

Научная статья

УДК 004.896

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-46-56>

EDN:EUTJYT



## Комплексная модель оценки вероятностно-временных характеристик процессов доставки и обработки данных в системах акустического распознавания

- ✉ Наталья Аркадьевна Верзун, [verzun.n@unecon.ru](mailto:verzun.n@unecon.ru)  
✉ Михаил Олегович Колбанёв, [mokolbanev@mail.ru](mailto:mokolbanev@mail.ru)  
✉ Аделина Рустамовна Салиева, [rustamovna.a3@gmail.com](mailto:rustamovna.a3@gmail.com)

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация

### Аннотация

**Актуальность.** Цифровизация промышленного производства и переход к концепции предиктивного технического обслуживания ставят перед разработчиками систем мониторинга задачу обеспечения высокой точности и своевременности диагностики состояния автономно работающего оборудования. Анализ акустических сигналов, издаваемых оборудованием в процессе функционирования, становится эффективным инструментом неинвазивного контроля. Однако практическое внедрение подобных систем в условиях ограниченных вычислительных и сетевых ресурсов сопряжено с проблемами оценки вероятностно-временных характеристик доставки акустических данных и выбора оптимальных режимов функционирования.

**Цель** исследования состоит в разработке формализованной модели, позволяющей оценивать задержки и вероятность своевременной доставки пакетов акустических данных для выявления аномалий в работе оборудования при различных параметрах архитектуры системы.

**Методы.** Для описания процесса передачи данных предложена двухфазная модель системы массового обслуживания с регулируемым доступом. В работе использованы аналитические методы, включая теорию массового обслуживания, преобразования Лапласа – Стильтjеса, модели пуассоновских потоков.

**Результаты.** Получены выражения для расчета среднего времени доставки и обработки пакетов акустических данных, а также вероятности их своевременной доставки и анализа. Проведена оценка влияния параметров системы на вероятностно-временные характеристики процесса.

**Новизна** заключается во введении параметризованного механизма приоритизации трафика и комплексном моделировании архитектуры системы обработки акустических данных в стохастических условиях. Предложенная модель учитывает специфику промышленного применения и дает возможность прогнозирования поведения системы.

**Теоретическая значимость** определяется расширением математического аппарата анализа процессов передачи и обработки данных на базе теории массового обслуживания и стохастического моделирования.





**Практическая значимость** заключается в возможности применения модели для проектирования и настройки систем мониторинга под конкретные требования объектов критической инфраструктуры.

**Ключевые слова:** неисправности в работе оборудования, доставка и обработка данных в системе акустического распознавания, система массового обслуживания, вероятностно-временные характеристики

**Ссылка для цитирования:** Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Салиева А.Р. Комплексная модель оценки вероятностно-временных характеристик процессов доставки и обработки данных в системах акустического распознавания // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 1. С. 46–56. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-46-56. EDN:EUTJYT

Original research  
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-46-56>  
EDN:EUTJYT

# A Complex Model for Estimating the Probabilistic and Temporal Characteristics of Data Delivery and Processing Processes in Acoustic Recognition Systems

 **Natalia A. Verzun** , [verzun.n@unecon.ru](mailto:verzun.n@unecon.ru)  
 **Mikhail O. Kolbanev**, [mokolbanev@mail.ru](mailto:mokolbanev@mail.ru)  
 **Adelina R. Salieva**, [rustamovna.a3@gmail.com](mailto:rustamovna.a3@gmail.com)

Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI»,  
St. Petersburg, 197022, Russian Federation

## Annotation

**Relevance.** Digitalization of industrial production and the transition to the concept of predictive maintenance pose the challenge for developers of monitoring systems to ensure high accuracy and timeliness of diagnostics of the state of autonomously operating equipment. Acoustic fault detection based on sound signal analysis is becoming an effective tool for non-invasive monitoring. However, the practical implementation of such systems in conditions of limited computing and network resources is associated with the problems of assessing their probability-time characteristics and selecting the best operating modes. The purpose is to develop a formalized model that makes it possible to estimate delays and the probability of timely delivery of acoustic data packets in order to identify anomalies in the operation of equipment under various parameters of the system architecture.

**Methods.** A two-phase model of a queuing system with controlled access is proposed to describe the data transmission process. The paper uses analytical methods, including queuing theory, Laplace – Stieltjes transformations, and Poisson flow models.

**Results.** Expressions are obtained for calculating the average time of delivery and processing of acoustic data packets, as well as the probability of their timely delivery and analysis. The analysis of the influence of the system parameters on the probabilistic-temporal characteristics of the process is carried out.

**The novelty** lies in the introduction of a parameterized traffic prioritization mechanism and complex modeling of the architecture of an acoustic data processing system under stochastic conditions. The proposed model takes into account the specifics of industrial applications and makes it possible to predict the behavior of the system.

**The theoretical significance** is determined by the expansion of the mathematical apparatus for analyzing data transmission and processing processes based on queuing theory and stochastic modeling.

**The practical significance** lies in the possibility of using the model to design and configure monitoring systems to meet the specific requirements of critical infrastructure facilities.

**Keywords:** equipment malfunctions, data delivery and processing in the acoustic recognition system, queuing system, probability-time characteristics

**For citation:** Verzun N.A., Kolbanev M.O., Salieva A.R. A Complex Model for Estimating the Probabilistic and Temporal Characteristics of Data Delivery and Processing Processes in Acoustic Recognition Systems. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(1):46–56. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-46-56. EDN:EUTJYT

## 1. Введение

В условиях цифровизации промышленного производства и активного внедрения концепции

Industry 4.0 особое значение приобретает предиктивная диагностика технических систем. Современное оборудование, функционирующее в авто-

номном режиме, требует непрерывного мониторинга своего состояния, способного обнаруживать отклонения еще до наступления критических отказов. Одним из перспективных подходов является обработка акустических данных неисправностей, основанная на анализе звуковых сигналов, издаваемых оборудованием в процессе эксплуатации. В отличие от традиционных подходов, основанных на вибродиагностике или термографии, акустический контроль позволяет фиксировать широкий спектр аномалий на ранних стадиях, включая кавитационные процессы, износ подшипников, микротрещины и другие дефекты скрытого характера и может применяться в реальном времени. Однако высокая вариативность сигналов, наличие шумов и необходимость быстрого принятия решений требуют использования интеллектуальных алгоритмов обработки, таких, например, как ансамблевые методы машинного обучения и многоагентные системы [1–3].

