характеристик систем при помощи данных программ для ЭВМ. Рассмотрены перспективы применения методического обеспечения инновационной оценки качества функционирования одного класса сложных систем для обеспечения решения актуальных задач системной инженерии. Предлагаемый вариант представления методов, способов и алгоритмов позволяет наиболее рационально их использовать в компьютерных программах для оценки эффективности и качества сложных систем в условиях ограничения ресурсов и времени.

Ключевые слова: алгоритм, вероятность, время, модель, сложные системы, качество, способ, оценка, методика, модифицированный метод DEA, элемент, системная инженерия

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Билятдинов К. З., Досиков Д. В. Опыт разработки методического обеспечения инновационной оценки качества функционирования одного класса сложных систем // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022. Т. 18, № 1. С. 119-133. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.119-133>

© Билятдинов К. З., Досиков Д. В., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Practice of Procedures Development of the Innovative Assessment of One Class of Complex Systems Functioning

K. Z. Biliatdinov^a, V. S. Dosikov^b

^a ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation

Address: 49 Kronverksky Pr., bldg. A, St. Petersburg 197101, Russian Federation

* k74b@mail.ru

^b Independent researcher

Abstract

In accordance with generally accepted criteria of systems classification, the article describes peculiarities of one class of complex systems. The article proposes new methods of assessment of quality and effectiveness of functioning of complex systems. The methods are developed for the purpose of evaluation and recording of the specificity of functioning of different systems, moreover, for conducting assessment in the conditions of increasing volume of various sources of information together with stochastic character of dynamics of structured and unstructured data about complex systems. The article also presents a model and formulas of control algorithms in complex systems, where managerial decisions are made on the basis of quality assessment of functioning of complex systems and (or) their subsystems (elements) and taking into consideration influence of external environment. The modified DEA method used for assessment of systems effectiveness presents a combination of a classical DEA method, calculation of correlation of dependence of indices' values and application of veto coefficient. The article presents the directions of improvement of methods for calculating the probabilistic characteristics of complex systems of varied physical nature based on the application of the methodology for assessing the probability of failure of a given number of elements of a complex system, depending on the probability of failure of one element in its composition during operation. On the basis of a systematic approach, a sequence for assessing the corresponding probabilistic characteristics has been developed for rational implementation in computer programs. Methods of calculation of complex quality indices include basic formulas and formulated conditions of their application. The article describes computer programs for implementation of the methods and gives examples of assessment of effectiveness and probabilistic characteristics of systems with the help of these programs. The article outlines prospects of the application of the procedures of innovative quality assessment of functioning of one class of complex systems for the purpose of solving topical problems of systemic engineering. The proposed variant of presenting methods and algorithms makes it possible to use them most rationally in software for assessment of effectiveness and quality of complex systems in conditions of restricted resources and time.

Keywords: algorithm, probability, model, complex systems, quality, method, assessment, methodology, modified DEA method, time, element, systemic engineering

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Biliatdinov K.Z., Dosikov V.S. Practice of Procedures Development of the Innovative Assessment of One Class of Complex Systems Functioning. *Sovremennyye informacionnyye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2022; 18(1):119-133. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.119-133>



Введение и постановка задачи

Актуальность развития и совершенствования математического аппарата оценки качества и эффективности функционирования сложных систем в первую очередь основывается на необходимости формирования и наиболее рационального использования внутренних интеграционных резервов [1, 2] повышения эффективности функционирования одного класса сложных систем [3, 4, 5].

В исследовании под одним классом сложных систем будем понимать совокупность объектов, обладающих согласно общепринятых критериев классификации систем следующими особенностями:

1. По взаимодействию с внешней средой – открытые системы.
2. По структуре – сложные системы.
3. По характеру основных функций – специализированные.
4. По характеру развития – развивающиеся (подверженные модернизации).
5. По степени организованности – хорошо организованные.
6. По характеру связи между элементами – детерминированные.
7. По характеру структуры управления – централизованные.
8. По назначению – производящие продукцию, товары, услуги.

При этом вышеперечисленные особенности будет одновременно выступать признаками общности. На практике примерами оцениваемого одного класса сложных систем (далее – систем) являются промышленные предприятия, объекты информатизации и связи, объекты транспорта и др. [1, 2]. Очевидно, что в современных условиях от эффективного функционирования рассматриваемого одного класса сложных систем напрямую зависит устойчивое развитие экономики Российской Федерации и благосостояние населения. Данное обстоятельство усиливает актуальность темы исследования.

Отсюда возникает задача разработки и внедрения инновационных алгоритмов управления функционирования данными системами (далее – алгоритмов), а также методов и способов оценки качества и эффективности этого класса систем (далее – методов и способов).

В свою очередь необходимость совершенствования управления и принятия управленческих решений, с целью повышения эффективности функционирования одного класса сложных систем (далее – систем) предопределяет следующие основные общие требования к разрабатываемым алгоритмам, методам и способам [2, 3, 6, 7]:

- обеспечение учета воздействий внешней среды, условий и специфики функционирования систем;
- практическая направленность на снижение времени оценки качества и обработки информации в интересах существенного уменьшения времени принятия управленческих решений;
- снижение субъективности восприятия информации лицом, принимающим решения (далее – ЛПР), как слабо формализуемого фактора в системе управления;
- обеспечение возможности рациональной реализации в компьютерных программах.

В современных условиях эффективность исследования сложных систем вне зависимости от их физической природы во

многом зависит от своевременной и обоснованной оценки их вероятностных характеристик. В настоящее время несовершенство методического аппарата оценки вероятностных характеристик приводит к возникновению актуальной слабо структурированной проблемы, заключающейся в необходимости разрешения противоречия между требованием к существенному уменьшению затрат времени и ресурсов на оценку и необходимостью проведения дорогостоящих экспериментов для сбора и обработки больших объемов информации о состоянии систем [8, 9, 10, 11].

Одним из рациональных путей существенного ослабления негативного влияния данной проблемы является частичного решения проблемы на практике является дальнейшее совершенствование способов расчета вероятностных характеристик систем посредством применения биномиального закона распределения в выборках с возвратом.

Анализ современных научных исследований в этой предметной области [6, 7, 12] выявил тенденции комплексного применения апробированных методик, основанных на интеграции широкого спектра результатов научных исследований в различных областях [3, 4, 13, 14]. На практике это выражается в запросах на более полное использование экспертной и статистической информации без затрат дополнительных ресурсов и времени, а также в возможности обоснованного выбора методов и способов в зависимости от условий функционирования оцениваемых систем [2, 3, 6, 7].

Кроме того, актуальность и востребованность методического обеспечения инновационной оценки качества функционирования одного класса сложных систем будет усиливаться в CALS-технологиях (англ. *Continuous Acquisition and Life cycle Support*), то есть при обеспечении непрерывной информационной поддержки поставок и жизненного цикла технических систем, эксплуатируемых в составе оцениваемых систем [15, 16]. Поэтому сегодня одним из перспективных направлений совершенствования управления и принятия решений [3, 12, 13, 17, 22] можно вполне обоснованно считать разработку и внедрение инновационных алгоритмов, методов и способов, применимых для оценки качества и эффективности различных систем [1, 2, 6, 14, 18, 19].

1. Алгоритмы управления в сложных системах

На основе систематизации результатов научных работ [4, 9, 18, 20, 21] и с целью наиболее рациональной разработки и внедрения алгоритмов, методов и способов разработана модель взаимодействия элементов системы в процессе управления при принятии управленческих решений на основе результатов оценки качества и эффективности функционирования системы (далее – модель) (рис. 1) и сформулированы следующие ограничения и допущение.

