



АЛГОРИТМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

С. В. Петренко, М. Э. Громовой

Петренко Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, начальник отдела, Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А. А. Расплетина, тел: + 7 (925) 521-05-87; e-mail: viola349650@yandex.ru;

Громовой Максим Эдуардович, старший инженер, 170 военное представительство Министерства обороны Российской Федерации; аспирант, Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны «Алмаз – Антей» им. академика В. П. Ефремова, г. Москва, Российская Федерация, тел: + 7(999) 209-24-29; e-mail: m.gromovoi@gmail.com

Рассмотрены оценочные параметры, характеризующие работу основных подсистем сложной технической системы, значения которых регистрируются штатными средствами объективного контроля в ходе натурных испытаний. С целью повышения достоверности оценки данной системы рассмотрена задача по разработке алгоритма количественного определения информативности оценочных параметров и формированию на его основе достаточного множества параметров для ее последующей оценки. Предложенный алгоритм основан на методе многокритериального взвешенного ранжирования и аппарате нечеткой логики Мамдани. Алгоритм включает формирование бинарной матрицы отношений, расчет частных коэффициентов охвата подсистем, охвата этапов и типа регистрируемого сигнала сложной технической системы, их объединение в интегральный показатель, нечеткий вывод по базе правил и определение порога информативности. В результате определены показатели информативности параметров, выполнено их ранжирование и сформировано минимально необходимое диагностическое множество: при пороге 0,5 оно включает два параметра (№ 1 и № 2), обеспечивающих полный охват всех функциональных подсистем и этапов функционирования; выделены приоритетные параметры №№ 1, 2, 3, 8 с наибольшей индивидуальной информативностью ($y^* = 1,0$; $I = 0,886$; ранг 1 по обоим методам). Применение алгоритма при разработке программ натурных испытаний данной СТС позволит обосновать необходимый состав контролируемых параметров штатных средств объективного контроля.

Ключевые слова: сложная техническая система, техническая диагностика, нечеткая логика, многокритериальная оптимизация, задача о покрытии, информативность параметров, система поддержки принятия решений.

ALGORITHM FOR MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF THE INFORMATIVENESS OF PARAMETERS OF A COMPLEX TECHNICAL SYSTEM

S. V. Petrenko, M. E. Gromovoy

Petrenko Sergey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Scientific and Production Association "Almaz" named after Academician A. A. Raspletin, phone: + 7 (925) 521-05-87; e-mail: viola349650@yandex.ru;

Gromovoy Maksim Eduardovich, Senior Engineer, 170th Military Representative Office of the Ministry of Defense of the Russian Federation; postgraduate student, Academician V. P. Efremov Almaz-Antey Aerospace Defense Research and Educational Center, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (999) 209-24-29; e-mail: m.gromovoi@gmail.com

The evaluation parameters characterising the operation of the main subsystems of a complex technical system are considered; their values are recorded by standard objective control means during full-scale tests. In order to improve the accuracy and reliability of this system evaluation, the problem of developing an algorithm for the quantitative determination of the informativeness of evaluation parameters and, on this basis, forming a sufficient set of parameters for its evaluation is considered. An algorithm for the quantitative assessment of parameter informativeness is proposed, based on the method of multi-criteria weighted ranking and the apparatus of Mamdani fuzzy logic. The algorithm includes the formation of a binary relation matrix, the calculation of partial coefficients of subsystem coverage, stage coverage and the type of the recorded complex technical system signal, their combination into an integral indicator, fuzzy inference over a rule base, and determination of the informativeness threshold. As a result, the informativeness indicators of the parameters have been determined, their ranking has been performed, and a minimally necessary diagnostic set has been formed: at a threshold of 0.5, it minimally includes two parameters ensuring complete coverage of all functional subsystems and operation stages; priority parameters no. 1, 2, 3, and 8 with the highest individual informativeness have been identified ($y^* = 1.0$; $I = 0.886$; rank 1 by both methods). The application of the algorithm in developing full-scale test programmes for this CTS will make it possible to justify the required composition of controlled parameters of standard objective control means.

Keywords: complex technical system, technical diagnostics, fuzzy logic, multi-criteria optimization, covering problem, parameter informativeness, decision support system.

Цель – разработать алгоритм многокритериальной оценки информативных параметров сложной технической системы и выделить среди них достаточное множество параметров, необходимое для ее оценки.

В результате определены показатели информативности параметров, выполнено их ранжирование и сформировано минимально необходимое диагностическое множество.

Разработанный алгоритм позволит сформировать минимальное множество параметров для оценки СТС и обосновать необходимый состав контролируемых параметров штатных средств объективного контроля.

Введение

Определение информативности оцениваемых параметров сложной технической системы (СТС) является одной из ключевых задач обоснования при разработке и корректировке программы натурных испытаний СТС [1]. Несмотря на практическую значимость задачи, единого формально обоснованного подхода к определению информативности параметров оценки сложной технической системы с учетом ее специфики не существует. Известные подходы к оценке информативности опираются преимущественно на экспертные суждения без их строгого формального обоснования, поэтому представляется целесообразной разработка методов определения информативности параметров оценивания надежности рассматриваемой системы с использованием аппарата многокритериальной оценки и нечеткой логики [2, 3].

Метод

В основе предлагаемого алгоритма лежит многокритериальное взвешенное ранжирование и нечеткий логический вывод Мамдани с дефазификацией методом центра тяжести. Задача решается путем реализации следующих этапов: формирование бинарной матрицы отношений «параметр – подсистема – этап функционирования» и расчет частных коэффициентов; объединение коэффициентов в интегральный показатель и нечеткая оценка информативности; определение порога информативности и формирование минимального контролируемого множества. Ниже раскрывается содержание каждого этапа.

Выбор информативных параметров сложной технической системы сводится к следующему: из заданного множества телеметрических параметров требуется выделить такое подмножество минимальной мощности, которое обеспечивает полный охват всех функциональных подсистем и этапов функционирования, а внутри этого подмножества – определить параметр с наибольшей информативностью. Общий вид алгоритма представлен на рисунке 1.

Вход алгоритма: бинарная матрица отношений. Выход: минимальное контролируемое множество параметров и приоритетный параметр. Условие окончания: полное покрытие всех функциональных систем и этапов функционирования, при котором удаление любого параметра нарушает покрытие.

В качестве исследуемых параметров отобраны показатели, которые характеризуют работоспособность подсистем СТС на различных этапах ее функционирования и регистрируются установленными для нее документацией средствами объективного контроля.

