

## Метод экспресс-оценки уровня работоспособности сложной высокоответственной технической системы

Д. Л. Тукеев<sup>1</sup>, Р. В. Зайцев<sup>2</sup>, Д. А. Первухин<sup>1</sup>, О. В. Афанасьева<sup>1✉</sup>,  
И. М. Новожилов<sup>3</sup>, О. С. Волгина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Михайловская военная артиллерийская академия МО РФ, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ [afanaseva\\_ov@pers.spmi.ru](mailto:afanaseva_ov@pers.spmi.ru)

**Аннотация.** Цель написания статьи – обоснование возможности и целесообразности экспресс-оценки уровня работоспособности сложной высокоответственной технической системы обобщенным численным параметром за счет применения современных методов системного анализа и прогнозирования. Исходя из особенностей решения задач технической диагностики, связанных с периодическим измерительным контролем технического состояния сложной высокоответственной технической системы (СВТС) и последующими его оценкой и прогнозированием на основе полученных результатов, разработаны: единичный показатель уровня работоспособности, описывающий численным значением информацию, однозначно характеризующую уровень работоспособности объекта контроля (ОК) по некоторому параметру; обобщенный показатель уровня работоспособности, описывающий численным значением информацию, однозначно характеризующую уровень работоспособности объекта контроля в целом; процедуры получения показателей, а также прогнозирования значения уровня работоспособности на заданный период эксплуатации.

Результаты вычислительных экспериментов подтверждают сделанные выводы и способствуют концентрации дальнейших усилий в направлении расширения области реализации показателей уровня работоспособности в других областях применения теории автоматизированного контроля.

**Ключевые слова:** контроль технического состояния, контролируемый параметр, показатель, нормализация, уровень работоспособности, результат измерения, коэффициент детерминации

**Для цитирования:** Метод экспресс-оценки уровня работоспособности сложной высокоответственной технической системы / Д. Л. Тукеев, Р. В. Зайцев, Д. А. Первухин, О. В. Афанасьева, И. М. Новожилов, О. С. Волгина // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 4. С. 78–87. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-4-78-87.

---

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Express-Assessment Method for the Operational Capability Level of a Complex High-Responsibility Technical System

D. L. Tukeev<sup>1</sup>, R. V. Zaitsev<sup>2</sup>, D. A. Pervukhin<sup>1</sup>, O. V. Afanasieva<sup>1✉</sup>,  
I. M. Novozhilov<sup>3</sup>, O. S. Volgina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Mikhaylovskaya Military Artillery Academy, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ afanaseva\_ov@pers.spmi.ru

**Abstract.** The aim of this work is to substantiate the possibility and feasibility of an express assessment of the operability level of a complex high-responsibility technical system using a generalized numerical parameter through the application of modern methods of system analysis and forecasting.

In the article, based on the specifics of solving technical diagnostics problems associated with periodic measurement monitoring of the technical condition of a complex high-responsibility technical system (CHTS) and its subsequent assessment and forecasting based on the obtained results, the following have been developed: a single indicator of the operability level, which describes, with a numerical value, information that uniquely characterizes the operability level of the control object (CO) according to a certain parameter; a generalized indicator of the operability level, which describes, with a numerical value, information that uniquely characterizes the operability level of the control object as a whole; procedures for obtaining the indicators, as well as for forecasting the value of the operability level for a specified operation period.

The results of computational experiments confirm the conclusions drawn and help focus further efforts on expanding the scope of implementation of operability level indicators in other areas of application of the theory of automated control.

**Keywords:** technical condition monitoring, controlled parameter, indicator, normalization, operability level, measurement result, coefficient of determination

**For citation:** Express-Assessment Method for the Operational Capability Level of a Complex High-Responsibility Technical System / D. L. Tukeev, R. V. Zaitsev, D. A. Pervukhin, O. V. Afanasieva, I. M. Novozhilov, O. S. Volgina // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 4. P. 78–87. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-4-78-87.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflicts of interests.

**Введение.** Внедрение теории системного анализа, принятия решения и перспективных наукоемких технологий в процесс эксплуатации сложных высокоответственных технических систем представляет одно из наиболее важных и перспективных направлений повышения их эффективности, поскольку существенно снижает риск возникновения отказов за счет организации многомерного прогностического контроля технического состояния и обеспечивает возможность реализации их эксплуатации по текущему техническому состоянию с концентрацией внимания и соответствующих регламентных мероприятий на выявленных «проблемных» зонах [1], [2].

В современных условиях формирования систем контроля технического состояния, когда количество

контролируемых параметров исчисляется десятками и сотнями [3], [4], их физическая природа (размерность) и значимость не всегда одинаковы, а общий результат «годен–негоден» – низкоинформативен [5], [6], возможность грубой оценки уровня работоспособности сложной высокоответственной технической системы обобщенным численным параметром представляется целесообразной, а данное направление исследований – актуальным.