Ограничения:

1. В модели системы (рис. 1) субъект управления (подсистема управления сложной системой) не может изменить состояние внешней среды, но может воздействовать на объекты управления (подсистемы (или элементы) системы) – E по известным ему воздействиям среды (G) и состояния объекта (P).



- Результаты воздействия внешней среды (G) и состояния объекта управления (P) отражаются в результатах оценки качества и эффективности функционирования системы на основе действительных значений показателей качества.
- Состояние объекта (P) влияет на состояние потребностей субъекта управления: $A=(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_k)$,

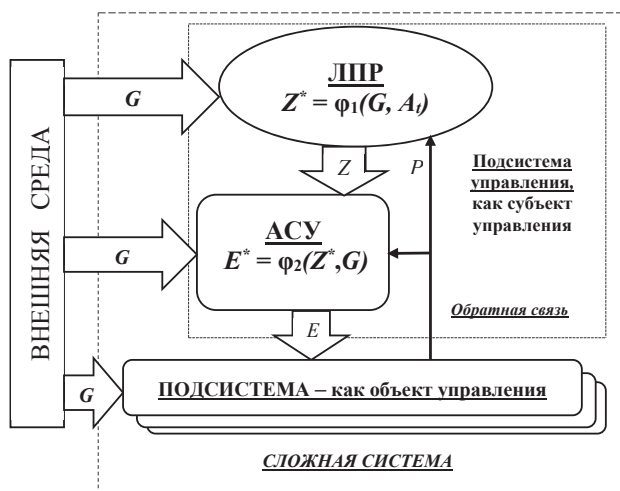
где a_i – состояние i -й потребности субъекта управления.
 Допущение: на основе результатов анализа предметной области и для учета специфики функционирования системы введем ограничение, что подсистема управления, строит свое поведение исходя из минимизации потребностей в ресурсах (X) при функционировании оцениваемой системы (1):

$$\alpha_i(E, G) \rightarrow \min_{r \in X} (i = \overline{1, k}). \quad (1)$$

Пусть E_x^* – решение задачи (1). Тогда способ решения задачи (1) будем называть алгоритмом управления – формула (2):

$$E_x^* = \varphi(A_i, G) \quad (2)$$

где φ – алгоритм управления в зависимости от воздействия внешней среды G и потребностей субъекта A_i .
 Потребности субъекта управления A_i являются функцией времени, отражая смену приоритетов, в процессе жизненного цикла системы и зависят от изменения состояния системы и воздействий внешней среды (рис. 1).



Р и с. 1. Модель взаимодействия элементов сложной системы в процессе управления при принятии управленческих решений на основе оценки качества и эффективности функционирования системы
 Fig. 1. Model of interaction of elements of a complex system in the management process when making managerial decisions based on assessment of quality and efficiency of the system

Далее алгоритм управления φ целесообразно записать в рекуррентной форме:
 $E_{N+1} = (E_N, A_i, G)$.

Тогда на каждом шаге ($N+1$) этого алгоритма процесс совершенствования (повышения эффективности) управления за счет принятия своевременных и обоснованных управленческих решений по результатам оценки качества, можно выразить формулой (3):

$$A_{i+1}(G, E_{N+1}) < A_i(G, E_N) \quad (3)$$

Далее синтез алгоритма управления φ , может быть разбит на две части (рис. 1):

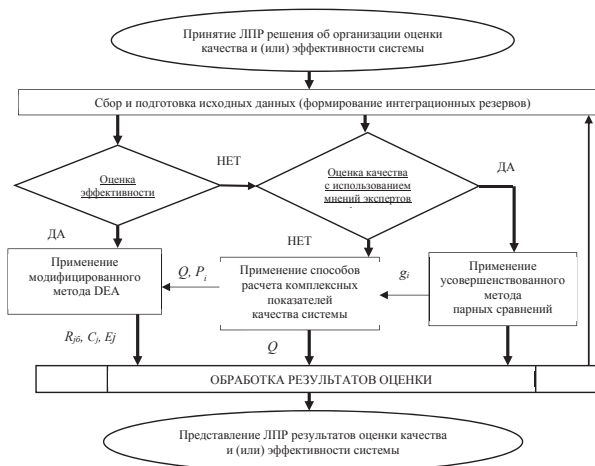
$$A_i \rightarrow Z^* \rightarrow E^*$$

На первом этапе формируются цели управления Z^* , на втором этапе по целям управления синтезируются управляющие воздействия E^* :

$$Z^* = \varphi_1(G, A_i)$$

$$E^* = \varphi_2(Z^*, G)$$

Разделение алгоритмов управления на две части φ_1 и φ_2 отражают разделение задач управления на задачи решаемые автоматизированной системой управления (АСУ) в составе подсистемы управления и решения принимаемые ЛПР по результатам оценки качества [5], на основе которых синтезируются управляющие воздействия на субъекты управления (E^*). Алгоритм применения предлагаемых методов и способов представлен на рисунке 2.



Р и с. 2. Схема алгоритма варианта применения методов и способов оценки качества и эффективности функционирования сложных систем
 Fig. 2. Scheme of the algorithm for the application of methods for assessing the quality and efficiency of the functioning of complex systems

В представленных алгоритмах задачи оценки качества (рис. 1 и 2), решаемые АСУ подсистемы управления, могут быть формализованы и выполняться программно-аппаратными средствами, в частности программами для ЭВМ¹.

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610389 Российская Федерация. Анализ и оценка эффективности систем: № 2019667306 : заявл. 20.12.2019 : опубл. 14.01.2020 / К. З. Билядинов. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42497089> (дата обращения: 04.02.2022); Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020615328 Российская Федерация. Оценка устойчивости качества систем: № 2020614034 ;

2. Сущность и содержание модифицированного метода DEA для оценки эффективности систем

Теоретические основы методологии DEA (Data Envelopment Analysis) для оценки эффективности сложных систем были разработаны учёными А. Чарнесом, В. Купером и Е. Родесом (A. Charnes, W. Cooper, E. Rhodes) [7, 12, 18, 23, 24].

В дальнейшем в научных работах М. Дж. Фаррелла (M. J. Farrell) [10] в сфере развития методов непараметрического граничного анализа были сформулированы и обоснованы направления применения метода DEA на практике:

- результативность (effectiveness) – определение степени достижения цели оцениваемой системой в заданный период времени;
- экономичность (efficiency) – это соотношение затрат ресурсов и результата, достигнутого оцениваемой системой в заданный период времени.

Однако, при всей доказанной практической значимости применение метода DEA не дает объяснений причинам состояния системы и, соответственно, не дает дополнительной информации для принятия рационального управленческого решения [7, 10].

Поэтому в отличие от классического метода DEA [7, 12, 18, 23, 24] в модифицированном методе DEA [2] используется формула Пирсона для расчета корреляционной зависимости с целью выявления причинно-следственных связей количественных значений результата [2, С. 615], а также систематизация полученных значений в табличных формах.

Для учета специфики функционирования системы используется коэффициент вето ($\varphi(Q_i)$), то есть функция, которая при выходе любого из важнейших единичных показателей (Q_i) за допустимые пределы становится равным нулю, а во всех остальных случаях остается равным единице, формула (4):

$$\varphi(Q_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } Q_{i_{\min}} < Q_i < Q_{i_{\max}} \\ 0, & \text{если } Q_{i_{\max}} < Q_i < Q_{i_{\min}} \end{cases} \quad (4)$$

В Модифицированном методе DEA применяются:

- парное сравнений количественных значений всех показателей расхода ресурсов (X_1, X_2, \dots, X_j) и количественных значений достигнутого результата (Y);

- сравнение достигнутого результата (Y) с его установленными базовыми (требуемыми) значениями (Y_0) и (или) периодов времени функционирования системы.