1. Формирование бинарной матрицы отношений

Для каждого параметра задается бинарная матрица отношений $B \in \{0,1\}^{(n \times k)}$, включающая:

- семь столбцов бинарных отношений «параметр – подсистема», где $b_{ij} = 1$, если параметр i характеризует подсистему j , а 0 – иначе;
- четыре столбца бинарных отношений «параметр – этап работы»: $b_{ik} = 1$; если параметр i характеризует этап функционирования k , а 0 – иначе;
- два столбца принадлежности к типу регистрируемой команды: «плавная» или «разовая».

Бинарные отношения параметров к подсистемам и этапам функционирования сложной технической системы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Фрагмент бинарных отношений параметров к системам и этапам

Table 1

Fragment of binary relationships between parameters, systems, and stages

Fragment of binary Relationships between parameters, systems, and stages														
№ п/п	Наименование параметра	Значение отношения к «подсистеме», «этапу работы» и «типу команды»												
		S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	T ₁	T ₂
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.	1 параметр	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
2.	2 параметр	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
3.	3 параметр	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
4.	4 параметр	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0
5.	5 параметр	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0
6.	6 параметр	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0
7.	7 параметр	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0
8.	8 параметр	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1
9.	9 параметр	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0
...														
37.	37 параметр	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1		1

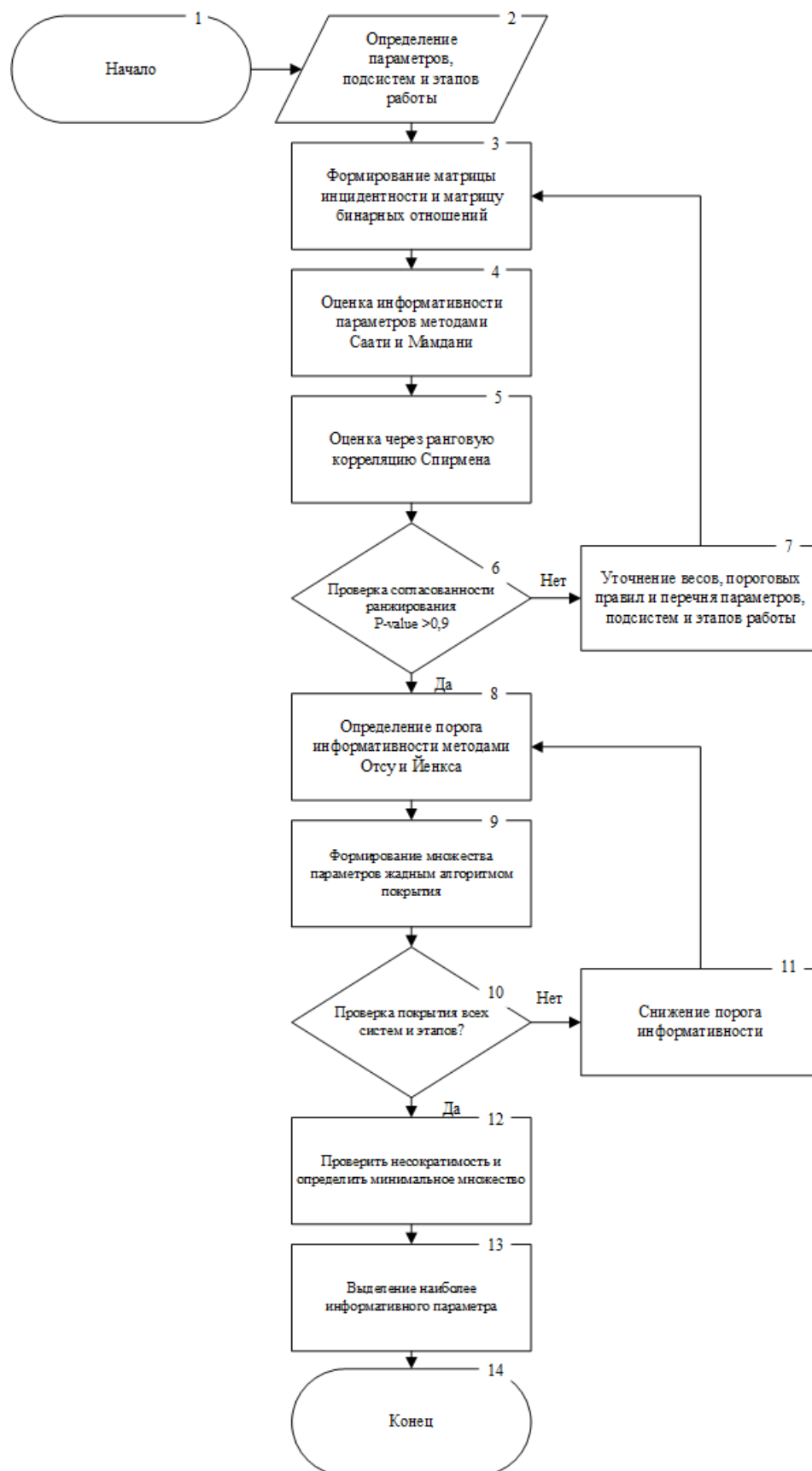


Рис. 1. Алгоритм определения информативных параметров сложной технической системы (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Algorithm for determining informative parameters of a complex technical system (illustration by the authors)

2. Многокритериальная оценка информативности

Для каждого параметра i введены три коэффициента [3, 4]:

$$K_{\text{сист}}(i) = \frac{1}{N_{\text{сист}}} \times \sum_j b_{ij}, \text{ при } N_{\text{сист}} = 7. \quad (1)$$

$$K_{\text{эт}}(i) = \frac{1}{N_{\text{эт}}} \times \sum_j b_{ij}, \text{ при } N_{\text{эт}} = 4. \quad (2)$$

$$K_{\text{комд}}(i) = \begin{cases} 1, & \text{если команда плавная;} \\ 0,5, & \text{если команда разовая;} \\ 0, & \text{если команда отсутствует.} \end{cases} \quad (3)$$

Интегральный показатель информативности рассчитывается как взвешенная сумма трех критериев [3, 4]:

$$I_i = \omega_1 \times K_{\text{сист}}(i) + \omega_2 \times K_{\text{эт}}(i) + \omega_3 \times K_{\text{комд}}(i). \quad (4)$$

Веса критериев определены экспертным методом при условии с учетом приоритета охвата подсистем над охватом этапов и приняты равными $\omega_1 = 0,5$; $\omega_2 = 0,3$; $\omega_3 = 0,2$, что удовлетворяет условию нормировки:

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1. \quad (5)$$

Показатель $I_i \in [0; 1]$. Чем ближе показатель информативности к 1, тем более информативен параметр. Расчет выполнен для всех параметров. Фрагмент представлен в таблице 2.