Несмотря на активное развитие методов анализа акустических данных, остается открытым вопрос оценки эффективности и надежности таких систем с позиций своевременности и корректности обнаружения возникновения неисправностей. Для надежного функционирования системы акустического распознавания (САР) необходимо учитывать влияние параметров сети, обеспечивающей передачу блоков акустических данных между компонентами системы, алгоритмов обработки этих блоков и приоритетов источников данных на итоговое время реакции и вероятность успешной диагностики. В этом контексте актуальной задачей является построение математической модели, позволяющей оценивать вероятностно-времен-

ные характеристики САР неисправностей, выявлять «узкие места» и адаптировать архитектуру под конкретные условия эксплуатации.

Настоящее исследование направлено на комплексное описание САР и оценку вероятностно-временных характеристик процессов доставки и обработки данных, реализуемых в этой системе.

## 2. Физическая структура САР

Предполагается, что САР используется для мониторинга технического состояния сложного автономного технологического объекта, который включает несколько подсистем, являющихся источниками звуков. Например, на нефтехимическом предприятии такими подсистемами могут быть: подшипники, редукторы, насосные агрегаты, сварные швы трубопроводов [4]. Звуковой мониторинг осуществляется при помощи микрофонов, расположенных в непосредственной близости от этих подсистем. В общем случае каждая из них характеризуется звуковыми сигналами, которые указывают на исправность функционирования подсистемы или на возникновение тех или иных неисправностей. Время, в течение которого необходимо зарегистрировать возникновение неисправностей, ограничено и зависит от особенностей соответствующей подсистемы. При этих условиях возникает задача разработки информационной системы, которая должна в реальном масштабе времени реализовать функции по доставке звуковых данных до центра обработки и анализа, и в заданных временных рамках выработать решение о техническом состоянии подсистемы. Физическая архитектура САР представлена на рисунке 1.

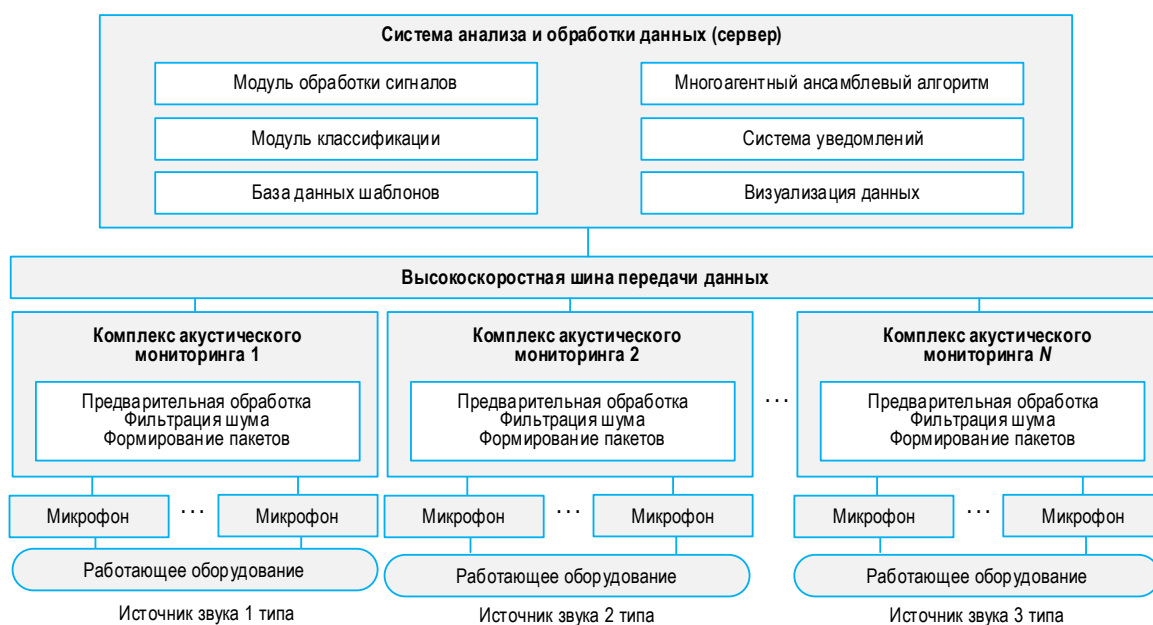


Рис. 1. Физическая архитектура САР

Fig. 1. Physical Architecture of the Acoustic Recognition System

САР представляет собой распределенную систему, включающую:

- подсистему сбора акустических данных, основанную на микрофонных модулях;
- телекоммуникационную инфраструктуру, обеспечивающую передачу данных в реальном времени;
- централизованный вычислительный узел, реализующий алгоритмы анализа, диагностики и принятия решения.

*Первичный сбор акустических данных* происходит с помощью микрофонных сенсоров, объединенных в комплексы акустического мониторинга (КАМ) [5], каждый из которых нацелен на сбор акустических сигналов с одного объекта контроля. Микрофоны реализуют локальную предобработку акустического сигнала: адаптивную фильтрацию; нормализацию амплитуды; сегментацию по акустическим событиям; извлечение признаков, например, коэффициентов MFCC (*аббр. от англ. Mel-Frequency Cepstral Coefficients* – мел-частотные кепстральные коэффициенты).

*Телекоммуникационная инфраструктура.* Для передачи блоков данных от КАМ к серверу используется высокоскоростная телекоммуникационная шина, совместимая с промышленными протоколами (например, EtherCAT) [6].

*Центральный вычислительный узел.* На центральном сервере реализуются модули агрегации, анализа и принятия решений, основанные на многоагентном ансамблевом алгоритме [7, 8]. Сервер обрабатывает потоки данных с различных КАМ и выполняет: декомпозицию и анализ сигналов (спектральный, кепстральный и временной анализ), построение диагностических векторов признаков, классификацию состояния оборудования.

Эффективность функционирования САР в значительной степени определяется ее вероятностно-временными характеристиками, которые должны соответствовать специфическим требованиям промышленного применения. Наиболее важные характеристики: время отклика системы на развивающуюся аномалию, вероятность правильного обнаружения дефекта и вероятность ложного срабатывания. Характеристики обнаружения и распознавания неисправности промышленного оборудования регламентируются в ряде национальных и международных стандартов [9–13]. Например, в ГОСТ Р 55263-2012 [9] устанавливается, что системы защиты должны обеспечивать обнаружение и реагирование на опасные состояния за время не более 1 секунды для быстроразвивающихся аварийных процессов. В ГОСТ ИСО 10816-3-2002 [10] нормируются предельные уровни вибрации насосов, электродвигателей и турбин, превышение которых трактуется как наличие дефекта. ГОСТ Р 57154-2016 [11] вводит понятия риска пропуска опасного состояния и ошибки динамического распознавания, указывая на необходимость выбора

частоты контроля, соответствующей скорости развития неисправности.