Коэффициент результативности j системы (R_{j0}) рассчитывается по формуле (5):

$$R_{j0} = \frac{Y_j}{Y_0} \quad (5)$$

Комплексный показатель экономичности расходования ресурсов (X_1, X_2, \dots, X_j) j -системой на достижение результата (C_j) рассчитывается по формуле (6):

$$C_j = \sum_{i=1}^n c_i S_{xi} \quad (6)$$

где c_i – это нормированный коэффициент важности расходования i ресурса;

S_{xi} – это коэффициент экономичности расхода ресурса X_i в процессе функционирования системы для достижения результата Y_j .

Значение S_{xi} рассчитывается по формуле:

$$S_{xi} = \frac{X_i}{X_{i0}}$$

Разработаны критерии результативности и экономичности систем.

Предусмотрен расчет коэффициента эффективности систем с составлением рейтинга эффективности оцениваемых систем в табличной форме.

Рейтинг определяется по наибольшему значению коэффициента эффективности системы (E_j) – формула (7):

$$E_j = e_R R_{j0} + e_C \left(1 - \frac{C_j}{\sum_{n=1}^n C_n}\right) \quad (7)$$

где e_R – это нормированный весовой коэффициент важности коэффициента результативности, R_{j0} , а e_C – нормированный весовой коэффициент важности комплексного показателя экономичности, C_j [2, С. 614].

Далее целесообразно привести описание разработанного программного обеспечения и тестовый пример.

Модифицированный метод DEA реализован в программе для ЭВМ «Анализ и оценка эффективности систем»². Программа предназначена для сокращения затрат времени и ресурсов на оценку эффективности и повышение обоснованности управленческих решений за счет возможности сравнения и требуемой детализации израсходованных ресурсов (X) при анализе и оценке эффективности системы.

Язык программирования: Python. Объем программы: 307 кб.

Пример применения программы для ЭВМ «Анализ и оценка эффективности систем»³ для оценки эффективности систем при агрегировании входных переменных ресурсов.

Пусть имеется одна входная переменная – это бюджеты эксплуатации четырех одинаковых систем (X_1) и один результат, выраженный в количестве суток функционирования системы (Y). Этапы оценки представлены на рис. 3-10.

заявл. 25.03.2020 ; опубл. 21.05.2020 / К. З. Билиатдинов.

² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610389 Российской Федерации. Анализ и оценка эффективности систем: № 2019667306 : заявл. 20.12.2019 : опубл. 14.01.2020 / К. З. Билиатдинов. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42497089> (дата обращения: 04.02.2022).

³ Там же.



Система	Количество израсходованных ресурсов		Стоимость единицы измерения израсходованного ресурса в тыс. рублей		Стоимость затрат ресурсов на достижение результата	Количественное выражение полученного результата (y)	Стоимость единицы измерения полученного результата	Соотношение затрат ресурсов и результата	
	x1 (т.р.)	x2 (0)	p1	p2				x1/y	x2/y
1	362.0	0.0	1	0	362.0	11.8	30.67797	30.67797	0.0
2	367.0	0.0	1	0	367.0	11.1	33.06306	33.06306	0.0
3	367.5	0.0	1	0	367.5	10.7	34.34579	34.34579	0.0
4	368.0	0.0	1	0	368.0	10.2	36.07843	36.07843	0.0

Р и с. 3. Результаты расчетов

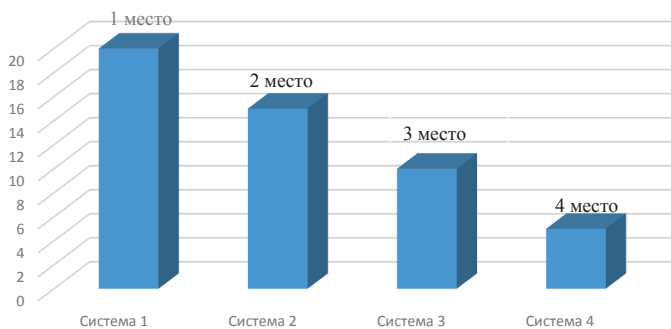
F i g. 3. Calculation results

Система	Количество набранных баллов по результату	Количество набранных баллов по стоимости общ	Количество набранных баллов по расходу x1	Количество набранных баллов по расходу x2	Количество набранных баллов по общ. ст. ед. изм. результата	Общее количество баллов
1	4	4	4	4	4	20
2	3	3	3	3	3	15
3	2	2	2	2	2	10
4	1	1	1	1	1	5

Рейтинг систем по наибольшему значению набранных баллов, при условии равных коэффициентов важности показателей оценки эффективности: :
1. 1 - 20
2. 2 - 15
3. 3 - 10

Р и с. 4. Результаты расчетов рейтинга систем за время их функционирования

F i g. 4. The results of system rating calculations for the period of their operation

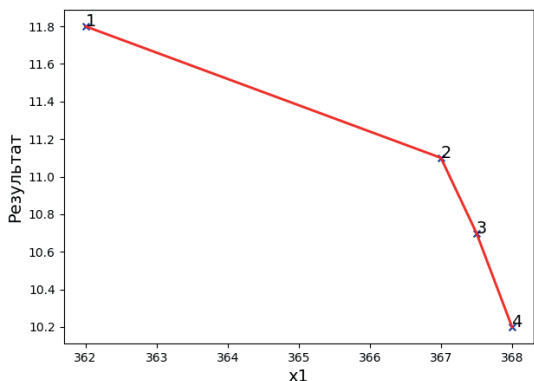


Р и с. 5. Рейтинг эффективности систем за время функционирования

F i g. 5. Rating of systems efficiency during operation

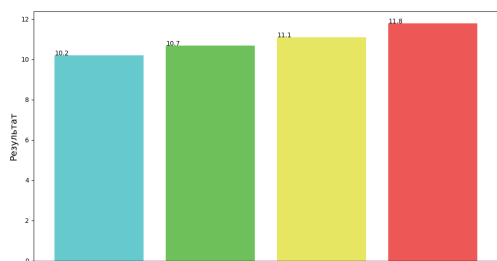
Степень корреляционной зависимости между парами значений показателей				
Очень слабая корреляция $0 < r < 0,5$	Слабая корреляция $0,5 < r < 0,7$	Средняя корреляция $0,7 < r < 0,8$	Высокая корреляция $0,8 < r < 0,9$	Очень высокая корреляция $0,9 < r < 1$
X1/Y И X2/Y r = nan				X1 И Y r = -0.9092988098824766
X1 И X2 r = nan				Собщ. и Y r = -0.9092988098824766
X2 И Y r = nan				

Р и с. 6. Корреляционная зависимость между бюджетом (X₁) и результатом (Y)F i g. 6. Correlation between budget (X₁) and result (Y)



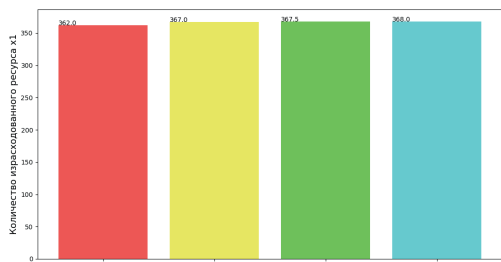
Р и с. 7. График зависимости между бюджетом и результатом: в системе 1 меньше бюджет – больше результат

F i g. 7. Dependence graph between budget and result: system 1 less budget - more result



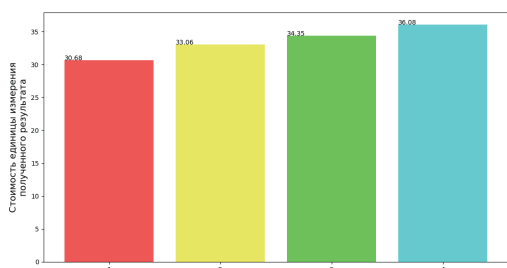
Р и с. 8. Количество суток функционирования систем

F i g. 8. Number of days of systems functioning



Р и с. 9. Распределение бюджета по оцениваемым системам

F i g. 9. Distribution of budget by Systems Evaluated



Р и с. 10. Сравнение стоимости одних суток функционирования систем

F i g. 10. Comparison of the cost of one day of system operation

Вывод: система 1 показала лучший результат при существенно меньшем расходе бюджетных средств. При этом в других системах наблюдалось незначительное изменение результата от потраченного бюджета (рис. 7 – 10).