Таблица 2

Фрагмент результатов многокритериальной оценки

Table 2

Excerpt from the results of the multi-criteria assessment

№ п/п	Наименование параметра	Значения критериев			Значение интегрального показателя I	Значение ранга информативности
		$K_{\text{сист}}(i)$ (охват систем)	$K_{\text{эт}}(i)$ (охват этапов)	$K_{\text{комд}}(i)$ (тип команды)		
	1	2	3	4	5	6
1.	1 параметр	0,714	1,000	1,000	0,886	1
2.	2 параметр	0,714	1,000	1,000	0,886	1
3.	3 параметр	0,714	1,000	1,000	0,886	1
4.	4 параметр	0,429	0,750	1,000	0,684	14
5.	5 параметр	0,286	0,750	1,000	0,627	16
6.	6 параметр	0,286	0,750	1,000	0,627	16
7.	7 параметр	0,571	0,750	1,000	0,741	10
8.	8 параметр	0,714	1,000	1,000	0,886	1
9.	9 параметр	0,429	1,000	1,000	0,771	6
...						
37.	37 параметр	0,286	1,000	0,500	0,589	18

Наивысшую информативность $I = 0,886$ имеют параметры 1–3 и 8: они характеризуют наибольшее число подсистем, присутствуют на всех этапах функционирования СТС и относятся к плавному типу сигнала. Наименьший показатель имеет параметр, охватывающий одну подсистему, один этап функционирования и относящийся к разовому типу сигнала.

Многокритериальная оценка полученных результатов позволила количественно определить степень влияния каждого параметра, в дальнейшем для оценки этих параметров в условиях неопределенности были произведены расчеты на основании нечеткой логики Мамдани [6–9].

3. Нечеткая оценка информативности

Рассмотрим нечеткую систему оценки информативности с тремя входными переменными $K_{\text{сист}}(i)$, $K_{\text{эт}}(i)$ и $K_{\text{комд}}(i)$, а также одной выходной переменной – «Информативность» [2]. Аналогичный подход рассмотрен в работе [5].

Для каждой входной переменной $x \in [0; 1]$ определены три треугольных термина: «Низкий», «Средний», «Высокий». Треугольная функция принадлежности имеет вид согласно рисунку 2 [6–11]:

$$\mu_{\text{низ}}(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } x \leq 0; \\ 1 - 2x, & \text{при } 0 < x < 0,5; \\ 0, & \text{при } x \geq 0,5. \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{\text{сред}}(x) = \begin{cases} 2x, & \text{при } 0 < x \leq 0,5; \\ 2 - 2x, & \text{при } 0,5 < x < 1; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{\text{выс}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq 0; \\ 2x - 1, & \text{при } 0 < x < 1. \\ 0, & \text{при } x \geq 1. \end{cases} \quad (8)$$

Взаимное расположение функций принадлежности позволяет установить, какие параметры попадают в зону перекрытия термов, где степень нечеткости максимальна, а какие однозначно относятся к высокому либо низкому терму. Так, параметры 1–3 и 8, например, имеют $\mu_{\text{выс}} \approx 1$ по всем трем осям, где нечеткий выход близкий к 1.

Пики выходных термов: 0 = Низкая, 0,5 = Средняя, 1 = Высокая. Для каждой выходной переменной построены графики отнесения четких чисел $K_{\text{сист}}$, $K_{\text{эт}}$, $K_{\text{комд}}$ к степеням принадлежности к термам «Низкий, средний или высокий» через треугольные функции. Пример отнесения «параметра 1» указан на рисунке 3.

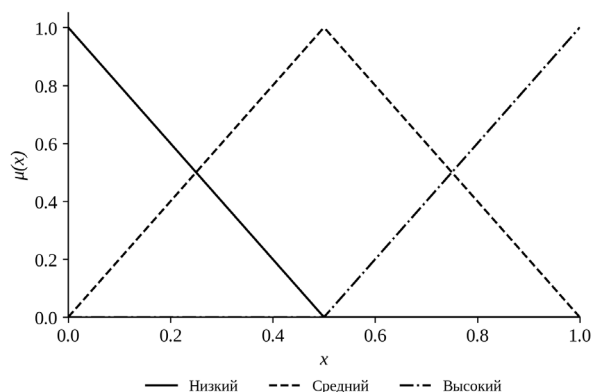


Рис. 2. График функции принадлежности (иллюстрация авторов)

Fig. 2. The graph of the membership function (illustration by the authors)

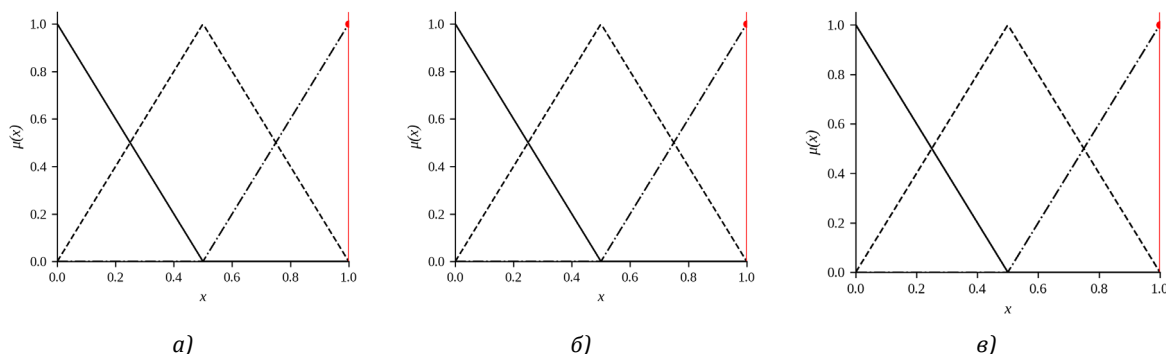


Рис. 3. График функции принадлежности: а) $K_{\text{сис}}$, б) $K_{\text{эт}}$, в) $K_{\text{кмд}}$ (иллюстрация авторов)

Fig. 3 – The graph of the membership function: а) $K_{\text{сис}}$, б) $K_{\text{эт}}$, в) $K_{\text{кмд}}$ (illustration by the authors)

Видно, что точки пересечения красной вертикальной линии четкого значения критерия с треугольниками задают степени принадлежности к каждому терму.

Далее разработана база из 15 нечетких правил вида «ЕСЛИ ... ТО ...». Агрегация условий выполня-

ется операцией «min», которая обозначает «логическое И», активация вывода – операцией «max» по всем правилам с одинаковым выводом [4, 6]:

$$a_{\text{выс}} = \max \{ \min (\mu_{\text{выс}}(K_{\text{сис}}), \mu_{\text{выс}}(K_{\text{эт}}), \mu_{\text{выс}}(K_{\text{кмд}})); \dots \} \quad (9)$$

Сформированные нечеткие правила представлены в таблице 3 (фрагмент).