### 3. Математическая модель

#### 3.1. Требования к математической модели

Для формализации и количественного анализа процесса обработки акустических данных в диагностических системах представляется целесообразным использование математического аппарата теории массового обслуживания [14]. Данный подход позволяет представить САР в виде системы массового обслуживания (СМО), что открывает возможности для аналитического расчета ее характеристик и оптимизации параметров. САР предназначена для сбора, обработки и анализа акустических данных с множества [15]. Каждый КАМ обеспечивает контроль за работой определенной части оборудования. Особенности КАМ заключаются в количестве микрофонных модулей ( $N_i$  для КАМ  $i$ -го типа), интенсивности генерации пакетов ( $\lambda_i$  для КАМ  $i$ -го типа)  $i = 1 \dots N$ , требованиями к задержкам при передаче и обработке акустических данных. С каждого модуля поступает поток блоков акустических данных (БАД) для доставки серверу.

Предположим, что каждый КАМ представляет собой систему, в которой:

- все передаваемые БАД от микрофонных модулей одного КАМ одинаковой длины;  $k_i, i = 1 \dots N$  – длина передаваемого блока (бит);
- интенсивности поступления БАД одинаковые;  $\lambda_i, i = 1 \dots N$  – интенсивность (пак/с) входного потока заявок от микрофонных модулей одного КАМ в терминах теории СМО; при моделировании будем предполагать, что поступающие потоки – простейшие (или пуассоновские потоки заявок) [16]; это предположение становится реалистичным если информационный поток в КАМ образуется несколькими микрофонами;
- требования к задержкам при передаче и обработки акустических данных для каждого микрофонного модуля одного КАМ одинаковые;  $\overline{T}_{di}, i = 1 \dots N$  – среднее допустимое время передачи, обработки и анализа данных.

#### 3.2. Графическое представление модели САР

Процесс обработки акустических данных может быть представлен в виде двухфазной СМО, графическое изображение которой показано на рисунке 2, где I фаза – доставка блоков акустических данных на обработку серверу; II фаза – обработка и анализ БАД сервером.

Интенсивность поступающего на сервер потока БАД будет определяться следующим образом:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i m_i, i = 1 \dots N. \quad (1)$$

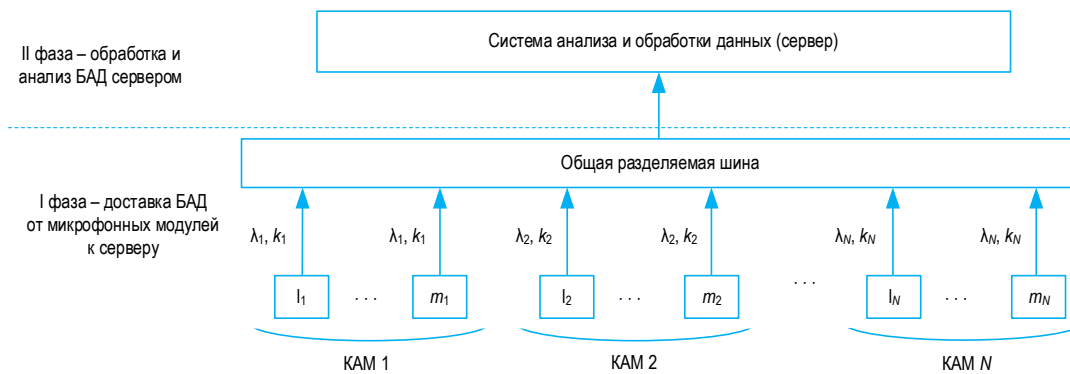


Рис. 2. Графическое представление комплексной модели САР

Fig. 2. Graphical Representation of the Complex Model of the Acoustic Recognition System

### 3.3. Структура математической модели

Математическую модель можно представить с помощью выражения для преобразования Лапласа – Стильтеса (ПЛС) функции распределения времени доставки и обработки БАД:

$$F_i(s) = F_{li}(s)F_{pi}(s), i = 1 \dots N, \quad (2)$$

где  $F_{li}(s)$  – ПЛС функции распределения времени задержки доставки БАД серверу (на I-й фазе);  $F_{pi}(s)$  – ПЛС функции распределения времени обработки БАД сервером (на II-й фазе).

К процессу анализа акустических данных разных КАМ могут предъявляться разные требования к задержкам [17]. На I-й фазе важно так организовать передачу блоков акустических данных, чтобы для микрофонных модулей всех типов КАМ соблюдались эти требования. Поэтому целесообразно использовать регулируемый доступ к каналу передачи, который позволяет назначать разные приоритеты различных КАМ [15]. Регулирование заключается в выделении одним КАМ большего ресурса общей шины, чем другим. А именно: для каждого комплекса задан свой параметр регулирования  $r_i, i = 2 \dots N$ , который «показывает», во сколько раз чаще модули типа  $i$  имеют право доступа к среде передачи, чем модули 1-го типа (таким модулям соответствует самое большое допустимое время задержки). Чем выше значение  $r_i$ , тем чаще (по сравнению с модулями 1 типа) модули соответствующего типа получают доступ к шине для передачи БАД на обработку.

Для упрощения математической записи без потери общности допустим, что в САР используется 2 типа микрофонных модулей ( $N=2$ ) и совокупность модулей 1-го типа образует КАМ 1, а 2-го – КАМ 2. Причем  $\overline{T_{д1}} > \overline{T_{д2}}$ . Соответственно, необходимо задавать  $r_2$ , который будет определять, на сколько чаще модули КАМ 2 будут получать право на передачу БАД, чем модули КАМ 1.

Математическую модель подобной САР можно представить аналитически.

#### I фаза

Математическая модель может быть представлена СМО M/G/1 (система с пуассоновским входным потоком заявок, произвольным распределением времени обслуживания и одним обслуживающим прибором) [18, 19]. Для подобной системы известно уравнение Поляничка – Хинчина для ПЛС [14] функции распределения времени ожидания.