3. Способы расчета комплексных показателей оценки качества систем

Для наиболее рационального применения пяти разработанных способов предусмотрены следующие правила, учитывающие условия функционирования оцениваемых систем [1].

1. Первые два способа применяются когда используемые в расчетах показатели качества делятся на две группы.

Первая группа. Показатели, где лучшим считается наименьшее значение показателя оценки качества ($P_{1,i}$), то есть показатели количественные значения которых в идеале должны быть минимально возможные (например, расход ресурсов), $1,1$ – количество выбранных показателей качества систем первой группы.

Вторая группа. Показатели, где лучшим считается наибольшее значение показателя оценки качества ($P_{2,i}$), то есть показатели количественные значения которых в идеале должны быть максимально возможные (например, время эксплуатации в неблагоприятных условиях), $2,1$ – количество выбранных показателей качества систем второй группы.

2. Если решено показатели качества не делить на вышеизложенные группы, то используются третий и четвертый способы оценки качества на основе мест в рейтинге систем, где M_{Piz} – место в рейтинге системы z по i -показателю оценки качества (P_i).

В формулах расчета используются следующие обозначения:
- $P_{1,i}$ – базовый i -показатель оценки качества систем, соответственно, $P_{1,i6}$ – 1 группы и $P_{2,i6}$ – i -показатель 2 группы;
- g_i – нормированные коэффициенты важности показателей качества (могут быть рассчитаны на основе мнений экспертов (рис. 2)).

Первый способ (основной). Расчет комплексного показателя оценки качества системы z (Q_{gz}) с использованием значений g_i – базовая формула (8):

$$Q_{gz} = \sum_{i=1,1}^{1,1} (1 - \frac{q_{1,i} P_{1,i}}{P_{1,i6}}) + \sum_{i=2,1}^{2,1} (\frac{q_{2,i} P_{2,i}}{P_{2,i6}}) \quad (8)$$

Второй способ. Расчет комплексного показателя оценки качества системы z (Q_{gz}) без использования значений нормированных коэффициентов важности показателей качества (g_i) – базовая формула (9):

$$Q_z = \sum_{i=1,1}^{1,1} (1 - \frac{P_{1,i}}{P_{1,i6}}) + \sum_{i=2,1}^{2,1} (\frac{P_{2,i}}{P_{2,i6}}) \quad (9)$$

Третий способ. Расчет комплексного показателя оценки качества системы z (Q_{gMz}) на основе рейтинга и значений g_i – базовая формула (10):

$$Q_{gMz} = \sum_{i=1}^n g_i (\frac{1 + (n - M_{Piz})}{\sum_{z=1}^n M_{Piz}}) \quad (10)$$



В третьем способе составление рейтинга систем осуществляется по наибольшему значению Q_{gMz} :

$$Q_{gMz_{\max}} > Q_{gMz_{-y}} > \dots > Q_{gMz_{\min}} \Rightarrow 1, 2, \dots, x,$$

соответственно, это правило действует и в четвертом способе для значений Q_{Mz} [1, С. 22].

Четвертый способ. Расчет комплексного показателя оценки качества системы z (Q_{gMz}) на основе рейтинга и без использования значений g_i – базовая формула (11):

$$Q_{Mz} = \sum_{i=1}^l \frac{1 + (n - M_{Piz})}{\sum_{z=1}^n M_{Piz}} \quad (11)$$

Пятый способ. Комплексная оценка качества систем путем совместного применения четырех вышеизложенных способов или их комбинаций – базовая формула (12):

$$Q_K = (Q_{gMz} Q_z Q_{gMz} Q_{Mz}) \quad (12)$$

Данный способ нашел свое применение в комплексной методике оценки качества [1] и может использоваться для сравнительного анализа результатов оценки, полученных разными способами⁴.

4. Методика оценки вероятности выхода из строя заданного количества элементов сложной системы в зависимости от вероятности выхода одного элемента в ее составе

Назначение (возможности) методики и программы для ЭВМ⁵:

1. Для расчета действительных значений вероятности ($P_n(x)$) одновременного отказа (неисправности) количества элементов (x) в составе системы, при одновременном отказе которых система гарантированно не выполнит свои функции, и кумулятивной вероятности ($F_n(x)$). Расчеты осуществляются в зависимости от заданной вероятности отказа одного элемента ($P_n(1)$) и общего количества оцениваемых элементов (n) в составе системы, от которых зависит выполнение одной или нескольких функций системы и (или) функционирование системы в целом за заданный период времени.

2. Для анализа зависимостей значений ($P_n(x)$ и $F_n(x)$) друг от друга, а также от вероятности отказа одного элемента ($P_n(1)$) и количества оцениваемых элементов (n).

3. Для определения количества элементов (x и n) и требований к значениям базовых вероятностных показателей ($P_n(1)$, $P_n(x)$ и $F_n(x)$) в сфере выполнения отдельных функций (функций) системы или в сфере эффективного функционирования всей системы.

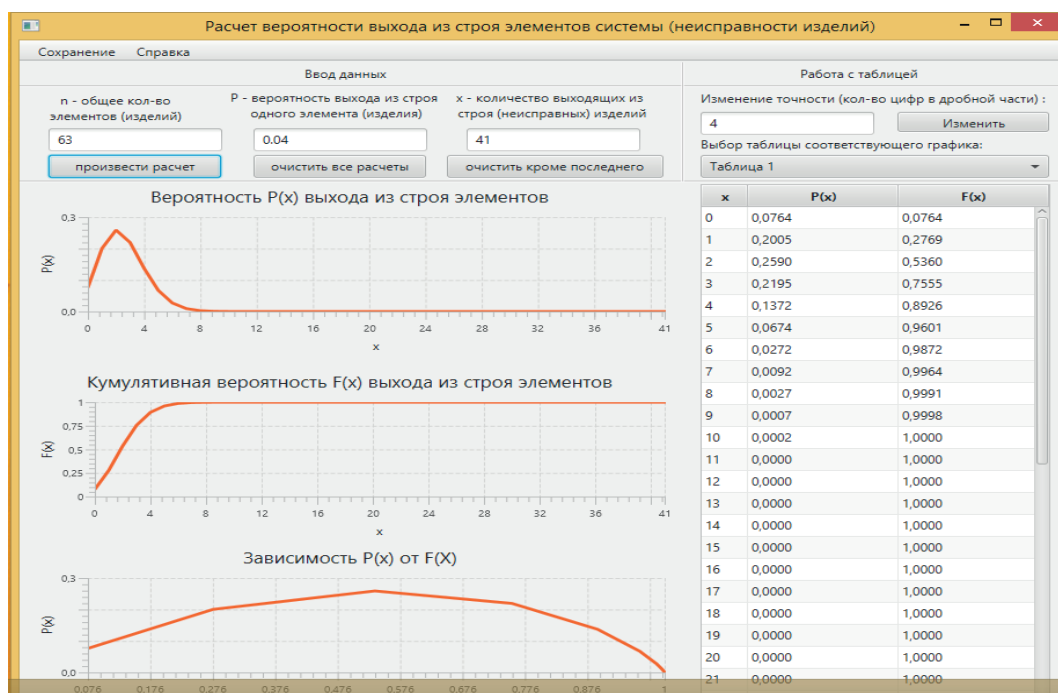


Рис. 11. Результаты расчетов и графики для $n=63$, $x=41$, $P_n(1)=0,04$

Fig. 11. Calculation results and graphs for $n=63$, $x=41$, $P_n(1)=0,04$

⁴ Там же.