**Постановка задачи.** Исходя из особенностей решения задач технической диагностики, связанных с периодическим измерительным контролем технического состояния сложной высокоответственной технической системы (СВТС) и последующими его оценкой и прогнозированием, на основе полученных результатов разработать:

– единичный показатель уровня работоспособности, описывающий численным значением информацию, однозначно характеризующую уровень работоспособности объекта контроля (ОК) по некоторому параметру;

– обобщенный показатель уровня работоспособности, описывающий численным значением информацию, однозначно характеризующую уровень работоспособности ОК в целом;

– процедуры получения показателей, а также прогнозирования значения уровня работоспособности на заданный период эксплуатации.

**Требования, ограничения и допущения.**

Для расширения круга пользователей сформируем данными показателями систему требований, ограничений и допущений в следующем виде:

– получаемые единичные показатели должны иметь максимально простой математический вид, а входящие в них величины – прозрачный метод их измерения/определения;

– получаемые единичные показатели должны учитывать взаимное положение результата измерения относительно границ области принятия решения «годен», а их значения представлять собой безразмерные величины в интервале [0; 1], причем значение 1 должно означать максимальный уровень работоспособности, а 0 – состояние «негоден»;

– получение обобщенного показателя уровня работоспособности СВТС может быть осуществлено с использованием экспертных процедур, формализующих мнение специалистов по вопросу доверия к результатам контроля и важности контролируемых параметров. Технология получения значений экспертных оценок в статье не рассматривается;

– количество периодов экстраполяции – один.

Разработка нового показателя – всегда трудоемкий и творческий процесс, требующий системного анализа значительного объема исходной информации [7], [8]. В частности, анализ постановки задачи, требований, ограничений и допущений, а также существующих подходов к нормированию [9]–[11], схематично представлен следующими выражениями, а именно:

– степенного масштабирования

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i}{F^n}, \quad (1)$$

где  $\tilde{x}_i$  – нормированное значение;  $x_i$  – исходное значение;  $F$  – некоторое основание (чаще всего 10);  $n$  – степень (порядок) исходного числа;

– обобщенной минимаксной нормализации

$$\tilde{x}_i = a + \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}(b - a), \quad (2)$$

где  $[a, b]$  – границы диапазона приведения;  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  – максимальное и минимальное значение исходного значения соответственно;

– нормализации средним (Z-нормализации)

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma_x}, \quad (3)$$

где  $\bar{X}$ ,  $\sigma_x$  – среднее и дисперсия рассматриваемой совокупности исходных значений соответственно. Выражения (1)–(3) – ключевые при статистической обработке результатов измерений;

– нормализации функцией принадлежности треугольной формы

$$f_{\Delta}(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{если } a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{если } b \leq m_z \leq c; \\ 0, & \text{если } c < x, \end{cases} \quad (4)$$

показал, что наиболее близко по физической сущности выражение (4), которое можно адаптировать под особенности решаемой задачи, характеризуемые рис. 1, следующим образом:

$$R_Z(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } z < z_H; \\ \frac{z_B - z}{z_B - m_Z}, & \text{если } z_H \leq z \leq m_Z; \\ \frac{z - z_B}{z_B - m_Z}, & \text{если } m_Z \leq z \leq z_B; \\ 0, & \text{если } z > z_B, \end{cases} \quad (5)$$

где  $z = x + y$  – результат измерения контролируемого параметра (КП)  $x$  измерительным трактом (ИТ) с погрешностью  $y$ ;  $z_B$ ,  $z_H$  – верхняя и нижняя границы области принятия решения «годен» соответственно;  $m_Z$  – математическое ожидание результата измерения контролируемого параметра;  $R_Z(t)$  – текущее значение уровня работоспособности.

Используя тот факт, что показатели уровня работоспособности изначально нормированы, для получения обобщенного показателя работоспособности технической системы (ТС) ОК может быть использовано выражение для среднего геометрического взвешенного [12], [13] вида

$$R(t) = \left[ \prod_{i=1}^N (R_{z_i}(t))^{\alpha_i} \right]^{1/N}, \quad (6)$$

где  $N$  – количество контролируемых параметров, входящих в обобщенный показатель работоспособности;  $\alpha_i$  – коэффициент весомости, отражающий степень важности и качества данных, получаемых от соответствующего канала контроля,  $\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$ .

Вычисление значений экспертных оценок – в связи с существенной трудоемкостью и разнообразием методов реализации в статье не рассматривается, однако авторы считают своим долгом рекомендовать метод TOPSIS, представленный в усиленном виде в [14] за счет применения процедур нормализации таблицы оценок по приведенным критериям и оценки чувствительности.