Для КАМ каждого типа можно записать в виде:

$$F_{pi}(s) = \frac{s(1 - \rho_i)}{s - \lambda_i + \lambda_i D_i(s)}, i = \overline{1, 2}, \quad (3)$$

где  $s$  – параметр ПЛС;  $\rho_i$  – вероятность занятости буфера передачи микрофонного модуля для  $i$ -го КАМ;  $\lambda_i$  – интенсивность поступления блоков  $i$ -го типа;  $D_i(s)$  – ПЛС времени обслуживания пакетов на I-й фазе для режима прямой передачи (без переспросов) можно представить в следующем виде:

для модулей 1 типа

$$D_1(s) = e^{-s(r_2 T_{ок2} m_2 + T_{ок1} m_1)}, \quad (4)$$

для модулей 2 типа

$$D_2(s) = e^{-s(T_{ок2} m_2 + (T_{ок1} m_1)/r_2)}. \quad (5)$$

Вероятность занятости буфера (загрузка) определяется согласно выражениям:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \lambda_1 (r_2 T_{ок2} m_2 + T_{ок1} m_1), \\ \rho_2 &= \lambda_2 (T_{ок2} m_2 + (T_{ок1} m_1)/r_2). \end{aligned} \quad (6)$$

где  $T_{ок1}$  и  $T_{ок2}$  – временные окна доступа к шине для каждого типа модуля (с).

Предположим:

$$T_{окi} = \frac{k_i}{V_{ш}}, i = \overline{1, 2}, \quad (7)$$

где  $V_{ш}$  – скорость передачи бит в шине (бит/с).

Условие эргодичности системы на I-й фазе:

$$\rho_i < 1, i = \overline{1, 2}. \quad (8)$$

II фаза

Фазу обработки и анализа БАД сервером будем представлять СМО М/М/1 (система с пуассоновским входным потоком, экспоненциальным распределением времени обслуживания и одним обслуживающим прибором) [20]. Предположим, что обработка и анализ БАД 1-го и 2-го типа осуществляется в одном режиме. На вход сервера поступают для обслуживания (обработка и анализ) после I-й фазы потоки блоков данных от микрофонных модулей КАМ 1 и КАМ 2 – это пуассоновские потоки с интенсивностями  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  соответственно.

Значит, суммарный поток БАД от всех модулей тоже будет пуассоновским (по теореме о сложении пуассоновских потоков) и его интенсивность задается выражением:

$$\Lambda = m_1\lambda_1 + m_2\lambda_2. \tag{9}$$

Для системы М/М/1 время обработки и анализа пакетов подчиняется экспоненциальному распределению [21]. ПЛС функции распределения времени обработки акустических данных и 1-го и 2-го типа сервером будет иметь вид:

$$F_{II}(s) = \frac{A}{s + A}, \tag{10}$$

$$A = (1 - \beta) \cdot \mu, \quad \beta = \frac{\Lambda}{\mu}, \quad \rho_i < 1, \quad i = \overline{1, 2}.$$

где  $\mu$  – параметр работы сервера, интенсивность обработки сервером БАД (количество блоков, обрабатываемых за единицу времени).

Условие эргодичности системы на II-й фазе:  $\beta < 1$ .

**3.4. Метод расчета вероятностно-временных характеристик**

Рассмотрим две характеристики – среднее время, затрачиваемое на обработку, и вероятность успешной своевременной обработки одного БАД.

Среднее время [22], затрачиваемое на обработку одного блока: для двухфазной САР можно написать, что время, затрачиваемое на обработку акустических данных состояния оборудования, определяется как сумма  $t_{iI}$  – времени доставки БАД до сервера (I фаза) и  $t_{iII}$  – времени обработки и анализа блока (II фаза):

$$\overline{t_{APi}} = \overline{t_{iI}} + \overline{t_{iII}}, \quad i = \overline{1, 2}. \tag{11}$$

где  $\overline{t_{iI}}, \overline{t_{iII}}$  – среднее время обработки БАД сервером (на II-й фазе) и среднее время задержки доставки БАД серверу (на I-й фазе) соответственно:

$$\overline{t_{iI}} = - \left. \frac{d[F_{I1}(s) \cdot D_i(s)]}{ds} \right|_{s=0}, \quad i = \overline{1, 2}, \tag{12}$$

$$\overline{t_{iII}} = 1/A, \tag{13}$$

где  $F_{I1}(s)$  – ПЛС функции распределения времени ожидания (3);  $D_i(s)$  – ПЛС функции распределения времени непосредственно передачи (4, 5).

*Вероятность своевременной доставки, обработки и анализа акустических данных*

Рассматривается случай стохастического ограничения на допустимое время обработки для обеих фаз. Обозначим через  $\overline{T_{д1}}, \overline{T_{д2}}$  – средние допустимые времена доставки и обработки БАД 1-го и 2-го типа,  $\overline{T_{д11}}, \overline{T_{д12}}$  – средние допустимые времена доставки БАД 1-го и 2-го типа на I-й фазе;  $\overline{T_{дII}}$  – среднее допустимое время обработки и анализа БАД 1-го и 2-го типа на II-й фазе соответственно.

Тогда ПЛС комплексного процесса доставки и обработки данных в САР имеет вид:

$$P_i(s) = F_{iI}(s) \cdot D_i(s) \cdot F_{iII}(s), \quad i = \overline{1, 2}.$$

Производные  $P_i(s)$  при  $s = 0$  дают моменты этого процесса, а при  $s = 1 / \overline{T_{дi}}$  – вероятность своевременной доставки, что справедливо и для отдельных фаз комплексного процесса.

Вероятность своевременной доставки, обработки и анализа БАД 1-го и 2-го типа вычисляется как:

$$P_i = F_{iI}(s) \cdot D_i(s) \cdot F_{iII}(s)|_{s=1/\overline{T_{дi}}}, \quad i = \overline{1, 2}. \tag{14}$$

Вероятность своевременной доставки блока  $i$ -го типа серверу (на I-й фазе) определяется из выражения:

$$P_{iI} = F_{iI}(s) \cdot D_i(s)|_{s=1/\overline{T_{дiI}}}, \quad i = \overline{1, 2}. \tag{15}$$

Вероятность своевременной обработки и анализа БАД сервером (на II-й фазе) определяется из выражения:

$$P_{iII} = F_{iII}(s)|_{s=1/\overline{T_{дiII}}}. \tag{16}$$

где  $F_{iII}(s)$  – ПЛС функции распределения времени обработки блока сервером (10).

Окончательные выражения для расчета среднего времени доставки и обработки акустических данных 1-го и 2-го типа с учетом (3-13) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \overline{t_{AP1}} &= (r_2 T_{ок2} m_2 + T_{ок1} m_1) \left( \frac{\rho_1}{2(1 - \rho_1)} \right) + \frac{1}{A}, \\ \overline{t_{AP2}} &= \left( r_2 T_{ок2} m_2 + \frac{T_{ок1} m_1}{r_2} \right) \left( \frac{\rho_1}{2(1 - \rho_1)} \right) + \frac{1}{A}, \end{aligned} \tag{17}$$

где вероятности занятости буфера микрофонного модуля определяются согласно выражению:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \lambda_1 (r_2 T_{ок2} m_2 + T_{ок1} m_1), \\ \rho_2 &= \lambda_2 \left( T_{ок2} m_2 + \frac{T_{ок1} m_1}{r_2} \right). \end{aligned} \tag{18}$$

Окончательные выражения для расчета вероятностей своевременной доставки и обработки акустических данных 1-го и 2-го типа с учетом (3–10) и (14–16) будут иметь ниже представленный вид.