Таблица 3

Фрагмент таблицы нечетких правил

Table 3

Fragment of the fuzzy rule table

№ п/п	Наименование условия	Наименование вывода
	1	2
1.	$K_{\text{сис}} = \text{Высокий}$ и $K_{\text{эт}} = \text{Высокий}$ и $K_{\text{кмд}} = \text{Высокий}$	Информативность = Высокая
2.	$K_{\text{сис}} = \text{Высокий}$ и $K_{\text{эт}} = \text{Высокий}$ и $K_{\text{кмд}} = \text{Средний}$	Информативность = Высокая
5.	$K_{\text{сис}} = \text{Средний}$ и $K_{\text{эт}} = \text{Средний}$ и $K_{\text{кмд}} = \text{Высокий}$	Информативность = Средняя
8.	$K_{\text{сис}} = \text{Средний}$ и $K_{\text{эт}} = \text{Средний}$ и $K_{\text{кмд}} = \text{Средний}$	Информативность = Средняя
11.	$K_{\text{сис}} = \text{Низкий}$ и $K_{\text{эт}} = \text{Низкий}$ и $K_{\text{кмд}} = \text{Высокий}$	Информативность = Низкая
...		
15.	$K_{\text{сис}} = \text{Низкий}$ и $K_{\text{эт}} = \text{Низкий}$ и $K_{\text{кмд}} = \text{Низкий}$	Информативность = Низкая

Из всех правил для одного вывода берется максимальное.

Дефаззификация проведена методом определения центра тяжести, где получены четкие числа: взвешенное среднее пиков выходных термов по их силе активации.

Четкое значение нечеткого выхода получается методом центра тяжести [5, 6]:

$$y^* = \frac{(a_{\text{выс}} \times 1 + a_{\text{сред}} \times 0,5 + a_{\text{низ}} \times 0)}{(a_{\text{выс}} + a_{\text{сред}} + a_{\text{низ}})} \quad (10)$$

Принято, что информативность параметра высокая при значении $y^* > 0,87$; средняя при значении $0,4 < y^* < 0,87$; низкая при значении $y^* < 0,4$.

Сформированный график, представленный на рисунке 6, показывает для каждого параметра α – активацию выходных классов. Каждая α вычисляется как максимум по всем правилам с данным выводом.

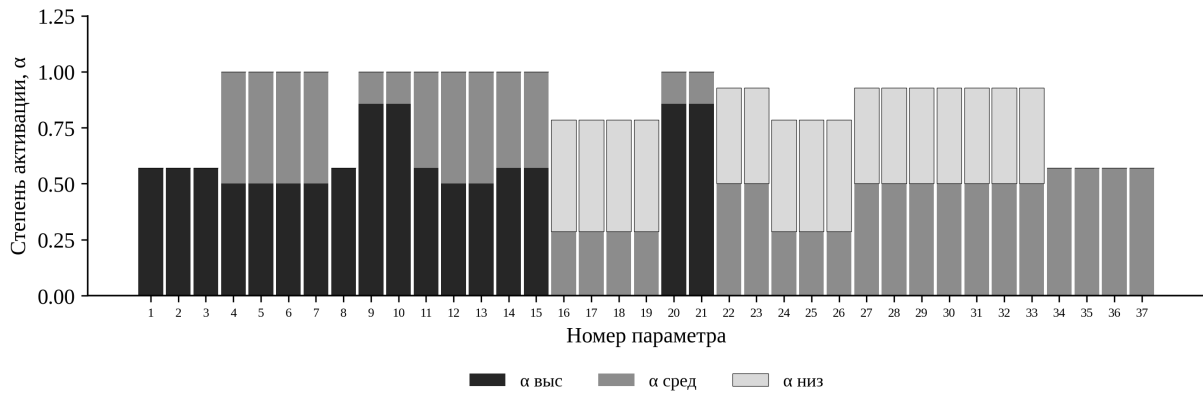


Рис. 6. Гистограмма активации нечетких правил по параметрам (иллюстрация авторов)
Fig. 6. Histogram of fuzzy rule activation by parameters (illustration by the authors)

На рисунке 6 видно, что параметры 1–3 и 8 обладают наибольшей активацией класса «высокая информативность» и минимальной – класса «низкая», тогда как такие параметры как 16 демонстрируют обратную картину. Распределение визуально подтверждает числовую оценку и позволяет выявить параметры в зоне неопределенности.

После агрегации нечетких правил для каждого параметра получена результирующая функция принадлежности, преобразуемая в единственное значение y^* [13–15]. Результаты представлены на рисунке 7.

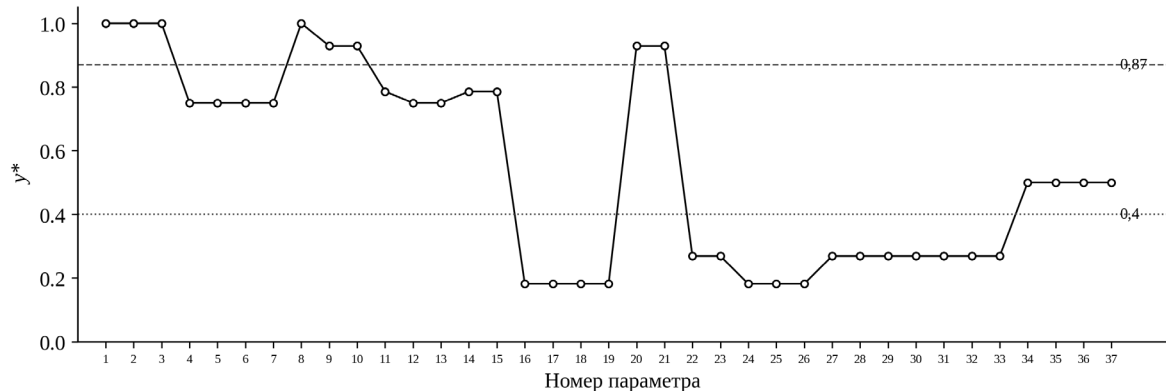


Рис. 7. График дефазификация параметров (иллюстрация авторов)
Fig. 7. Graph of parameter defuzzification (illustration by the authors)

Видно, какие параметры имеют степень принадлежности по критериям и их нечеткий выход [13–15]. Параметры 1, 2, 3, 7, 21 имеют

наиболее близкую принадлежность к высокой информативности.

Фрагмент полученных результатов оценки информативности представлены в таблице 4.