⁵ Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020615328 Российская Федерация. Оценка устойчивости систем: № 2020614034; заявл. 25.03.2020; опубл. 21.05.2020 / К. З. Билядинов.



4. Для расчета и сравнения значений x , n , $P_n(1)$, $P_n(x)$ и $F_n(x)$ с их базовыми показателями (требованиями) или со значениями за разные периоды функционирования системы или для сравнения со значениями данных показателей других аналогичных систем.

5. Для определения «слабого звена» при функционировании системы: при выполнении какой функции системы вероятность невыполнения функции будет наибольшей, то есть наступит тот случай, когда значение $P_n(x)$ будет наибольшим.

6. Для экономии времени и ресурсов на испытание количества оцениваемых элементов (x и n) в реальных условиях при известном значении $P_n(1)$, за счет прогнозирования вероятности в сфере устойчивого функционирования систем (путем построения таблиц значений $P_n(x)$ и $F_n(x)$) [4, 11, 20, 25].

Краткая последовательность действий при выполнении методики:

1. Определение исходных данных для оценки качества систем.

1.1. Формулировка цели (назначения) применения методики и программы для ЭВМ, с помощью выбора и комбинации вышеописанных пунктов 1 – 6 назначения методики.

1.2. Определение функции (функций), на выполнения которой влияют оцениваемые элементы, или установление минимально необходимого числа систем (элементов одной системы), при котором система будет находиться в требуемом состоянии.

1.3. В зависимости от цели применения методики (п. 1-6 назначения) задать исходные значения x , n , или $P_n(1)$.

2. Выполнение расчетов и построение графиков – примеры на рисунке 11.

2.1.

$$P_n(x) = C_n^x P^x (1-P)^{n-x} = \frac{n!}{x!(n-x)!} P^x (1-P)^{n-x} \quad (1)$$

где C_n^x – число сочетаний из n элементов по x .

2.2.

$$F_n(x) = \sum_{k=0}^x P_n(k) \quad (2)$$

Кумулятивная вероятность зависит от x , n , P .

2.3. Если на практике объем n небольшой, то для расчета $P_n(x)$ рационально использовать формулу (3):

$$P_n(x) = \frac{P_n(1+x)^2(1-P)}{P(n-x)} \quad (3)$$

3. Оформление результатов оценки.

Основной недостаток методики: для расчетов необходимо знать действительное значение вероятности отказа одного элемента системы ($P_n(1)$).

Методика реализована в программе для ЭВМ «Расчет и анализ вероятностных характеристик системы»⁶, которая может применяться для моделирования и анализа вероятности отказов заданного числа элементов системы и кумулятивной вероятности.

Возможности программы: расчет вероятности отказов числа элементов системы и кумулятивной вероятности в зависимости от общего количества отказов элементов в системе. Программа выполняет построение и сравнение графиков и таблиц, а также их сохранение и экспорт в Word и (или) в Excel.

⁶ Там же.

⁷ Там же.

Язык программирования: Java. Объем программы: 324 кб.

Пример применения программы для ЭВМ «Расчет и анализ вероятностных характеристик системы»⁷ при решении задачи в какой из двух систем связи, имеющих в эксплуатации разное количество средства связи (выполняющих одинаковые функции), но двух разных типов (разных производителей) вероятность потери связи, будут выше: $P_1(9)$ или $P_2(10)$. Для решения задачи даны следующие исходные данные:

В первой системе связи (далее – система 1) эксплуатируется количество радиостанций $n1=63$. Определено, что одновременный отказ $x1=9$ и более числа средств связи приведёт к потере связи. При этом вероятность отказа одного средства связи первого типа, функционирующей в системе 1, будет равна $P1(1)=0,038$.

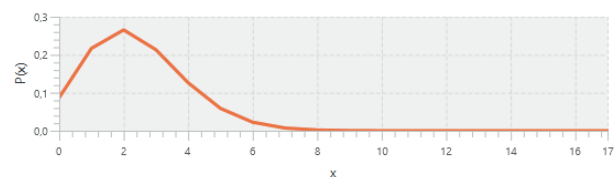
Во второй системе связи (далее – система 2) соответственно даны значения показателей $n2=56$, $x2=10$ и вероятность отказа средства связи второго типа, функционирующей во второй системе $P2(1)=0,044$.

Решение: по результатам расчетов получаем для системы 1 значение $P1(9) = 0,000483$ (табл. 1, рис. 12, 13, 14), а для системы $P2(10) = 0,000122$ (табл. 2, рис. 15, 16, 17).

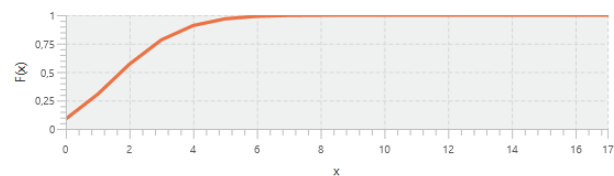
Т а б л и ц а 1. Результаты расчета вероятностных характеристик системы 1

Table 1. Results of calculating the probabilistic characteristics of system 1

X	F1(x)	P1(x)
0	0.08710	0.08710
1	0.30386	0.21675
2	0.56929	0.26542
3	0.78248	0.21318
4	0.90879	0.12631
5	0.96768	0.05887
6	0.99015	0.02248
7	0.99739	0.00723
8	0.999390	0.00199
9	0.99987	0.00048

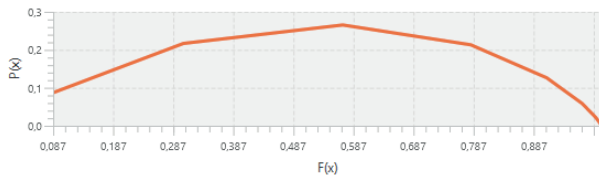


Р и с. 12. График вероятности отказа средств связи первого типа в системе 1
Fig. 12. Graph of the probability of failure of communication facilities of the first type in system 1

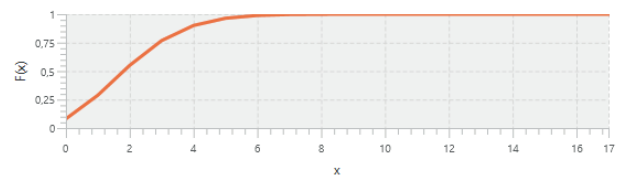


Р и с. 13. Кумулятивная вероятность отказа средств связи первого типа в системе 1
Fig. 13. Cumulative probability of failure of communication means of the first type in system 1





Р и с. 14. График зависимости $P1(x)$ от $F1(x)$ в системе 1
F i g. 14. Graph of $P1(x)$ vs. $F1(x)$ in system 1



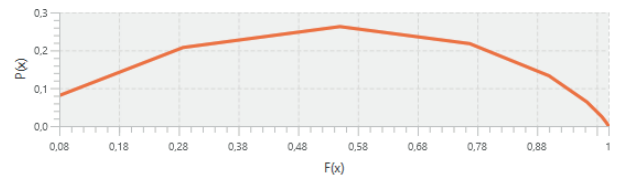
Р и с. 16. Кумулятивная вероятность отказа средств связи второго типа в системе 2

F i g. 16. Cumulative probability of failure of communication facilities of the second type in system 2

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета вероятностных характеристик системы 2

T a b l e 2. Results of calculating the probabilistic characteristics of system 2

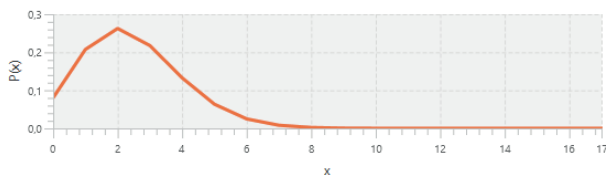
X	$F2(x)$	$P2(x)$
0	0.08047	0.08047
1	0.28787	0.20740
2	0.55039	0.26251
3	0.76787	0.21748
4	0.90049	0.13262
5	0.96398	0.06348
6	0.98882	0.02483
7	0.99692	0.00816
8	0.99928	0.00230
9	0.99988	0.00005
10	0.99999	0.00001



Р и с. 17. График зависимости $P2(x)$ от $F2(x)$ в системе 2

F i g. 17. Graph of $P2(x)$ vs. $F2(x)$ in system 2

Вывод: вероятность потери связи меньше в системе 2, чем в системе 1 на $\Delta P_{1,2} = 0,000361$.