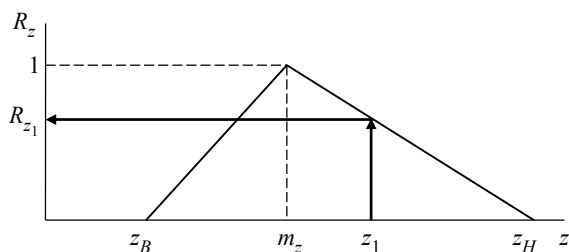


Рис. 1. Графическое определение значения уровня работоспособности одного параметра (составлено авторами)

Fig. 1. Graphical definition of the health level of a single parameter

Выражение (6) отражает современный (хотя и несколько устаревший в век информационных технологий) принцип принятия решения о техническом состоянии ОК при наличии нескольких каналов контроля, постулирующий, что результат контроля «не годен» хотя бы по одному контролируемому параметру приводит к общему результату «не годен». В ходе последующих исследова-

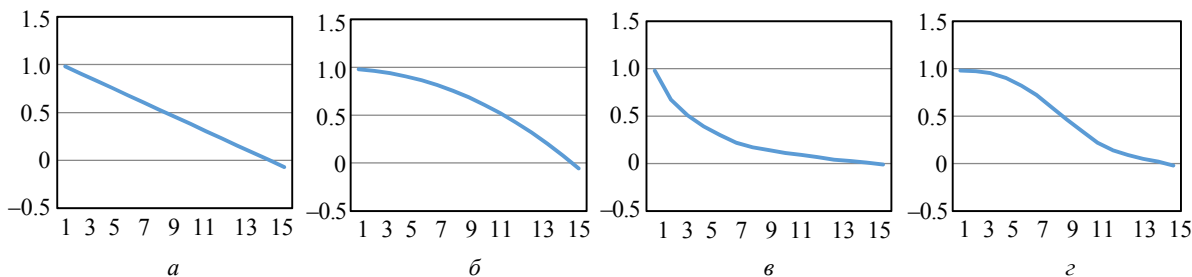


Рис. 2. Характер зависимостей обобщенного показателя уровня работоспособности, где на оси абсцисс отражено количество точек ретроспекции, а на оси ординат значение уровня работоспособности: а – линейная; б – выпуклая; в – вогнутая; г – обратнo-логистическая (составлено авторами)

Fig. 2. The nature of the dependencies of the generalized indicator of the level of performance, where the number of retrospective points is reflected on the abscissa axis, and the value of the level of performance is reflected on the ordinate axis: а – linear; б – convex; в – concave; г – inverse logistic

ний и, соответственно, будущих публикаций, авторы постараются рассмотреть вопросы разработки научно-методического аппарата категорирования ограниченной годности объекта контроля.

**Эксперименты.** Поскольку введение единичного показателя уровня работоспособности технической системы ОК по заданному контролируемому параметру позволяет говорить о возможности цифрового оценивания степени близости значений контролируемых параметров к границам области принятия решения «годен» [15], а обобщенного – к комплексной оценке технического состояния технической системы ОК [16]–[18], наличие ретроспекции результатов контроля позволяет решать задачи прогнозирования ТС в двух постановках:

- определить значение обобщенного показателя работоспособности на начало следующего календарного технического обслуживания (регламента);

- определить период прогнозной работоспособности технической системы ОК без проведения технического обслуживания (предполагаемое время постепенного отказа).

Отсутствие прогнозной информации предполагает рассмотрение максимально широкого спектра траекторий поведения обобщенного показателя уровня работоспособности при сужении периода экстраполяции до одного интервала [19], [20]. Анализ положений теории надежности по вопросам природы и последствий постепенных отказов [21] позволяет ограничить характер зависимостей обобщенного показателя уровня работоспособности классом монотонно убывающих последовательностей значений, внутри которого необходимо выделить линейную (рис. 2, а), выпуклую (рис. 2, б), вогнутую (рис. 2, в), обратнo-логистическую зависимости (рис. 2, г).

В соответствии с требованиями руководящих документов о периодах и сроках проведения регламентных работ для сложных высокоответственных технических систем [20], принято решение ограничиться количеством точек ретроспекции в интервале [5;15]. Естественно предположить, что увеличение временного ряда улучшит качество прогноза, но не отразится на возможности его получения.

Для обоснования возможности получения регрессионной зависимости изменения значения обобщенного показателя уровня работоспособности, а также оценки ее качества был проведен вычислительный эксперимент в математической среде MathCad 15 по значениям коэффициента детерминации и показателю достоверности прогнозирования.

Коэффициент детерминации вычислялся по формуле [21]

$$R^2 = \frac{Q_R}{Q_R + Q_\varepsilon}, \quad (7)$$

где  $Q_R = \sum_{t=1}^n (\bar{Y} - \hat{Y}_t)^2$  – сумма квадратов, которой

обусловлена регрессия;  $Q_\varepsilon = \sum_{t=1}^n \varepsilon_t^2 = \sum_{t=1}^n (\bar{Y} - \hat{Y}_t)^2$  –

остаточная сумма квадратов, которая характеризует отклонение от регрессии,  $n$  – число наблюдений;  $t$  – время;  $Y_t$  – фактические значения исходного ряда (реальные данные);  $\bar{Y}$  – среднее арифметическое значение;  $\hat{Y}_t$  – расчетные значения исходного ряда, соответствующее моменту времени  $t$ ;  $\varepsilon_t$  – остаток ( $Y_t - \hat{Y}_t$ ) в момент времени  $t$ .