Вероятность своевременной доставки, обработки и анализа БАД 1-го и 2-го типа – из (14):

$$P_i = F_{ii} \left( \frac{1}{T_{di}} \right) \cdot D_i \left( \frac{1}{T_{di}} \right) \cdot F_{ii} \left( \frac{1}{T_{di}} \right), i = \overline{1,2}. \quad (19)$$

Для БАД 1-го типа (КАМ 1):

$$P_1 = \frac{\frac{1}{T_{d1}} (1 - \rho_1)}{\frac{1}{T_{d1}} - \lambda_1 + \lambda_1 e^{\left( -\frac{r_2 T_{ок2} m_2 + T_{ок1} m_1}{T_{d1}} \right)}} \times e^{\left( -\frac{r_2 T_{ок2} m_2 + T_{ок1} m_1}{T_{d1}} \right)} \cdot \frac{\mu(1 - \beta)}{\frac{1}{T_{d1}} + \mu(1 - \beta)}. \quad (20)$$

Для БАД 2-го типа (КАМ 2):

$$P_2 = \frac{\frac{1}{T_{d2}} (1 - \rho_2)}{\frac{1}{T_{d2}} - \lambda_2 + \lambda_2 e^{\left( -\frac{r_2 T_{ок2} m_2 + T_{ок1} m_1}{T_{d2}} \right)}} \times e^{\left( -\frac{r_2 T_{ок2} m_2 + T_{ок1} m_1}{T_{d2}} \right)} \cdot \frac{\mu(1 - \beta)}{\frac{1}{T_{d2}} + \mu(1 - \beta)}. \quad (21)$$

Вероятность своевременной доставки блоков 1-го и 2-го типа серверу (на I-й фазе) определяется из формулы (15):

$$P_{ii} = F_{ii} \left( \frac{1}{T_{di}} \right) \cdot D_i \left( \frac{1}{T_{di}} \right), i = \overline{1,2}. \quad (22)$$

Для БАД 1-го типа:

$$P_1 = \frac{\frac{1}{T_{d1}} (1 - \rho_1)}{\frac{1}{T_{d1}} - \lambda_1 + \lambda_1 e^{\left( -\frac{r_2 T_{ок2} m_2 + T_{ок1} m_1}{T_{d1}} \right)}} \times e^{\left( -\frac{r_2 T_{ок2} m_2 + T_{ок1} m_1}{T_{d1}} \right)}. \quad (23)$$

Для БАД 2-го типа:

$$P_2 = \frac{\frac{1}{T_{d2}} (1 - \rho_2)}{\frac{1}{T_{d2}} - \lambda_2 + \lambda_2 e^{\left( -\frac{r_2 T_{ок2} m_2 + T_{ок1} m_1}{T_{d2}} \right)}} \times e^{\left( -\frac{r_2 T_{ок2} m_2 + T_{ок1} m_1}{T_{d2}} \right)}. \quad (24)$$

Вероятность своевременной обработки и анализа блока акустических данных сервером (на II-й фазе) определяется из выражения (16):

$$P_{ii} = \frac{\mu(1 - \beta) T_{d1}}{1 + \mu(1 - \beta) T_{d1}}. \quad (25)$$

#### 4. Расчет и анализ временно-вероятностных характеристик

Ранее, в [23], выполнялась опробация разработанного для CAP алгоритма акустического распознавания нарушений работоспособности автономного технологического оборудования. Проводилась оценка показателей эффективности распознавания неисправностей для различных типов оборудования и нарушений: точность, полнота, F1-мера и уровень ложных срабатываний [24]. В данной работе, в рамках дальнейших исследований возможностей применения CAP для решения задач акустического распознавания в промышленных системах, проводится численный анализ зависимости вероятностно-временных характеристик процесса доставки и обработки акустических данных от параметра регулирования доступом с целью выбора рациональных режимов функционирования системы. В качестве метрик процесса были выбраны: 1) среднее время обработки одного БАД 1-го и 2-го типа –  $\overline{t_{AP1}}$  и  $\overline{t_{AP2}}$ , представляющее собой сумму временных задержек на фазах передачи и анализа блока данных (17), и 2) вероятность своевременной обработки в CAP БАД 1-го и 2-го типа –  $P_1$  и  $P_2$ , определяемая как вероятность времени доставки, обработки и анализа акустических данных в допустимый порог  $\overline{T_{d1}}, \overline{T_{d2}}$  для соответствующего типа оборудования (19).

Проведенный анализ ориентирован на исследование чувствительности характеристик системы к варьированию:

- параметра регулирования доступом к каналу передачи  $r_2$  (коэффициент, определяющий относительный приоритет обработки блоков от модулей второго типа по сравнению с первым; этот параметр позволяет балансировать распределение ресурсов между задачами различной важности и критичности, влияя на характеристики задержек и вероятность своевременной обработки;
- интенсивности входного потока заявок  $\lambda_1, \lambda_2$  (характеризует частоту генерации диагностических событий от соответствующих классов модулей); рост интенсивности приводит к увеличению очередей и времен ожидания, особенно в условиях ограниченной вычислительной и транспортной мощности.

Исходные данные для расчета характеристик представлены в таблице 1. Допустимое время обработки акустических данных КАМ выбрано в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 55263-2012 [9].

Параметр  $r_2$  регулирует относительный приоритет обработки БАД второго класса по сравнению с первым. На рисунке 3 представлены зави-

симости метрик акустического распознавания от этого параметра. На рисунке 3а – зависимость вероятности своевременной обработки акустических данных 2-го типа от интенсивности потока БАД 2-го типа при различных значениях параметра регулирования. Реализация механизма приоритизации обеспечивает высокую вероятность (0,9–0,98) своевременной обработки блоков данных КАМ 2 в широком диапазоне интенсивности потока акустических данных, что необходимо для оборудования (узлов, агрегатов), требующим быстрого распознавания аномалий функционирования. Особенно важно отметить, что высокая вероятность сохраняется даже при значительном увеличении нагрузки, что подтверждает эффективность выбранного подхода к управлению доступом к среде передачи для критически важных систем.