Таблица 4

Фрагмент результатов нечеткой оценки информативности

Table 4

Excerpt from the results of the fuzzy assessment of informativeness

№ п/п	Наименование параметра	Значение $\alpha_{\text{выс}}$	Значение $\alpha_{\text{сред}}$	Значение $\alpha_{\text{низ}}$	Значение вывода y^*	Показатель информативности
	1	2	3	4	5	6
1.	1 параметр	1,000	0,000	0,000	1,000	Высокая
2.	8 параметр	1,000	0,000	0,000	1,000	Высокая
3.	12 параметр	0,857	0,143	0,000	0,929	Высокая
4.	4 параметр	0,500	0,500	0,000	0,750	Высокая
5.	16 параметр	0,000	0,286	0,714	0,143	Низкая
...						
37.	37 параметр	0,000	0,143	0,857	0,071	Низкая

4. Сопоставление ранжирований и проверка сходимости

Установлено, что наиболее информативными по результатам обоих методов являются параметры с наибольшим охватом подсистем и этапов

функционирования СТС, относящиеся к плавному типу сигнала [18, 19]. Высокая степень совпадения ранжирований, полученных независимыми методами, свидетельствует о достоверности получен-

ных результатов. Результаты ранжирований оценены коэффициентом ранговой корреляции Спирмена [15, 16]: для параметров, ранжированных обоими методами, получено значение $\rho = 0,96$.

5. Определение порога информативности параметров

Перед формированием минимального контролируемого множества необходимо установить порог, отделяющий информативные параметры от малоинформативных [15–17]. Для ото-

бранных элементов рассматриваются их телеметрические параметры, информативность которых оценена нечетким выводом. Порог информативности по нечеткому выходу y^* определен методами Отсу и Йенкс [20, 21], которые дали схожие значения 0,5, выше которых находятся 21 параметр из общего числа, при которых достигается максимальное покрытие систем и параметров. Распределение y^* и положение порога показаны на рисунке 8.

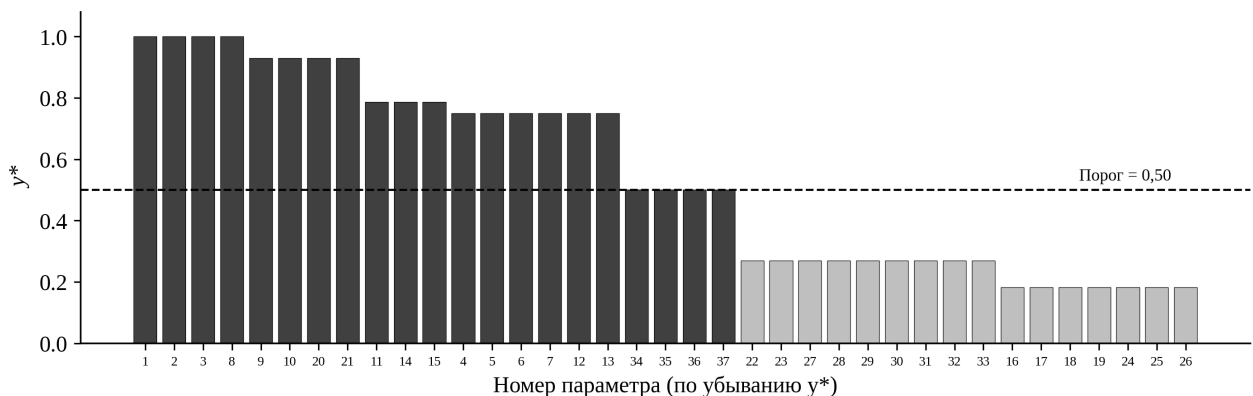


Рис. 8. Распределение дефазифицированных значений y^* и порог отбора информативных параметров (иллюстрация авторов)

Fig. 8. The distribution of defuzzified y^* values and the threshold for selecting informative parameters (illustration by the authors)

На рисунке 8 представлено распределение дефазифицированных значений y^* по всем параметрам в порядке убывания. Горизонтальная линия соответствует порогу, определенному методами Отсу и Йенкса – 0,5. Параметры, расположенные выше порога, формируют множество информативных кандидатов для последующего решения задачи о покрытии; параметры ниже порога исключаются из рассмотрения, что существенно сокращает размерность задачи без потери полноты контроля.

6. Формирование минимального контролируемого множества

Пусть U – совокупность подлежащих контролю объектов – функциональных систем и этапов рабочего цикла СТС, а $P_{\text{доп}} \subseteq P$ подмножество параметров, допустимых по информативности. Каждый параметр i покрывает подмножество $U_i \subseteq U$, характеризуемых им систем и этапов работы. Задача формулируется как задача о покрытии:

$$\min \sum_i x_i, \text{ при } \sum_{i: u \in U_i} x_i \geq 1, \forall u \in U; x_i \in \{0,1\}. \quad (11)$$

На первом этапе минимизируется число контролируемых параметров среди всех полных покрытий, что обеспечивает минимальность мощности. На втором уровне среди множеств одинаковой мощности выбирается обладающее наибольшей суммарной информативностью. Тем самым нечеткая оценка информативности непосредственно влияет на итоговый состав.

$$\max \sum_i y_i^* x_i, \text{ при } \sum_i x_i = |M^*|. \quad (12)$$

Задача решается методом целочисленного линейного программирования, гарантирующим глобальный минимум и независимой проверкой жадным алгоритмом последовательного покрытия [21–24]. Совпадение мощности множеств служит подтверждением корректности решения.

Предположим, что из минимального множества M^* можно удалить некоторый параметр, и полученное подмножество M_j^* покрывает U . Тогда это подмножество является допустимым покрытием меньшей мощности, что противоречит минимальности множества M^* . Следовательно, удаление любого такого параметра нарушает условие полноты покрытия, и множество M^* соответственно несократимо.

Применение алгоритма ко всем параметрам при пороге 0,4 дало минимальное контролируемое множество из двух параметров – $M^* = \{1, 12\}$. Параметр 1 покрывает системы 1, 2, 4, 6, 7 и все этапы; параметр 12 добавляет системы 3 и 5. Совместно они покрывают все 7 функциональных систем и все 4 этапа. Жадный алгоритм подтвердил мощность, а проверка показала несократимость, что удаление любого из двух параметров оставляет хотя бы одну систему без контроля.

При пороге 0,87, где проводится отбор только высокоинформативных параметров, полное покрытие становится недостижимым: систему 5 характеризуют лишь параметры со средней и низкой

информативностью, и ее контроль оказывается невозможным. Таким образом, требуется компромисс между информативностью и полнотой покрытия.

7. Выделение наиболее информативного параметра

В случае, если требуется единственный показатель состояния изделия, внутри минимального множества выделяется параметр с наибольшей информативностью [24]. Среди параметров множества $M^* = \{1, 12\}$ наибольший дефазифицированный показатель имеет параметр 1 – $y^* = 1,0$, а его интегральный показатель – $I = 0,886$, где ранг 1 по обоим методам, тогда как параметр 12 характеризуется значениями $y^* = 0,75$ и $I = 0,798$. Следовательно, наиболее информативным является параметр 1.