Р и с. 15. График вероятности отказа средств связи второго типа в системе 2
F i g. 15. Graph of the probability of failure of communication facilities of the second type in system 2

5. Применение предлагаемого методического обеспечения в рамках существующих университетских программ и специальностей ВАК России

Анализ и систематизация результатов применения предлагаемого методического обеспечения, позволили составить рекомендации по развитию и совершенствованию компетенций студентов высших технических учебных заведений в рамках существующих образовательных программ (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Рекомендации по применению методического обеспечения инновационной оценки качества функционирования одного класса сложных систем в образовательных программах

T a b l e 3. Recommendations for the use of methodological support for innovative assessment of the quality of functioning of one class of complex systems in educational programs

Образовательные программы	Практические занятия	Лабораторные работы	Производственная практика	Выпускная квалификационная работа
Бакалавриат				
09.03.02 Информационные системы и технологии	Оценка качества программно-аппаратных средств	Оценка эффективности систем и технологий	Сравнение результатов применения технологий связи	Обоснование выбора лучшей телекоммуникационной системы
09.03.03 Прикладная информатика	Оценка качества программных систем	Оценка эффективности программных систем	Оценка эффективности функционирования программных систем	Оценка качества аппаратно-программных средств
11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи	Оценка качества средств связи	Экспертная оценка систем и технологий связи	Оценка эффективности функционирования оператора связи	Оценка качества систем и средств связи
Магистратура				
09.04.01 Информатика и вычислительная техника	Обоснование отдельных требований технического задания на разработку программных систем	Обоснование базовых требований к значению показателей качества программных систем	Оценка эффективности функционирования программных систем	Разработка программного обеспечения. Оценка эффективности внедрения результатов ВКР



Образовательные программы	Практические занятия	Лабораторные работы	Производственная практика	Выпускная квалификационная работа
09.04.02 Информационные системы и технологии	Оценка эффективности источников информации	Моделирование состояний устойчивости систем связи	Оценка эффективности функционирования систем связи	Оценка эффективности внедрения результатов ВКР
09.04.03 Прикладная информатика	Обоснование отдельных требований технического на разработку программного обеспечения	Моделирование состояний устойчивости программных систем	Оценка эффективности функционирования программных систем	Разработка программного обеспечения. Оценка эффективности внедрения результатов ВКР
27.04.03 Системный анализ и управление	Анализ корреляционной зависимости значений переменных при оценке результативности и экономической системы	Анализ и синтез структурно-функциональных моделей одного класса сложных систем	Рациональное использование мнений экспертов в интересах повышения эффективности систем	Обоснование рекомендаций по совершенствованию управления. Оценка эффективности систем.

В диссертационных исследованиях разработанное методическое обеспечение может быть применимо для разработки и совершенствования квалиметрических методов оценки качества объектов, согласно пункту 4 паспорта научной специальности 05.02.23 «Стандартизация и управление качеством продукции».

Однако, в большой степени данный инструментальный рационально применять при разработке научных результатов диссертационных исследований, предусмотренных пунктами 1, 3, 11 и 13 паспорта научной специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации».

Дополнительно методическое обеспечение может рационально применяться для выполнения задач анализа и синтеза архитектуры сложных систем, моделирования динамики значений показателей качества систем, для оценки эффективности внедрения научных результатов и (или) оценки качества разработанных (исследуемых) технических систем в диссертационных работах, соответствующим паспортам следующих специальностей ВАК:

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям);

05.22.08 – Управление процессами перевозок;

08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством;

08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики;

05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении;

05.02.22 – Организация производства;

05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение;

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям).

6. Дискуссия о перспективах применения методического обеспечения в системной инженерии

Предлагаемый математический аппарат пригоден для выполнения ряда важных практических задач в сфере реализации современных подходов, основанных на системной инженерии. В свою очередь данное утверждение основывается на работе [26], в которой представлены направления приложения и развития современной системной инженерии.

В [26] обосновывается целенаправленное существенное повышение качества и безопасности, снижение или удержание на

допустимом уровне рисков и/или снижение затрат (в т.ч. непроизводительных) на создание и эксплуатацию систем различной области приложения.

В этом случае разработанный математический аппарат будет являться развитием предложенного в [26] инновационного подхода к управлению качеством функционирования одного класса сложных систем и при этом будет способствовать рациональному решению актуальных задач, изложенных в научных работах [27, 28, 29].

В научной статье [27] предложен подход к практическому осуществлению работ по прогнозированию рисков для обеспечения качества информации в сложных системах (являющихся системами высокой доступности). Показано, что в основе лежат принципы системной инженерии и апробированные вероятностные модели.

В [28] обосновывается утверждение, что перспективная системная инженерия, выходя далеко за сегодняшние рамки, должна ориентироваться на системы будущего, становящиеся более разумными, самоорганизующимися, ресурсоэффективными, безопасными, устойчивыми, а также поддерживаться междисциплинарной теоретической основой. При этом в научной работе [29] изложены перспективные направления развития системной инженерии, предусматривающих для своей реализации применение риск-ориентированного подхода в жизненном цикле сложных систем.

Таким образом, опыт применения методического обеспечения инновационной оценки качества функционирования одного класса сложных систем обосновывает перспективы использования данного математического аппарата для обеспечения приоритетных направлений развития системной инженерии, актуальных и важных для устойчивого функционирования экономики Российской Федерации.

Заключение

Таким образом, сущность предлагаемых инноваций заключается в комплексном применении при оценке качества и эффективности систем (рис. 2) разработанных способов и методов, основанных на использовании действительных значений показателей качества.

Важность реализации системного подхода в исследуемой предметной области и структурно-функциональная сложность оцениваемых систем [12, 30, 31, 32] повышают значимость данных инноваций при совершенствовании процессов



управления системами.

Важно отметить, что теоретически одним из перспективных направлений рационального применения разработанных методик может являться регистрация сложных событий (в пределах видимости на горизонте событий), расчет вероятностных характеристик сценариев их развития, взаимосвязей

и оценки возможных последствий в интересах повышения эффективности исследования динамики состояний сложных систем [8, 9, 25, 32].

Представленные алгоритмы, методы и способы предусматривают возможность их рационального внедрения путем применения компьютерных программ⁸, что на практике позволяет существенно сократить затраты ресурсов и времени на оценку качества и эффективности систем в процессе эксплуатации.