На рисунке 3б показана зависимость вероятности своевременной обработки акустических данных 1-го типа от интенсивности потока БАД 1-го типа при различных значениях параметра регулирования. Применение алгоритмов регулирования доступа обеспечивает сохранение высокой вероятности (0,85–0,95) своевременной обработки пакетов КАМ 1 в широком диапазоне нагрузок. Это свидетельствует о том, что система сохраняет ра-

ботоспособность даже при повышенных нагрузках, что критично для непрерывного мониторинга состояния оборудования. Резкое падение вероятности при приближении к пределу условия эргодичности системы сигнализирует о необходимости точного расчета допустимых нагрузок.

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные для расчета вероятностно-временных характеристик

TABLE 1. Initial Data for the Calculation of Probabilistic-Temporal Characteristics

Параметр	Диапазон значений	Единица измерения
$\lambda_1$ – интенсивность потока КАМ 1	500–2600	пакетов/с
$\lambda_2$ – интенсивность потока КАМ 2	200–1000	пакетов/с
$N_1$ – количество модулей КАМ 1	4	шт.
$N_2$ – количество модулей КАМ 2	4	шт.
$r_2$ – параметр регулирования	1, 2, 3, 5	–
$\mu$ – производительность сервера	150,0	пакетов/с
$k_1$ – длина пакета КАМ 1	4096	бит
$k_2$ – длина пакета КАМ 2	1024	бит
$V_{ш}$ – скорость шины	10e6	бит/с
$\overline{T}_{д1}$ – допустимое время обработки КАМ 1	0,2	с
$\overline{T}_{д2}$ – допустимое время обработки КАМ 2	0,15	с

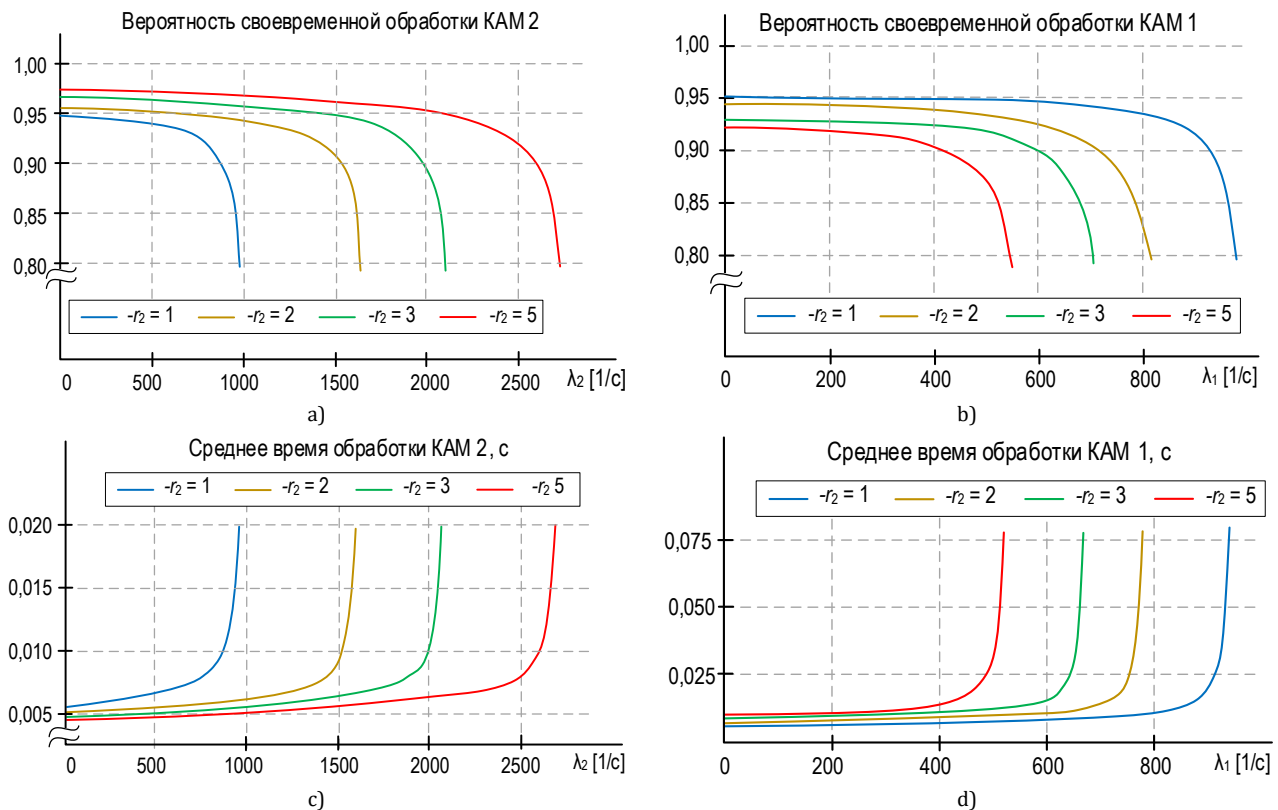


Рис. 3. Влияние параметра регулирования  $r_2$  на вероятность своевременной обработки акустических данных 2-го (а) и 1-го (б) типа, а также на среднее время обработки акустических данных 2-го (с) и 1-го (д) типа

Fig. 3. The Effect of the Control Parameter  $r_2$  on the Probability of Timely Processing of Acoustic Data of Type 2 (a) and Type 1 (b) and also The Effect on the Average Processing Time of Acoustic Data of Type 2 (c) and Type 1 (d)

На рисунке 3с показана зависимость среднего времени обработки акустических данных 2-го типа от интенсивности потока БАД 2-го типа при различных значениях параметра регулирования. Для КАМ 2, отвечающего за критически важные функции безопасности, введение приоритизации позволяет удерживать время обработки на исключительно низком уровне. Это важно для систем аварийного останова и других функций безопасности, где задержки недопустимы. Резкий рост времени обработки при приближении к предельным нагрузкам демонстрирует необходимость строгого контроля за нагрузкой на этот канал.

На рисунке 3д показана зависимость среднего времени обработки акустических данных 1-го типа от интенсивности потока БАД 1-го типа при различных значениях параметра регулирования. Введение процедуры регулирования доступа к среде передачи на первом этапе – доставки БАД серверу – позволяет поддерживать время их обработки КАМ 1 в пределах допустимого значения 0,2 с даже при возрастании нагрузки. Это особенно важно для систем мониторинга, где критична своевременная, но не обязательно мгновенная обработка данных. При приближении к пределу эргодичности время обработки стремительно возрастает, что подтверждает необходимость введения механизмов приоритизации.