Минимальное множество M^* обеспечивает полноту контроля – достаточность для оценки соответствия СТС по всем функциональным системам и этапам. Один параметр не обладает свойством достаточности: отдельно взятый параметр 1 не покрывает системы 3 и 5, поэтому он не заменяет множество, а используется как приоритетный показатель в тех задачах последующего анализа, где допустимо оперировать единственным параметром. Таким образом, минимальное множество и наиболее информативный параметр являются взаимодополняющими результатами алгоритма: первое отвечает за полноту контроля, второй – за приоритетность при свертке к одному показателю.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты использованы для анализа зависимости между информативностью отдельных параметров и полнотой контроля сложной технической системы. Результаты расчета показали наличие зависимости между интегральной оценкой информативности параметров и их способностью характеризовать состояние функциональных систем. Для проверки согласованности полученных оценок был выполнен корреляционный анализ. Полученное ранжирование позволяет перейти от исходного множества параметров к ограниченному множеству параметров, обладающих требуемым уровнем информативности. При этом окончательный выбор параметров определяется не только величиной индивидуальной информативности, но и необходимостью обеспечить полный охват функциональных систем и этапов функционирования. Для выделения множества информативных кандидатов использовано пороговое значение. В рассматриваемом случае методы Отсу и Йенкса дали значение порога, близкое к 0,5. Параметры, значения информативности которых превышают установленный порог, рассматриваются как кандидаты для последующего решения задачи покрытия; параметры с меньшими значениями в дальней-

ший отбор не включаются. Такой подход позволяет сократить размерность задачи при сохранении требования полноты контроля. После определения множества допустимых по информативности параметров была решена задача формирования минимального контролируемого множества. Полученные результаты показывают, что использование только критерия индивидуальной информативности недостаточно для формирования окончательного состава параметров. Параметр со сравнительно высокой информативностью может не обеспечивать контроль отдельной функциональной системы, тогда как включение дополнительного параметра с меньшей информативностью позволяет устранить этот пробел. Поэтому окончательный состав целесообразно формировать с одновременным учетом информативности и условия полного покрытия.

Полученные результаты в целом соответствуют сложившемуся направлению исследований, в котором для оценки состояния СТС используются методы теории информации, нечеткой логики и многокритериального анализа. В отличие от подходов, ориентированных преимущественно на оценку информативности отдельных параметров, в настоящем исследовании полученная оценка дополнительно используется для формирования минимального множества параметров, обеспечивающего требуемое покрытие функциональных систем и этапов функционирования сложной технической системы.

Заключение

В результате проведенного исследования разработан алгоритм многокритериальной оценки информативных параметров сложной технической системы и выделены среди них достаточное множество параметров:

1. Сформирована бинарная матрица отношений «параметр – подсистема – этап функционирования», включающая 7 подсистем, 4 этапа функционирования и 2 типа регистрируемого сигнала, что позволило формализовать исходные данные для оценки информативности параметров СТС.

2. Выполнена многокритериальная оценка информативности параметров: рассчитаны частные коэффициенты охвата подсистем, охвата этапов и типа регистрируемого сигнала, объединенные в интегральный показатель $I \in [0; 1]$; определены ранги параметров.

3. Проведена нечеткая оценка информативности на основе аппарата Мамдани: для каждой входной переменной заданы три треугольных терма, сформирована база из 15 правил, выполнена дефазификация методом центра тяжести; получены четкие значения y^* для всех параметров.

4. Выполнено сопоставление ранжирований, полученных двумя независимыми мето-

дами; коэффициент ранговой корреляции Спирмена составил $\rho = 0,96$, что подтверждает достоверность результатов.

5. Определен порог информативности методами Отсу и Йенкса, составивший 0,5; параметры выше порога отнесены к наиболее информативным параметрам, ниже – исключены из дальнейшего рассмотрения.

6. Сформировано минимально необходимое диагностическое множество: при пороге 0,5 оно включает два параметра – {1, 12}, обеспечивающих полный охват всех функциональных подсистем и этапов функционирования СТС; проверка подтвердила несократимость множества.

7. Выделены приоритетные параметры № 1, 2, 3, 8 с наибольшей индивидуальной информативностью; в качестве приоритетного параметра минимального множества определен параметр № 1.

Получено минимальное множество параметров, полностью покрывающее все функциональные системы и этапы работы, и выделен наиболее информативный параметр множества для случаев, требующих единственного обобщенного показателя.