Список использованных источников

- [1] Билядинов К. З. Комплексная методика оценки качества технических систем // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 11. С. 20-23. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44421366> (дата обращения: 04.02.2022).
- [2] Билядинов К. З., Меняйло В. В. Модифицированный метод DEA и методика оценки эффективности технических систем // Информационные технологии. 2020. Т. 26, № 11. С. 611-617. doi: <https://doi.org/10.17587/it.26.611-617>
- [3] Han P., Wang L., Song P. Doubly robust and locally efficient estimation with missing outcomes // Statistica Sinica. 2016. Vol. 26, no. 2. P. 691-719. doi: <http://dx.doi.org/10.5705/ss.2014.030>
- [4] Kalimoldayev M. N., Abdildayeva A. A., Mamyrbayev O. Zh. Information system based on the mathematical model of the EPS // Open Engineering. 2016. Vol. 6, issue 1. P. 464-469. doi: <https://doi.org/10.1515/eng-2016-0053>
- [5] Zou G., Faber M. H., González A., Banisoleiman K. A holistic approach to risk-based decision on inspection and design of fatigue-sensitive structures // Engineering Structures. 2020. Vol. 221. Article number: 110949. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110949>
- [6] Lütje A., Wohlgemuth V. Tracking Sustainability Targets with Quantitative Indicator Systems for Performance Measurement of Industrial Symbiosis in Industrial Parks // Administrative Sciences. 2020. Vol. 10, issue 1. Article number: 3. doi: <https://doi.org/10.3390/admsci10010003>
- [7] Ratner S., Ratner P. Developing a Strategy of Environmental Management for Electric Generating Companies Using DEA-Methodology // Advances in Systems Science and Applications. 2017. Vol. 17, no. 4. P. 78-92. doi: <https://doi.org/10.25728/assa.2017.17.4.521>
- [8] Baker J., Henderson S. The Cyber Data Science Process // The Cyber Defense Review. 2017. Vol. 2, issue 2. P. 47-68.
- [9] Calabrese R., Osmetti S. A. A new approach to measure systemic risk: A bivariate copula model for dependent censored data // European Journal of Operational Research. 2019. Vol. 279, issue 3. P. 1053-1064. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.027>
- [10] Farrell M. J. The Measurement of Productive Efficiency // Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General), Part III. 1957. Vol. 120, no. 3. P. 253-281. doi: <https://doi.org/10.2307/2343100>
- [11] Price M., Walker S., Wiley W. The Machine Beneath: Implications of Artificial Intelligence in Strategic Decision making // PRISM. 2018. Vol. 7, no. 4. P. 92-105. URL: <https://www.jstor.org/stable/26542709> (дата обращения: 04.02.2022).
- [12] Banker R., Kotarac K., Neralić L. Sensitivity and stability in stochastic data envelopment analysis // Journal of the Operational Research Society. 2015. Vol. 66, issue 1. P. 134-147. doi: <https://doi.org/10.1057/jors.2012.182>
- [13] Karagiannis G. On structural and average technical efficiency // Journal of Productivity Analysis. 2015. Vol. 43, issue 3. P. 259-267. doi: <https://doi.org/10.1007/s11123-015-0439-x>
- [14] Putz M., Wiene, T., Pierer A., Hoffmann M. A multi-sensor approach for failure identification during production enabled by parallel data monitoring // CIRP Annals. 2018. Vol. 67, issue 1. P. 491-494. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.079>
- [15] Синицын И. Н., Шаламов А. С. Стохастические CALS-технологии для послепродажного сопровождения систем высокой доступности // Системы высокой доступности. 2016. Т. 12, № 2. С. 13-27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26495574> (дата обращения: 04.02.2022).
- [16] Синицын И. Н., Шаламов А. С. Методические вопросы развития российской интегрированной логистической поддержки для управления жизненным циклом наукоемкой продукции // Системы высокой доступности. 2016. Т. 12, № 3. С. 3-8. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27706562> (дата обращения: 04.02.2022).
- [17] Yang R., Zheng W. X. Output-Based Event-Triggered Predictive Control for Networked Control Systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. Vol. 67, no. 12. P. 10631-10640. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2958303>
- [18] Dulá J. H. Computations in DEA // Pesquisa Operacional. 2002. Vol. 22, no. 2. P. 165-182. doi: <https://doi.org/10.1590/S0101-74382002000200005>
- [19] Trevino M. Cyber Physical Systems: The Coming Singularity // PRISM. 2019. Vol. 8, no. 3. P. 2-13. URL: <https://www.jstor.org/stable/26864273> (дата обращения: 04.02.2022).

⁸ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610389 Российская Федерация. Анализ и оценка эффективности систем: № 2019667306 : заявл. 20.12.2019 : опубл. 14.01.2020 / К. З. Билядинов. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42497089> (дата обращения: 04.02.2022); Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020615328 Российская Федерация. Оценка устойчивости систем: № 2020614034 : заявл. 25.03.2020 : опубл. 21.05.2020 / К. З. Билядинов.



- [20] Gerami J. An interactive procedure to improve estimate of value efficiency in DEA // *Expert Systems with Applications*. 2019. Vol. 137. P. 29-45. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.06.061>
- [21] Синицын И. Н. Интерполяционное аналитическое моделирование распределений в сложных стохастических системах // *Информатика и ее применения*. 2019. Т. 13, № 1. С. 2-8. doi: <https://doi.org/10.14357/19922264190101>
- [22] Билятдинов К. З., Меняйло В. В. Методология оценки качества систем в сфере устойчивости больших технических объектов // *Век качества*. 2020. № 2. С. 198-214. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43107559> (дата обращения: 04.02.2022).
- [23] Banker R. D., Charnes A., Cooper W. W. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis // *Management Science*. 1984. Vol. 30, no. 9. P. 1078-1092. URL: <https://www.jstor.org/stable/2631725> (дата обращения: 04.02.2022).
- [24] Chen J.-X. Overall performance evaluation: new bounded DEA models against unreachability of efficiency // *The Journal of the Operational Research Society*. 2014. Vol. 65, no. 7. P. 1120-1132. URL: <https://www.jstor.org/stable/24503167> (дата обращения: 04.02.2022).
- [25] Duer S. Assessment of the operation process of wind power plant's equipment with the use of an artificial neural network // *Energies*. 2020. Vol. 13, issue 10. Article number: 2437. doi: <https://doi.org/10.3390/en13102437>
- [26] Стандарты, методы и технологии системной инженерии / А. И. Костогрызов, Г. А. Нистратов, А. А. Нистратов [и др.] // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2013. № 9. С. 14-33. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23020507> (дата обращения: 04.02.2022).
- [27] Прогнозирование рисков для обеспечения качества информации в сложных системах / А. И. Костогрызов, П. В. Степанов, А. А. Нистратов [и др.] // *Системы высокой доступности*. 2016. Т. 12, № 3. С. 25-38. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27706565> (дата обращения: 04.02.2022).
- [28] Костогрызов А. И., Нистратов А. А. О приоритетных направлениях развития системной инженерии // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2021. Т. 17, № 2. С. 223-240. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202102.223-240>
- [29] Зацаринный А. А., Костогрызов А. И., Нистратов А. А. Приоритетные направления развития системной инженерии, предусматривающие применение риск-ориентированного подхода // *ИТ-Стандарт*. 2021. № 4(29). С. 23-37. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48225571> (дата обращения: 04.02.2022).
- [30] Shafik M. B., Chen H., Rashed G. Planning and reliability assessment to integrate distributed automation system into distribution networks utilizing binary hybrid PSO and GSA algorithms considering uncertainties // *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2020. Vol. 30, issue 11. Article number: e12594. doi: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12594>
- [31] Yizhen P., Yu W., Jingsong X., Yanyang Z. Adaptive stochastic-filter-based failure prediction model for complex repairable systems under uncertainty conditions // *Reliability Engineering and System Safety*. 2020. Vol. 204. Article number: 107190. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107190>
- [32] Zhang Z., David J. Structural order measure of manufacturing systems based on an information-theoretic approach // *Expert Systems with Applications*. 2020. Vol. 158. Article number: 113636. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113636>

Поступила 04.02.2022; одобрена после рецензирования 10.03.2022; принята к публикации 20.03.2022.