Выводы по результатам анализа влияния процедуры регулирования вероятностно-временными характеристиками:

1) увеличение  $r_2$  оказывает противоположное влияние на характеристики обработки двух типов данных;

2) для КАМ 1: рост  $r_2$  приводит к увеличению времени доставки и обработки, а также снижению вероятности своевременного обслуживания;

3) для КАМ 2: напротив, повышается своевременность обслуживания, так как БАД 2-го типа

получают преимущество при распределении ресурсов канала передачи;

4) изменение значения параметра регулирования позволяет выбирать рациональные режимы функционирования САР и гарантировать соблюдение заданных ограничений на время обработки акустических данных от разнотипного оборудования.

## 5. Заключение

В работе предложена комплексная математическая модель оценки вероятностно-временных характеристик процессов доставки и обработки данных в системах акустического распознавания неисправностей в работе промышленного оборудования. Система реализует концепцию предиктивного мониторинга на основе анализа шумовых и вибрационных сигналов, генерируемых рабочими узлами оборудования в процессе эксплуатации. Рассмотрена физическая структура САР и описаны ее компоненты.

Для представления процесса доставки и обработки акустических данных в САР предложена двухфазная модель СМО с регулируемым доступом и разработаны методы расчета среднего времени и вероятности своевременной доставки и обработки акустических данных. Полученные выражения позволяют оценить влияние параметров САР на вероятностно-временные характеристики процесса. В частности, проводился численный расчет и анализ влияния параметра регулирования доступа на этапе доставки БАД в САР на вероятностно-временные характеристики процесса доставки и обработки акустических данных. Выявлено, что параметр регулирования доступа может служить эффективным инструментом адаптивного управления ресурсами системы и балансировки обработки трафика акустических данных различного типа в условиях ограниченной вычислительной мощности.

## Список источников

1. Верзун Н. А., Колбанев М. О., Салиева А. Р. Многоагентный ансамблевый алгоритм акустического распознавания нарушений работоспособности автономного технологического оборудования // Информационно-управляющие системы. 2025. Т. 3. С. 14–24. DOI:10.31799/1684-8853-2025-3-14-24. EDN:VHOSZZ
2. Салиева А.Р., Колбанёв М.О., Верзун Н.А. Многоагентная ансамблевая программа акустического распознавания нарушений работоспособности автономного технологического оборудования (МААР). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2025662662 от 13.05.2025. Оpubл. 22.05.2025. EDN:CQDGCH
3. Салиева А.Р., Верзун Н.А., Колбанев М.О. Оптимизация стратегии в алгоритмах обучения с подкреплением в логистических системах принятия решений // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2025. Т. 17. № 3. С. 65–77. DOI:10.32603/2071-8985-2025-18-3-65-77. EDN:BSRJMX
4. Nasir W., Banaras F. Real-Time IoT-Based Monitoring of Mechanical Systems Using Acoustic and Vibration Data. 2025. DOI:10.13140/RG.2.2.26261.64487
5. Liu T., Mao Y., Dou H., Zhang W., Yang J., Wu P., et al. Emerging Wearable Acoustic Sensing Technologies // Advanced Science. 2025. Vol. 12. Iss. 6. DOI:10.1002/advs.202408653
6. Orel D., Varol A. Noise-Robust Automatic Speech Recognition for Industrial and Urban Environments // Proceedings of the 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON, Singapore, Singapore, 16–19 October 2023). IEEE, 2023. DOI:10.1109/IECON51785.2023.10312708
7. Bauer W., Baranowski J. Comparison of Deep Recurrent Neural Networks and Bayesian Neural Networks for Detecting Electric Motor Damage Through Sound Signal Analysis // arXiv:2502.10224. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2502.10224

8. Shi S., Zong Q. Benchmarking Machine Learning Methods for Distributed Acoustic Sensing// arXiv:2503.20681v1. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2503.20681
9. ГОСТ Р 55263-2012. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. М.: Стандартинформ, 2014.
10. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. М.: Стандартинформ, 2007.
11. ГОСТ Р 57154-2016. Техническая диагностика. Мониторинг тепломеханического оборудования АЭС. Расчетно-экспериментальный метод. М.: Стандартинформ, 2016.
12. ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. М.: Стандартинформ, 2019.
13. ГОСТ Р 53564-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. М.: Стандартинформ, 2019.
14. Вишнеvский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003. 512 с.
15. Верзун Н.А., Колбанев М.О., Коршунов И.Л., Микадзе С.Ю. Основы моделирования информационных систем множественного доступа. СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет. 2015. 138 с. EDN:XWWFYN
16. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
17. Заяц О.И., Корневская М.М., Ильяшенко А.С., Мулюха В.А. Система массового обслуживания с абсолютным приоритетом, вероятностным выталкивающим механизмом и повторными заявками // Информатика и автоматизация. 2024. Т. 23. № 2. С. 325–351. DOI:10.15622/ia.23.2.1. EDN:KXQKLM
18. Lin Y.-B., Liu T.-H., Tsai Y.-C., Chang F.-M. Waiting Time Control Chart for M/G/1 Retrial Queue // Computation. 2024. Vol. 12. Iss. 9. P. 191. DOI:10.3390/computation12090191. EDN:TSVIHT
19. Kim K. Delay cycle analysis of finite-buffer M/G/1 queues and its application to the analysis of M/G/1 priority queues with finite and infinite buffers // Performance Evaluation. 2020. Vol. 143. P. 102133. DOI:10.1016/j.peva.2020.102133. EDN:HHSEXX
20. Захарикова Е.Б. Математические модели сетей массового обслуживания в виде «Вход-состояние-выход» // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. 2012. № 6. С. 188–192. EDN:PJBLBR
21. Фунг В.К., Богатырев В.А., Кармановский Н.С., Лэ В.Х. Оценка вероятностно-временных характеристик компьютерной системы с контейнерной виртуализацией // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. № 2. С. 249–255. DOI:10.17586/2226-1494-2024-24-2-249-255. EDN:NSGEMF
22. Петров М.Н., Поддубецкий М.А. Вероятностно-временные характеристики однолинейных систем массового обслуживания при экспоненциальном распределении времени обслуживания и входном потоке с бета-распределением // Успехи современного естествознания. 2007. № 12. С. 104–105. EDN:JJLYNJ
23. Verzun N.A., Kolbanev M.O., Salieva A.R., Egorov K.N. Changes in the Technological Process of Equipment Condition Monitoring with the Implementation of Acoustic Recognition System // Proceedings of the VIth International Scientific Conference on Neural Networks and Neurotechnologies (NeuroNT, St. Petersburg, Russian Federation, 20–20 June 2025). IEEE, 2025. DOI:10.1109/NeuroNT66873.2025.11049965
24. Михайличенко А.А. Аналитический обзор методов оценки качества алгоритмов классификации в задачах машинного обучения // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки. 2022. № 4(311). С. 52–59. DOI:10.53598/2410-3225-2022-4-311-52-59. EDN:FVSMBM