Список литературы

1. Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
2. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений : пер. с англ. / Л. Заде; пер. Н. И. Ринго ; под ред. Н. Н. Моисеева и С. А. Орловского. – М. : Мир, 1976. – 167 с.
3. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий : пер. с англ. / Т. Л. Саати; пер. Р. Г. Вачнадзе. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.
4. Семененко М. Г. Проблемы выбора функций принадлежности нечетких множеств / М. Г. Семененко, И. В. Князева, С. И. Черняев // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 587.
5. Wang Z. Multi-Criteria Decision Making in Chemical and Process Engineering: Methods, Progress and Potential / Z. Wang, S. R. Nabavi, G. P. Rangaiah // Processes. – 2024. – Vol. 12, № 11. – Art. 2532. – DOI 10.3390/pr12112532.
6. Khan M. Ensemble and optimization algorithm in support vector machines for classification of wheat genotypes / M. Khan, B. K. Hooda, A. Gaur, V. Singh, Y. Jindal, H. Tanwar, S. Sharma, S. Sheoran, D. K. Vishwakarma, M. Khalid, G. S. Albakri, M. A. Alreshidi, J. R. Choi, K. K. Yadav // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Art. 22728. – DOI 10.1038/s41598-024-72056-0.
7. Филонов А. А. Способ определения информативности оценочных параметров зенитной управляемой ракеты / А. А. Филонов, М. Э. Громовой, А. И. Сисигин, Т. М. Лифанова // Научный вестник ВА ВКО. – 2026. – № 2 (18), (специальный выпуск). – С. 162–169.
8. Mamdani E. H. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller / E. H. Mamdani, S. Assilian // International Journal of Man-Machine Studies. – 1975. – Vol. 7, № 1. – P. 1–13. – DOI 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
9. Aissaoui A. G., Tahour A. Application of Fuzzy Logic in Control of Electrical Machines // Fuzzy Logic: Controls, Concepts, Theories and Applications / ed. by E. P. Dadios. — Rijeka : InTech, 2012. — P. 107–128. — ISBN 978-953-51-0396-7. — DOI: 10.5772/35770.
10. Parwitasari I. P. Implementasi Fuzzy Mamdani pada Sistem Pendukung Keputusan Pemilihan Mobil Listrik / A. G. Aissaoui, A. Tahour // Jurnal Diferensial. – 2026. – Vol. 8, № 1. – DOI 10.35508/jd.v8i1.25024.
11. Семененко М. Г. Проблемы выбора функций принадлежности нечетких множеств в моделировании систем / М. Г. Семененко, И. В. Князева, С. И. Черняев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 8, ч. 3. – С. 165–166.
12. Zadeh L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Vol. 8, № 3. – P. 338–353. – DOI 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
13. Kaliniewicz Z., Szczygłak P., Lipiński A., Markowski P., Lipiński S. The use of a Mamdani-type fuzzy model for assessing the performance of a boom stabilization systems in a field sprayer // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Art. 18591. – DOI 10.1038/s41598-023-46087-y.
14. Kgatwe C. K. Fuzzy Inference Engine in Condition Monitoring of Industrial Equipment: An Overview / C. K. Kgatwe, O. O. Olatunji, P. A. Adedeji, N. Madushele // 2023 14th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). – 2023. – P. 262–267. – DOI 10.1109/ICMIMT59138.2023.10200882.
15. Djenadić S. Risk Evaluation: Brief Review and Innovation Model Based on Fuzzy Logic and MCDM / S. Djenadić, M. Tanasijević, P. Jovančić, D. Ignjatović, D. Petrović, U. Bugarić // Mathematics. – 2022. – Vol. 10, № 5. – Art. 811. – DOI 10.3390/math10050811.
16. Spearman C. The Proof and Measurement of Association between Two Things / C. Spearman // The American Journal of Psychology. – 1904. – Vol. 15, № 1. – P. 72–101. – DOI 10.2307/1412159.
17. Романов А. В., Запотичная Л. В., Малышонков И. О., Урсегова А. С. Система диагностики и прогнозирования остаточного ресурса приводов мобильных роботов на базе нечеткой логики / А. В. Романов, Л. В. Запотичная, И. О. Малышонков, А. С. Урсегова // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. – 2021. – № 2. – С. 59–65.
18. Купчикова Н. В. Автоматизация проверки соответствия конструктивно-технологических решений высотного здания нормативным требованиям на основе интеграции ТИМ и RAG-LLM / Н. В. Купчикова, А. И. Сухорукова, Т. В. Золина // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2026. – № 2 (56). – С. 125–131. – DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-125-131.
19. Купчикова Н. В. Разработка программного модуля с веб-интерфейсом для проверки ТИМ-моделей зданий и сооружений при прохождении государственной экспертизы / Н. В. Купчикова, И. А. Демкина, Е. О. Шкруднев

// Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2026. – № 1 (55). – С. 86–93. – DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-86-93.

20. Золина Т. В. Цифровые кейсы как инструмент цифровой трансформации проектной деятельности / Т. В. Золина, Н. В. Купчикова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 4 (46). – С. 86–91. – DOI 10.52684/2312-3702-2023-46-4-86-91.

21. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms / N. Otsu // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1979. – Vol. 9, № 1. – P. 62–66. – DOI 10.1109/TSMC.1979.4310076.

22. Selvachandran G. A New Design of Mamdani Complex Fuzzy Inference System for Multiattribute Decision Making Problems / G. Selvachandran, S. G. Quek, L. T. H. Lan, L. H. Son, N. L. Giang, W. Ding, M. Abdel-Basset, V. H. C. De Albuquerque // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2021. – Vol. 29, № 4. – P. 716–730. – DOI 10.1109/TFUZZ.2019.2961350.

23. Krysander M. An efficient algorithm for finding minimal overconstrained subsystems for model-based diagnosis / M. Krysander, J. Aslund, M. Nyberg // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 2008. – Part A, vol. 38, № 1. – P. 197–206.

24. Chvatal V. A. Greedy Heuristic for the Set-Covering Problem / V. A. Chvatal // Mathematics of Operations Research. – 1979. – Vol. 4, № 3. – P. 233–235.

References

1. Birger I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical Diagnostics]. Moscow : Mashinostroyeniye; 1978, 240 p.
2. Zadeh L. *Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i yego primeneniye k prinyatiyu priblizhennikh reshenii* [The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Decision-Making]. Moscow : Mir; 1976, 167 p.
3. Saaty T. L. *Prinyatie reshenii. Metod analiza ierarkhii* [Decision Making. The Analytic Hierarchy Process]. Moscow : Radio i Svyaz; 1993, 278 p.
4. Semenenko M. G., Knyazeva I. V., Chernyaev S. I. Problemi vibora funktsii prinadlezhnosti nechetkikh mnozhestv [Problems of choosing membership functions of fuzzy sets]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Contemporary Issues in Science and Education]. 2013, no. 5, pp. 587.
5. Wang Z., Nabavi S. R., Rangaiah G. P. Multi-Criteria Decision Making in Chemical and Process Engineering: Methods, Progress and Potential. *Processes*. 2024, vol. 12, no. 11, art. 2532. DOI 10.3390/pr12112532.
6. Khan M., Hooda B. K., Gaur A., Singh V., Jindal Y., Tanwar H., Sharma S., Sheoran S., Vishwakarma D. K., Khalid M., Albakri G. S., Alreshidi M. A., Choi J. R., Yadav K. K. Ensemble and optimization algorithm in support vector machines for classification of wheat genotypes. *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, art. 22728. DOI: 10.1038/s41598-024-72056-0.
7. Filonov A. A., Gromovoi M. E., Sisigin A. I., Lifanova T. M. Sposob opredeleniya informativnosti otsenok parametrov zenitnoi upravlyаемой ракеты [Method for determining the informativeness of evaluation parameters of a surface-to-air guided missile]. *Nauchnyi vestnik VA VKO* [Scientific Bulletin of the Military Academy of Aerospace Defense]. 2026, no. 2 (18), pp. 162–169.
8. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1975, vol. 7, no. 1, pp. 1–13. DOI 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
9. Aissaoui A. G., Tahour A. Application of Fuzzy Logic in Control of Electrical Machines. *Fuzzy Logic: Controls, Concepts, Theories and Applications*. Rijeka : InTech; 2012, pp. 107–128. ISBN 978-953-51-0396-7. DOI 10.5772/35770.
10. Parwitasari I. P., Setyawan A. P. Implementasi Fuzzy Mamdani pada Sistem Pendukung Keputusan Pemilihan Mobil Listrik. *Jurnal Diferensial*. 2026, vol. 8, no. 1. DOI: 10.35508/jd.v8i1.25024.
11. Semenenko M. G., Knyazeva I. V., Chernyaev S. I. Problemi vibora funktsii prinadlezhnosti nechetkikh mnozhestv v modelirovaniy sistem [Problems of choosing membership functions of fuzzy sets in system modeling]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2013, no. 8, part 3. P. 165–166.
12. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965, vol. 8, no. 3, pp. 338–353. DOI 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
13. Kaliniewicz Z., Szczyglak P., Lipiński A., Markowski P., Lipiński S. The use of a Mamdani-type fuzzy model for assessing the performance of a boom stabilization systems in a field sprayer. *Scientific Reports*. 2023, vol. 13, art. 18591. DOI 10.1038/s41598-023-46087-Y.
14. Kgatwe C. K., Olatunji O. O., Adedjei P. A., Madushele N. Fuzzy Inference Engine in Condition Monitoring of Industrial Equipment: An Overview. *2023 14th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*. 2023, pp. 262–267. DOI 10.1109/ICMIMT59138.2023.10200882.
15. Djenadić S., Tanasijević M., Jovančić P., Ignjatović D., Petrović D., Bugarić U. Risk Evaluation: Brief Review and Innovation Model Based on Fuzzy Logic and MCDM. *Mathematics*. 2022, vol. 10, no. 5, art. 811. DOI 10.3390/math10050811.
16. Spearman C. The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*. 1904, vol. 15, no. 1, pp. 72–101. DOI 10.2307/1412159.
17. Romanov A. V., Zapotichnaya L. V., Malyshonkov I. O., Ursegova A. S. Sistema diagnostiki i prognozirovaniya ostatnochnogo resursa privodov mobilnykh robotov na baze nechetkoi logiki [A system for diagnostics and prediction of the residual life of mobile robot drives based on fuzzy logic]. *KIP i avtomatika: obsluzhivaniye i remont* [Instrumentation and Automation: Maintenance and Repair]. 2021, no. 2, pp. 59–65.
18. Kupchikova N. V., Sukhorukova A. I., Zolina T. V. Avtomatizatsiya proverki sootvetstviya konstruktivno-tehnologicheskikh reshenii visotnogo zdaniya normativnim trebovaniyam na osnove integratsii TIM i RAG-LLM [Automation of compliance checking of structural and technological solutions of a high-rise building with regulatory requirements based on TIM and RAG-LLM integration]. *Inzhenerno-stroitelnyi vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2026, no. 2 (56), pp. 125–131. (In Russ.). DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-125-131.