Показатель достоверности прогнозирования WAPE [22]

$$WAPE_i = \frac{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |\Phi_i - \Pi_i|}{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Phi_i}, \quad (8)$$

где  $\Phi_i$  – фактическое значение контролируемого параметра;  $\Pi_i$  – прогнозное значение КП;  $k$  – количество измерений контролируемого параметра.

$R^2$  и WAPE наиболее информативно отражают сущность происходящих процессов.

Для проведения эксперимента использовалось максимально возможное количество операторов построения уравнений регрессии в программной среде MathCad 15, сведенных в табл. 1.

Табл. 1. Операторы построения уравнений регрессии (составлено авторами)

Tab. 1. Operators for constructing regression equations

Вид регрессии	Оператор
Линейная среднеквадратичная	line
Полиномиальная 3-й степени, полиномиальная 4-й степени	regress
Экспоненциальная	expfit
Синусоидальная	sinfit
Логарифмическая	logfit
Линейная медиан-медианная	medfit
Двухпараметрическая логарифмическая	lnfit
Регрессия по линейной сумме	linfit
Логистическая	lgsfit
Степенная	pwrfit

Вычислительный эксперимент заключался в реализации следующих этапов.

Этап 1. Формирование исходных последовательностей и их «заморозка».

Этап 2. Последующие этапы заключались в циклическом изменении входных параметров, а именно:

– количества точек ретроспекции от 5 до 15 с шагом 1;

– вида временного ряда – от линейного до обратно-логистического (см. рис. 2);

– вида регрессионной зависимости – от линейной среднеквадратичной до степенной (см. табл. 1) и вычисления параметров качества регрессии по выражениям (7) и (8).

Анализ результатов проведения эксперимента, представляющий собой массив из более 800 ячеек, позволил сделать следующие выводы:

– по результатам проверки работоспособности базовых процедур построения уравнения регрессии исключены логарифмическая и экспоненциальная регрессия, не позволяющие в большинстве информационных ситуаций провести оценку точности уравнения регрессии, а также логистическая регрессия, потребовавшая неоднократного изменения координат начальной точки;

– абсолютным преимуществом по сравнению с остальными регрессионными зависимостями в заданных условиях эксперимента (одна точка экстраполяции, четыре вида кривых) обладает полиномиальная регрессия 4-й степени, обеспечивающая значение коэффициента детерминации  $R^2 > 0.78$  во всех рассматриваемых случаях. Имеющийся недостаток – невозможность построения регрессии по 4 и менее точкам может быть минимизирован путем применения полиномиальной регрессии 3-й степени при 4 точках ретро-

Табл. 2. Обобщение результатов ошибок прогнозирования WAPE для полиномиальной регрессии 4-й степени (составлено авторами)

Tab. 2. Summary of WAPE forecasting errors for 4<sup>th</sup> degree polynomial regression

Характер зависимостей обобщенного показателя уровня работоспособности	Число точек ретроспекции										
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Линейный	0	0.0252	0.0305	0.0414	0.0394	0.0399	0.0442	0.0731	0.0736	0.0825	0.0820
Вогнутый	0	0.0446	0.0522	0.0808	0.0792	0.0812	0.0838	0.1536	0.1583	0.1725	0.1727
Выпуклый	0	0.0220	0.0258	0.0344	0.0319	0.0317	0.0344	0.0565	0.0561	0.0623	0.0617
Обратно-логистический	0	0.0226	0.0261	0.0365	0.0350	0.0354	0.0387	0.0708	0.0730	0.0776	0.0822

спекции, продемонстрировавшей почти такие же результаты коэффициента детерминации, и линейной среднеквадратичной – при 3 точках ретроспекции;

– увеличение точек ретроспекции приводит к постепенному увеличению значения показателя WAPE при несущественном снижении значения коэффициента детерминации, как показано в табл. 2.

**Дискуссия.** Не смотря на то, что выражение (1) имеет несомненное достоинство, позволяющее одним значением описать степень близости контролируемого параметра к границам области работоспособности, а мультипликативным обобщением вида (2) – техническое состояние ОК в целом, оно имеет ограниченное применение, поскольку действительное случайное значение контролируемого параметра в процессе измерения не известно – оно искажается накладываемым на него значением случайной величины результирующей погрешности  $y$  измерительного тракта. По его значению можно сделать лишь некоторое предположение, исходя из результата измерения  $z$ . Данный недостаток «лечится» многократным измерением параметра, переводом измерений в значения уровня работоспособности и последующим нахождением их простого среднего, что существенно снижает «вклад» погрешностей измерения в результат контроля. Действительно, учитывая, что процедура перевода из действительных значений результата измерения в значения уровня работоспособности в соответствии с выражением

(5) линейна, можно предположить, что среднее квадратическое отклонение результирующей погрешности, вносимой в результат измерения элементами измерительного тракта, уменьшится в  $n^{1/2}$  раз [23]–[25].