## References

1. Verzun N.A., Kolbanev M.O., Salieva A.R. Multi-agent ensemble algorithm for acoustic recognition of malfunctions of autonomous technological equipment. *Information and Control Systems*. 2025;3:14–24. (in Russ) DOI:10.31799/1684-8853-2025-3-14-24. EDN:VHOSZZ
2. Salieva A.R., Kolbanev M.O., Verzun N.A. *Multi-Agent Ensemble Program for Acoustic Recognition of Malfunctions of Autonomous Technological Equipment*. Patent RF, no. 2025662662, 05.22.2025. (in Russ) EDN:CQDGCH
3. Salieva A.R., Verzun N.A., Kolbanev M.O. Optimization of strategy in reinforcement learning algorithms in logistic decision-making systems. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2025;17-3:65–77. (in Russ) DOI:10.32603/2071-8985-2025-18-3-65-77. EDN:BSRJMX
4. Nasir U., Banaras F. *Monitoring of mechanical systems based on the Internet of Things in real time using acoustic and vibration data*. 2025. DOI:10.13140/RG.2.2.26261.64487
5. Liu T., Mao Y., Dou H., Zhang W., Yang J., Wu P., et al. Emerging Wearable Acoustic Sensing Technologies. *Advanced Science*. 2025;12(6). DOI:10.1002/advs.202408653
6. Orel D., Varol A. Noise-Resistant Automatic Speech Recognition for Industrial and Urban Environments. *Proceedings of the 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON, 16–19 October 2023, Singapore, Singapore*. IEEE; 2023. DOI:10.1109/IECON51785.2023.10312708
7. Bauer W., Baranovsky J. Comparison of Deep Recurrent Neural Networks and Bayesian Neural Networks for Detecting Electric Motor Damage Through Sound Signal Analysis. *arXiv:2502.10224*. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2502.10224
8. Shi S., Zong Q. Benchmarking Machine Learning Methods for Distributed Acoustic Sensing. *arXiv:2503.20681v1*. 2025. DOI:10.48550/arXiv.2503.20681
9. ГОСТ Р 55263-2012. *Mechanical Vibration. Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Rotating Shafts*. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (in Russ.)
10. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. *Mechanical Vibration. Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts*. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (in Russ.)


11. GOST R 57154-2016. *Technical Diagnostics. Monitoring of Mechanical and Heat NPP Equipment. Calculation Experimental Method*. Moscow: Standartinform Publ.; 2016. (in Russ.)
12. GOST R ISO 13379-1-2015. *Condition Monitoring and Diagnostics of Machines. Data Interpretation and Diagnostics Techniques*. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (in Russ.)
13. GOST R 53564-2009. *Condition Monitoring and Diagnostics of Machines. Hazardous Equipment Monitoring*. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (in Russ.)
14. Vishnevsky V.M. *Theoretical Foundations of Computer Network Design*. Moscow: Technosphere Publ.; 2003. 512 p. (in Russ.)
15. Verzun N.A., Kolbanev M.O., Korshunov I.L., Mikadze S.Yu. *Fundamentals of modeling information systems of multiple access*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Economics Publ.; 2015. 138 p. (in Russ.) EDN: XWWFYN
16. Kleinrock L. *Queueing Theory*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1979. 432 p. (in Russ.)
17. Zayats O., Korenevskaya M., Ilyashenko A., Mulyukha V. Prioritized Retrial Queueing Systems with Randomized Push-Out Mechanism. *Informatics and Automation*. 2024;23(2):325–351. (in Russ) DOI: 10.15622/ia.23.2.1. EDN: KXQKLM
18. Lin Yu.-B., Liu T.-H., Yu Tsai.-S., Chang F.-M. Queue waiting time monitoring scheme for repeated review M/G/1. *Calculations*. 2024;12(9):191. DOI:10.3390/computation12090191. EDN: TSVIHT
19. Kim K. Delay cycle analysis of finite-buffer M/G/1 queues and its application to the analysis of M/G/1 priority queues with finite and infinite buffers. *Performance Evaluation*. 2020;143:102133. DOI:10.1016/j.peva.2020.102133. EDN: HHSEX
20. Zakharikova E.B. Symbolic-form models of queuing net in the form of “input – state – output”. *Economics, Statistics, and Computer Science. Bulletin of the UMO*. 2012;6:188–192. (in Russ) EDN: PJBLBR
21. Phung V.Q., Bogatyrev V.F., Karmanovskiy N.S., Le V.H. Evaluation of probabilistic temporal characteristics of a computer system with container virtualization. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2024;24(2):249–255. (in Russ) DOI:10.17586/2226-1494-2024-24-2-249-255. EDN: NSGEMF
22. Petrov M.N., Poddubetsky M.A. Probabilistic and Temporal Characteristics of Single-Line Queueing Systems with Exponential Distribution of Service Time and Input Flow with Beta Distribution. *Advances in current natural sciences*. 2007;12(1):120–121. (in Russ) EDN: IJLYNJ
23. Verzun N.A., Kolbanev M.O., Salieva A.R., Egorov K.N. Changes in the Technological Process of Equipment Condition Monitoring with the Implementation of Acoustic Recognition System. Proceedings of the VIth International Scientific Conference on Neural Networks and Neurotechnologies, NeuroNT, 20–20 June 2025, St. Petersburg, Russian Federation. IEEE; 2025. DOI:10.1109/NeuroNT66873.2025.11049965
25. Mikhaylichenko A.A. Analytical review of methods for assessing the quality of classification algorithms. *The Bulletin of the Adygea State University, the series “Natural-Mathematical and Technical Sciences”*. 2022;4(311):52–59. (in Russ) DOI:10.53598/2410-3225-2022-4-311-52-59. EDN: FVSBMB

Статья поступила в редакцию 08.10.2025; одобрена после рецензирования 08.01.2026; принята к публикации 06.02.2026.


The article was submitted 08.10.2025; approved after reviewing 08.01.2026; accepted for publication 06.02.2026.

## Информация об авторах:


**ВЕРЗУН  
Наталья Аркадьевна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные системы» Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
 <https://orcid.org/0000-0002-0126-2358>

**КОЛБАНЁВ  
Михаил Олегович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы» Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
 <https://orcid.org/0000-0003-4825-6972>

**САЛИЕВА  
Аделина Рустамовна**

аспирант кафедры «Информационные системы» Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
 <https://orcid.org/0009-0001-9519-5773>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.