19. Kupchikova N. V., Demkina I. A., Shkrudnev Ye. O. Razrabotka programnogo modulya s veb-interfeisom dlya proverki TIM-modelei zdaniy i sooruzheniy pri prokhozhenii gosudarstvennoi ekspertizy [Development of a software module with a web interface for checking TIM models of buildings and structures during state expertise]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2026, no. 1(55), pp. 86–93. (In Russ.) DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-86-93.
20. Zolina T. V., Kupchikova N. V. Tsifrovie keisi kak instrument tsifrovoy transformatsii proektnoi deyatel'nosti [Digital cases as a tool for digital transformation of design activity]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2023, no. 4 (46), pp. 86–91. (In Russ.) DOI 10.52684/2312-3702-2023-46-4-86-91.
21. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979, vol. 9, no. 1, pp. 62–66. DOI 10.1109/TSMC.1979.4310076.
22. Selvachandran G., Quek S. G., Lan L. T. H., Son L. H., Giang N. L., Ding W., Abdel-Basset M., De Albuquerque V. H. C. A New Design of Mamdani Complex Fuzzy Inference System for Multiattribute Decision Making Problems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2021, vol. 29, no. 4, pp. 716–730. DOI: 10.1109/TFUZZ.2019.2961350.
23. Krysander M., Aslund J., Nyberg M. An efficient algorithm for finding minimal over-constrained subsystems for model-based diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 2008, part A, vol. 38, no. 1, pp. 197–206.
24. Chvatal V. A Greedy Heuristic for the Set-Covering Problem. *Mathematics of Operations Research*. 1979, vol. 4, no. 3, pp. 233–235.

© С. В. Петренко, М. Э. Громова

Ссылка для цитирования:

Петренко С. В., Громова М. Э. Алгоритм многокритериальной оценки информативности параметров сложной технической системы // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 3 (57). С. 82–92.

УДК 69.05

DOI 10.52684/2312-3702-2026-57-3-92-98

КОНЦЕПЦИЯ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

С. Х. Байрамуков, З. Н. Долаева

Байрамуков Салис Хамидович, доктор технических наук, профессор кафедры строительства, транспорта, машиностроения и электроэнергетики, Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт, г. Невинномысск, Российская Федерация, тел.: + 7 (86554) 9-55-50 доб. 139; e-mail: salis_pochta@mail.ru;

Долаева Зурьят Ньюзюровна, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела аспирантуры, Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск, Российская Федерация, тел.: + 7 (8782) 29-35-98; e-mail: zuridolaeva@yandex.ru

Статья посвящена разработке концепции многоцелевой оптимизации управления строительным производством в условиях возрастающей сложности инвестиционно-строительных проектов и необходимости одновременного учета противоречивых критериев эффективности. Исследование проблем и особенностей строительной отрасли показало, что эффективность управления строительным производством предполагает формализовать именно эту многомерность, то есть находить набор решений, каждое из которых представляет собой разумный компромисс между несколькими одновременно важными показателями. Авторами статьи предлагается многоцелевая структура оптимального управления процессом строительного производства, которая позволяет достичь как плавного, так и экономически эффективного управления. В рамках этой структуры состояние между последовательными управляющими воздействиями рассматривается как равноправная цель оптимизации наряду с экономическими факторами, генерируя фронт Парето для явного отображения компромисса между плавностью управления и стоимостью. Предложенная концепция обеспечивает значительное повышение эффективности управления.

Ключевые слова: многоцелевая оптимизация, детерминированные алгоритмы, метаэвристические методы, строительное производство, эффективность управления, энергоэффективность, фронт Парето.

CONCEPT OF MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION PRODUCTION MANAGEMENT

S. Kh. Bayramukov, Z. N. Dolayeva

Bayramukov Salis Khamidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Construction, Transport, Mechanical Engineering, and Electric Power Engineering Department, Nevinnomyssk State Humanities and Technical Institute, Nevinnomyssk, Russian Federation; phone: + 7 (86554) 9-55-50, ext. 139; e-mail: salis_pochta@mail.ru;

Dolayeva Zuryat Nyuzyurovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Postgraduate Studies Department, North Caucasus State Academy, Cherkessk, Russian Federation; phone: + 7 (8782) 29-35-98; e-mail: zuridolaeva@yandex.ru