**Выводы.** Предложенный научно-методический аппарат экспресс-оценки работоспособности сложных высокоответственных технических систем позволяет в сжатые сроки оценить текущее состояние системы и получить прогнозные оценки на заданный период экстраполяции с заданной точностью для всего спектра информационных ситуаций, характерных для системы монотонных гладких трендов, которыми может описываться обобщенный показатель работоспособности.

Результаты вычислительных экспериментов подтверждают сделанные выводы и способствуют концентрации дальнейших усилий в направлении расширения области реализации показателей уровня работоспособности в других областях применения теории автоматизированного контроля, а также:

– в разработке научно-методического аппарата организации технического обслуживания ОК по текущему состоянию, описываемому обобщенным показателем работоспособности, на основе стратегии, формируемой на основе функции чувствительности;

– в разработке научно-методического аппарата категорирования ограниченной годности объекта контроля.

#### Список литературы

1. Применение методов системного анализа для анализа системы транспортировки сжиженного природного газа / Е. В. Посохова, И. М. Новожилов, П. А. Мальцев, Т. В. Кухарова, М. Е. Подкина, А. В. Плотников // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 7. С. 24–38. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-24-38.

2. Петрова Р. М., Грачева Е. И. Оценка параметров надежности схем цехового электроснабжения

горных предприятий с одотрансформаторными подстанциями при различных способах их резервирования // Зап. Горного ин-та. 2026. Т. 277. С. 81–93.

3. Afanaseva O., Pervukhin D., Khatrusov A. Vibration-based condition monitoring of diesel engines in industrial energy applications: A scoping review // Energies. 2025. Vol. 18, no. 21. P. 5717. doi: 10.3390/en18215717.

4. Методы мониторинга технического состояния систем в целях управления их избыточностью. Ч. 2. Классические модели / В. Н. Буков, А. М. Бронников, А. С. Попов, В. А. Шурман // Проблемы управления. 2025. № 3. С. 3–14.
5. Шамолин М. В. Обобщенная задача контроля в задачах диагностики // Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры. 2022. Т. 209. С. 117–126. doi: 10.36535/0233-6723-2022-209-117-126.
6. Буков В. Н., Бронников А. М., Сельвесюк Н. И. Алгоритм локализации отказов бортового комплекса на основе смешанных направленных графов // Проблемы безопасности полетов. 2010. № 2. С. 57–71.
7. Клименко Ю. А., Львович Я. Е., Преображенский А. П. Проектирование контрольно-измерительных компонент распределительных энергетических систем // *Advanced Engin. Research (Rostov-on-Don)*. 2024. Т. 24, № 1. С. 88–97. doi: 10.23947/2687-1653-2024-24-1-88-97.
8. Афанасьев М. П. Исследование двухфазных потоков при испарительном охлаждении воздуха в центробежном компрессоре агрегата наддува ДВС // *Rus. J. of Logistics & Transport Management*. 2021. Т. 6, № 5. С. 22–25.
9. Разработка методов повышения стабильности эксплуатации подземных сооружений / В. Я. Трофимец, Д. Л. Тукаев, Н. А. Таланов, Ю. М. Искандеров // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2024. Т. 17, № 6. С. 35–48. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-35-48.
10. Ильюшин Ю. В., Мартиросян А. В. Анализ импульсных систем автоматического управления // *Современная наука и инновации*. 2025. № 1(49). С. 41–50. doi: 10.37493/2307-910X.2025.1.3.
11. Хиеу В. Д., Файзрахманов Р. А. Методика и алгоритм экспресс оценки состояния сложных технических систем. Конструктивный подход // *Инженерный вестн. Дона*. 2024. № 4(112). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-i-algoritm-ekspress-otsenki-sostoya-niya-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem-konstruktivnyy-podhod> (дата обращения: 05.02.2026).
12. Слесарчук А. В., Плахотникова Е. В. Детализация комплексной оценки качества: влияние выбора средневзвешенного показателя на интерпретацию результатов // *Сб. науч. тр. III науч.-практ. конф. «Стандартизация – траектория науки»*. Информ.-эконом. аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 6(87). С. 259–261.
13. Должанский А. М., Бондаренко О. А., Петлеваный Е. А. Влияние вида средней взвешенной оценки на зависимость комплексного показателя качества от параметров объекта // *Приборы и методы измерений*. 2017. Т. 8, № 4. С. 398–407. doi: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-398-407.
14. Мультикритериальные методы: прикладное применение для принятия решений. Аналит. зап. М.: Департамент исследований и методологии Счетной палаты РФ, 2022. 32 с. URL: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/325/zk9t4c4innu2okui30u330czf05yaqv0.pdf> (дата обращения: 05.02.2026).
15. Жулинский С. Ф., Новиков Е. С., Поспелов В. Я. Статистические методы в современном менеджменте качества. М.: Фонд «Новое тысячелетие», 2001. 208 с.
16. Орлов Э. Г. Оценка технического состояния производственного оборудования в машиностроительной отрасли // *Нац. ассоциация ученых (НАУ)*. 2021. № 74–1. С. 51–53.
17. Гаврилюк Е. А., Манцеров С. А., Синичкин С. Г. Комплексная оценка технического состояния систем автоматического управления газоперекачивающими агрегатами // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 11–10. С. 2141–2145. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35907> (дата обращения: 05.02.2026).
18. Тхориков А. И., Тулин П. К., Третенков И. В. Сравнительный анализ методик оценки сейсмостойкости конструкций крепи подземного сооружения // *Горный информ.-аналит. бюл.* 2023. № 9–1. С. 270–287. doi: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_270.
19. Systematic study of structural divisions of industrial enterprise using queuing systems / V. A. Navatskaya, S. K. Neyrus, M. A. Skorobogatova, M. P. Afanasiev // *J. of Technol. Management and Innovation*. 2023. Vol. 18, no. 3. P. 51–59. doi: 10.4067/s0718-27242023000300051.
20. Алгоритм повышения точности прогнозирования отказов аппаратуры РЭК на основе управления частотой опроса датчиков контроля технического состояния / С. В. Мацеевич, А. В. Тимошенко, А. Ю. Перлов, В. А. Панкратов // *Системы управления, связи и безопасности*. 2024. № 1. С. 26–42. doi: 10.24412/2410-9916-2024-1-026-042.
21. Сидняев Н. И., Уракова К. А. Метод определения периодичности диагностирования космических систем по допустимому уровню вероятности безотказной работы // *Надежность и качество сложных систем*. 2020. № 2(30). С. 47–67. doi: 10.21685/2307-4205-2020-2-7.
22. Яковлев В. Б. Линейное и нелинейное оценивание параметров регрессии в Microsoft Excel // *Вестн. МГПУ. Сер.: Информатика и информатизация образования*. 2019. № 2(48). С. 58–71. doi: 10.25688/2072-9014.2019.48.2.07.
23. Лубенцов А. В., Дурденко В. А. Синтез целевой функции сложной информационной технической системы методом декомпозиции в целях повышения информационной безопасности // *Правовая информатика*. 2025. № 4. С. 54–66. doi: 10.24412/1994-1404-2025-4-54-68.
24. Тедтоев А. Ч., Макарук Р. В., Чистякова Т. Б. Архитектура системы анализа и управления качеством продукции тонких каландрированных материалов на базе нечетких моделей // *Экономика. Информатика*. 2024. Т. 51, № 4. С. 946–962. doi: 10.52575/2687-0932-2024-51-4-946-962.
25. Безюков О. К., Афанасьев П. М. Численное моделирование теплового состояния пенала с отработавшим ядерным топливом при хранении в сухом хранилище камерного типа // *Современная наука и инновации*. 2019. № 1(25). С. 44–55. doi: 10.33236/2307-910X-2019-25-1-44-55.