Об авторах:

Билятдинов Камиль Закирович, доцент факультета инфокоммуникационных технологий, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО» (197101, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А), кандидат военных наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4027-1449>, k74b@mail.ru

Досиков Василий Станиславович, независимый исследователь (Российская Федерация, г. Москва), доктор экономических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9017-0721>, dosikov@mail.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Biliatdinov K.Z. Complex method of quality assessment of big technical systems. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja = Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2020; (11):20-23. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44421366> (accessed 04.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [2] Biliatdinov K.Z., Menailo V.V. Modified method DEA and methodology of technical systems effectiveness assessment. *Informacionnyye Tehnologii = Information Technologies*. 2020; 26(11):611-617. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.17587/it.26.611-617>
- [3] Han P., Wang L., Song P.X.-K. Doubly robust and locally efficient estimation with missing outcomes. *Statistica Sinica*. 2016; 26(2):691-719. (In Eng.) doi: <http://dx.doi.org/10.5705/ss.2014.030>



- [4] Kalimoldayev M.N., Abdildayeva A.A., Mamyrbayev O.Zh. Information system based on the mathematical model of the EPS. *Open Engineering*. 2016; 6(1):464-469. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1515/eng-2016-0053>
- [5] Zou G., Faber M.H., González A., Banisoleiman K. A holistic approach to risk-based decision on inspection and design of fatigue-sensitive structures. *Engineering Structures*. 2020; 221:110949. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110949>
- [6] Lütje A., Wohlgemuth V. Tracking Sustainability Targets with Quantitative Indicator Systems for Performance Measurement of Industrial Symbiosis in Industrial Parks. *Administrative Sciences*. 2020; 10(1):3. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3390/adms-ci10010003>
- [7] Ratner S., Ratner P. Developing a Strategy of Environmental Management for Electric Generating Companies Using DEA-Methodology. *Advances in Systems Science and Applications*. 2017; 17(4):78-92. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.25728/assa.2017.17.4.521>
- [8] Baker J., Henderson S. The Cyber Data Science Process. *The Cyber Defense Review*. 2017; 2(2):47-68. (In Eng.)
- [9] Calabrese R., Osmetti S. A. A new approach to measure systemic risk: A bivariate copula model for dependent censored data. *European Journal of Operational Research*. 2019; 279(3):1053-1064. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.027>
- [10] Farrell M.J. The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General), Part III*. 1957; 120(3):253-281. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.2307/2343100>
- [11] Price M., Walker S., Wiley W. The Machine Beneath: Implications of Artificial Intelligence in Strategic Decision making. *PRISM*. 2018; 7(4):92-105. Available at: <https://www.jstor.org/stable/26542709> (accessed 04.02.2022). (In Eng.)
- [12] Banker R., Kotarac K., Neralić L. Sensitivity and stability in stochastic data envelopment analysis. *Journal of the Operational Research Society*. 2015; 66(1):134-147. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1057/jors.2012.182>
- [13] Karagiannis G. On structural and average technical efficiency. *Journal of Productivity Analysis*. 2015; 43(3):259-267. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s11123-015-0439-x>
- [14] Putz M., Wiene, T., Pierer A., Hoffmann M. A multi-sensor approach for failure identification during production enabled by parallel data monitoring. *CIRP Annals*. 2018; 67(1):491-494. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.079>
- [15] Sinitsyn I.N., Shalamov A.S. Stochastic CALS-technologies for highly available aftersale product management systems. *Sistemy vysokoj dostupnosti = Highly Available Systems*. 2016; 12(2):13-27. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26495574> (accessed 04.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [16] Sinitsyn I.N., Shalamov A.S. Development of Russian integrated logistic support management system for life cycle management: methodological aspects. *Sistemy vysokoj dostupnosti = Highly Available Systems*. 2016; 12(3):3-8. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27706562> (accessed 04.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [17] Yang R., Zheng W.X. Output-Based Event-Triggered Predictive Control for Networked Control Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020; 67(12):10631-10640. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2958303>
- [18] Dulá J.H. Computations in DEA. *Pesquisa Operacional*. 2002; 22(2):165-182. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1590/S0101-74382002000200005>
- [19] Trevino M. Cyber Physical Systems: The Coming Singularity. *PRISM*. 2019; 8(3):2-13. Available at: <https://www.jstor.org/stable/26864273> (accessed 04.02.2022). (In Eng.)
- [20] Gerami J. An interactive procedure to improve estimate of value efficiency in DEA. *Expert Systems with Applications*. 2019; 137:29-45. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.06.061>
- [21] Sinitsyn I.N. Interpolational analytical modeling in complex stochastic systems. *Informatika i ee primenenija = Informatics and Applications*. 2019; 13(1):2-8. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.14357/19922264190101>
- [22] Biliatdinov K.Z., Menailo V.V. Methodology of quality assessment of systems in the sphere of stability of big technical objects. *Vek kachestva = Age of Quality*. 2020; (2):198-214. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43107559> (accessed 04.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [23] Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*. 1984; 30(9):1078-1092. Available at: <https://www.jstor.org/stable/2631725> (accessed 04.02.2022). (In Eng.)
- [24] Chen J.-X. Overall performance evaluation: new bounded DEA models against unreachability of efficiency. *The Journal of the Operational Research Society*. 2014; 65(7):1120-1132. Available at: <https://www.jstor.org/stable/24503167> (accessed 04.02.2022). (In Eng.)
- [25] Duer S. Assessment of the operation process of wind power plant's equipment with the use of an artificial neural network. *Energies*. 2020; 13(10):2437. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3390/en13102437>
- [26] Kostogryzov A.I., et al. *Standarty, metody i tehnologii sistemnoj inzhenerii* [Standards, methods and technologies of systems engineering]. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2013; (9):14-33. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23020507> (accessed 04.02.2022). (In Russ.)
- [27] Kostogryzov A.I. Risk prediction for providing information quality in complex systems. *Sistemy vysokoj dostupnosti = Highly Available Systems*. 2016; 12(3):25-38. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27706565> (accessed 04.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [28] Kostogryzov A.I., Nistratov A.A. About the Promising Directions of System Engineering Development. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2021; 17(2):223-240. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202102.223-240>



- [29] Zatsarinny A.A., Kostogryzov A.I., Nistratov A.A. Priority directions of system engineering development, providing for the use of risk-oriented approach. *IT-Standart = IT Standard*. 2021; (4):23-37. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48225571> (accessed 04.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
- [30] Shafik M.B., Chen H., Rashed G. Planning and reliability assessment to integrate distributed automation system into distribution networks utilizing binary hybrid PSO and GSA algorithms considering uncertainties. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2020; 30(11):e12594. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12594>
- [31] Yizhen P., Yu W., Jingsong X., Yanyang Z. Adaptive stochastic-filter-based failure prediction model for complex repairable systems under uncertainty conditions. *Reliability Engineering and System Safety*. 2020; 204:107190. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107190>
- [32] Zhang Z., David J. Structural order measure of manufacturing systems based on an information-theoretic approach. *Expert Systems with Applications*. 2020; 158:113636. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113636>

Submitted 04.02.2022; approved after reviewing 10.03.2022; accepted for publication 20.03.2022.

About the authors:

Kamil Z. Biliatdinov, Associate Professor of the Faculty of Infocommunication Technologies, ITMO University (49 Kronverksky Pr., bldg. A, St. Petersburg 197101, Russian Federation), Ph.D. in Military Science, Associate Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4027-1449>**, k74b@mail.ru

Vasily S. Dosikov, Independent researcher (Moscow, Russian Federation), Dr.Sci. (Economy), Associate Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9017-0721>**, dosikov@mail.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