### Информация об авторах

**Тукеев Дмитрий Леонидович** – д-р техн. наук, профессор кафедры системного анализа и управления, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия, д. 2, ВО, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: [dimleo@inbox.ru](mailto:dimleo@inbox.ru)

<https://orcid.org/0009-0006-8103-9733>

**Зайцев Роман Витальевич** – канд. техн. наук, докторант, Михайловская военная артиллерийская академия МО РФ, ул. Комсомола, 22, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

E-mail: [romanza29@yandex.ru](mailto:romanza29@yandex.ru)

**Первухин Дмитрий Анатольевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры системного анализа и управления, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия, д. 2, ВО, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: [pervukhin\\_da@pers.spmi.ru](mailto:pervukhin_da@pers.spmi.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-3547-2932>

**Афанасьева Ольга Владимировна** – канд. техн. наук, доцент кафедры системного анализа и управления, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия, д. 2, ВО, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: [afanaseva\\_ov@pers.spmi.ru](mailto:afanaseva_ov@pers.spmi.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-3169-4781>

**Новожилов Игорь Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [novozhilovim@list.ru](mailto:novozhilovim@list.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

**Волгина Ольга Сергеевна** – студентка 2-го курса магистратуры, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия, д. 2, ВО, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: [s242553@stud.spmi.ru](mailto:s242553@stud.spmi.ru)

### Вклад авторов:

Тукеев Д. Л. – методология исследования, построение концептуальной и математической модели.

Зайцев Р. В. – экспериментальные исследования.

Первухин Д. А. – разработка и проектирование методологии исследования.

Афанасьева О. В. – применение статистических и вычислительных методов для анализа данных, проверка результатов на достоверность и воспроизводимость.

Новожилов И. М. – общее руководство и координация исследовательской деятельности.

Волгина О. С. – сбор данных, подготовка и создание графиков и других визуальных материалов.

### References

1. *Primenenie metodov sistemnogo analiza dlja analiza sistemy transportirovki szhizhennogo prirodno gaza* / E. V. Posohova, I. M. Novozhilov, P. A. Malcev, T. V. Kuharova, M. E. Podkina, A. V. Plotnikov // *Izv. SPbGETU «ЛЭТИ»*. 2025. Т. 18, № 7. С. 24–38. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-24-38. (In Russ.).

2. Petrova R. M., Gracheva E. I. *Ocenka parametrov nadezhnosti shem sehovogo elektrosnabzhenija gornyh predpriyatij s odnotransformatornymi podstancijami pri razlichnyh sposobah ih rezervirovanija* // *Zap. Gornogo in-ta*. 2026. Т. 277. С. 81–93. (In Russ.).

3. Afanaseva O., Pervukhin D., Khatrusov A. *Vibration-based condition monitoring of diesel engines in industrial*

*energy applications: A scoping review* // *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 21. P. 5717. doi: 10.3390/en18215717.

4. *Metody monitoringa tehničkog sostojanija sistem v celjah upravljenija ih izbytočnostju. Ch. 2. Klasicheskie modeli* / V. N. Bukov, A. M. Bronnikov, A. S. Popov, V. A. Shurman // *Problemy upravljenija*. 2025. № 3. С. 3–14. (In Russ.).

5. Shamolin M. V. *Obobshhennaja zadacha kontrolja v zadachah diagnostiki* // *Itogi nauki i tehniki. Sovremennaja matematika i ee prilozhenija. Tematicheskie obzory*. 2022. Т. 209. С. 117–126. doi: 10.36535/0233-6723-2022-209-117-126. (In Russ.).

6. Bukov V. N., Bronnikov A. M., Selvesjuk N. I. *Algoritm lokalizacii otkazov bortovogo kompleksa na osnove*

smeshannyh napravlennyh grafov // Problemy bezopasnosti poletov. 2010. № 2. S. 57–71. (In Russ.).

7. Klimenko Ju. A., Lvovich Ja. E., Preobrazhenskij A. P. Proektirovanie kontrolno-izmeritelnyh komponent raspredelitelnyh energeticheskikh sistem // Advanced Engin. Research (Rostov-on-Don). 2024. T. 24, № 1. S. 88–97. doi: 10.23947/2687-1653-2024-24-1-88-97. (In Russ.).

8. Afanasev M. P. Issledovanie dvuhfaznyh potokov pri isparitelnom ohlazhdenii vozduha v centrobezhnom kompressore agregata nadduva DVS // Rus. J. of Logistics & Transport Management. 2021. T. 6, № 5. S. 22–25. (In Russ.).

9. Razrabotka metodov povysheniya stabilnosti ekspluatatsii podzemnyh sooruzhenij / V. Ja. Trofimec, D. L. Tukeev, N. A. Talanov, Ju. M. Iskanderov // Izv. SPbGETU «LETI». 2024. T. 17, № 6. S. 35–48. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-35-48. (In Russ.).

10. Iljushin Ju. V., Martirosjan A. V. Analiz impulsnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija // Sovremennaja nauka i innovatsii. 2025. № 1(49). S. 41–50. doi: 10.37493/2307-910X.2025.1.3. (In Russ.).

11. Xieu V. D., Fajzrxmanov R. A. Metodika i algoritm ekspress ocenki sostojanija slozhnyh tehniceskikh sistem. Konstruktivnyj podhod // Inzhenernyj vestn. Dona. 2024. № 4(112). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-i-algoritm-ekspress-otsenki-sostoyaniya-slozhnyh-tehniceskikh-sistem-konstruktivnyj-podhod> (data obrasheniya: 05.02.2026). (In Russ.).

12. Slesarchuk A. V., Plahotnikova E. V. Detalizacija kompleksnoj ocenki kachestva: vlijanie vybora srednevzveshennogo pokazatelja na interpretaciju rezultatov // Sb. nauch. tr. III nauch.-prakt. konf. «Standartizacija – traektorija nauki». Inform.-ekonom. aspekty standartizatsii i tehniceskogo regulirovanija. 2025. № 6(87). S. 259–261. (In Russ.).

13. Dolzhanskij A. M., Bondarenko O. A., Petljovanyj E. A. Vlijanie vida srednej vzveshenoj ocenki na zavisimost kompleksnogo pokazatelja kachestva ot parametrov obekta // Pribory i metody izmerenij. 2017. T. 8, № 4. S. 398–407. doi: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-398-407. (In Russ.).

14. Multikriterialnye metody: prikladnoe primenenie dlja prinjatija reshenij. Analit. zap. M.: Departament issledovanij i metodologii Schetnoj palaty RF, 2022. 32 s. URL: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/325/zk9t4c4innu2okui30u330czf05yaq0.pdf> (data obrasheniya: 05.02.2026). (In Russ.).

15. Zhulinskij S. F., Novikov E. S., Pospelov V. Ja. Statisticheskie metody v sovremennom menedzhmente kachestva. M.: Fond «Novoe tysjacheletie», 2001. 208 s. (In Russ.).

16. Orlov E. G. Ocenka tehniceskogo sostojanija proizvodstvennogo oborudovanija v mashinostroitelnoj

otrasli // Nauch. asociacija uchenyh (NAU). 2021. № 74–1. S. 51–53. (In Russ.).

17. Gavriljuk E. A., Mancеров S. A., Sinichkin S. G. Kompleksnaja ocenka texniceskogo sostojanija sistem avtomaticheskogo upravlenija gazoperekachivajushhimi agregatami // Fundamentalnye issledovanija. 2014. № 11–10. S. 2141–2145. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35907> (data obrasheniya: 05.02.2026). (In Russ.).

18. Thorikov A. I., Tulin P. K., Tretenkov I. V. Sravnitelnyj analiz metodik ocenki sejsmostojkosti konstrukcij krepki podzemnogo sooruzhenija // Gornyj inform.-analit. bjul. 2023. № 9–1. S. 270–287. doi: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_270. (In Russ.).

19. Systematic study of structural divisions of industrial enterprise using queuing systems / V. A. Navatskaya, S. K. Neyrus, M. A. Skorobogatova, M. P. Afanasiev // J. of Technol. Management and Innovation. 2023. Vol. 18, no. 3. P. 51–59. doi: 10.4067/s0718-27242023000300051.

20. Algoritm povysheniya tochnosti prognozirovaniya otkazov apparatury REK na osnove upravlenija chastotaj oprosa datchikov kontrolja tehniceskogo sostojanija / S. V. Maceevich, A. V. Timoshenko, A. Ju. Perlov, V. A. Pankratov // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti. 2024. № 1. S. 26–42. doi: 10.24412/2410-9916-2024-1-026-042. (In Russ.).

21. Sidnjaev N. I., Urakova K. A. Metod opredelenija periodichnosti diagnostirovanija kosmicheskikh sistem po dopustimomu urovnju verojatnosti bezotkaznoj raboty // Nadezhnost i kachestvo slozhnyh sistem. 2020. № 2(30). S. 47–67. doi: 10.21685/2307-4205-2020-2-7. (In Russ.).

22. Jakovlev V. B. Linejnoe i nelinejnoe ocenivanie parametrov regressii v Microsoft Excel // Vestn. MGPU. Ser.: Informatika i informatizacija obrazovanija. 2019. № 2(48). S. 58–71. doi: 10.25688/2072-9014.2019.48.2.07. (In Russ.).

23. Lubencov A. V., Durdenko V. A. Sintez celevoj funkcii slozhnoj informacionnoj texniceskoj sistemy metodom dekompozitsii v celjax povysheniya informacionnoj bezopasnosti // Pravovaja informatika. 2025. № 4. S. 54–66. doi: 10.24412/1994-1404-2025-4-54-68. (In Russ.).

24. Tedtoev A. Ch., Makaruk R. V., Chistjakova T. B. Arhitektura sistemy analiza i upravlenija kachestvom produkcii tonkih kalandrirovannyh materialov na baze nechjotkih modelej // Ekonomika. Informatika. 2024. T. 51, № 4. S. 946–962. doi: 10.52575/2687-0932-2024-51-4-946-962. (In Russ.).

25. Bezyukov O. K., Afanas'ev P. M. Chislennoe modelirovanie teplovogo sostojanija penala s otrabotavshim jadernym toplivom pri hranenii v suhom hranilishhe kamernogo tipa // Sovremennaja nauka i innovatsii. 2019. № 1(25). S. 44–55. doi: 10.33236/2307-910X-2019-25-1-44-55. (In Russ.).

#### Information about the authors

**Dmitry L. Tukeev** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of System Analysis and Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilevsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: [dimleo@inbox.ru](mailto:dimleo@inbox.ru)

<https://orcid.org/0009-0006-8103-9733>

**Roman V. Zaitsev** – Cand. Sci. (Eng.), full-time doctoral student at the Mikhaylovskaya Military Artillery Academy, Komsomol St., 22, Saint Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: romanza29@yandex.ru

**Dmitry A. Pervukhin** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of System Analysis and Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: pervukhin\_da@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3547-2932>

**Olga V. Afanasieva** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of System Analysis and Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: afanaseva\_ov@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3169-4781>

**Igor M. Novozhilov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

**Olga S. Volgina** – second-year master's student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: s242553@stud.spmi.ru

**Author contribution statement:**

Tukeev D. L. – research methodology, development of the conceptual and mathematical model.

Zaitsev R. V. – experimental research.

Pervukhin D. A. – development and design of the research methodology.

Afanasieva O. V. – application of statistical and computational methods for data analysis, verification of results for reliability and reproducibility.

Novozhilov I. M. – general management and coordination of research activities.

Volgina O. S. – data collection, preparation and creation of graphs and other visual materials.

Статья поступила в редакцию 19.02.2026; принята к публикации после рецензирования 02.03.2026; опубликована онлайн 27.04.2026.

Submitted 19.02.2025; accepted 02.03.2026; published online 27.04.2026.

---