

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

## DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 629.7.017.1; 621.865.8

doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-10

### ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОАППАРАТУРЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

А. В. Заяра<sup>1</sup>, В. П. Фандеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Военный инновационный технополис «Эра», Анапа, Россия

<sup>2</sup> Филиал Военной академии материально-технического обеспечения  
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия

<sup>1</sup>zaw1966@mail.ru, <sup>2</sup>fandvladpetr@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цель.* Современные мобильные робототехнические комплексы оснащаются сложной электроаппаратурой, которая служит причиной для более половины отказов, обусловленных деградационными процессами. Для обеспечения восстановления работоспособности комплексов требуется разработка новой системы технического обслуживания и ремонта. *Материалы и методы.* Рассматривается подход к оцениванию различных градаций технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов с использованием нечеткой классификации. Предлагается интеграция элементов проактивной концепции в существующую планово-предупредительную систему технического обслуживания и ремонта, что предполагает непрерывный контроль технического состояния по обобщенному параметру для определения момента возникновения состояния потенциального отказа. Для решения данной задачи применяется нечеткий логический вывод. *Результаты и выводы.* Подтверждение необходимости ремонтного воздействия производится вероятностным оцениванием текущего класса технического состояния.

**Ключевые слова:** мобильные робототехнические комплексы, техническое диагностирование, мониторинг технического состояния, концепция RCM, нечеткий логический вывод, классы работоспособности

**Для цитирования:** Заяра А. В., Фандеев В. П. Оценивание технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов с использованием нечеткой классификации // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 89–98. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-10

### ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL EQUIPMENT IN MOBILE ROBOTIC COMPLEXES USING FUZZY CLASSIFICATION

A.V. Zayara<sup>1</sup>, V.P. Fandeyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Military Innovative Technopolis "ERA", Anapa, Russia

<sup>2</sup> Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia

<sup>1</sup>zaw1966@mail.ru, <sup>2</sup>fandvladpetr@gmail.com

**Abstract.** *Background.* Modern mobile robotic complexes are equipped with sophisticated electrical equipment, which causes more than half of the failures caused by degradation processes. To ensure the restoration of the complexes' operability, the development of a new maintenance and repair system is required. *Materials and methods.* An approach to assessing various gradations of the technical condition of electrical equipment of mobile robotic complexes using a fuzzy classification is considered. It is proposed to integrate elements of the proactive concept into the existing scheduled preventive maintenance and repair system, which involves continuous monitoring of the technical condition according to a generalized parameter to determine the moment of occurrence of a potential failure condition. Fuzzy inference is used to solve this problem. *Results and conclusions.* Confirmation of the need for repair effects is made by probabilistic assessment of the current class of technical condition.

**Keywords:** mobile robotic complexes, technical diagnostics, technical condition monitoring, RCM concept, fuzzy logic inference, operability classes

**For citation:** Zayara A.V., Fandeyev V.P. Assessment of the technical condition of electrical equipment in mobile robotic complexes using fuzzy classification. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(2):89–98. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-10

## Введение

В последнее время мобильные робототехнические комплексы (РТК) превратились в принципиально новый вид техники, предлагая уникальные возможности для выполнения сложнейших задач в различных условиях. Однако, как и любое сложное техническое изделие, эти комплексы нуждаются в эффективной системе технического обслуживания и ремонта (ТОиР), которая в настоящее время находится в стадии разработки. Это создает значительные трудности в процессе организации технической эксплуатации комплексов.

Одним из ключевых компонентов РТК является электроаппаратура, на долю которой приходится значительная часть отказов (до 50 %). Это делает техническое диагностирование (ТД) электроаппаратуры критически важной задачей для обеспечения требуемых значений показателей, составляющих надежности РТК. Анализ продолжительности операций ТО для сопоставимой по сложности аппаратуры ПТРК показывает, что ТД может занимать до 80 % всего времени обслуживания. Первой задачей ТД является контроль технического состояния, по результатам которого определяется один из его видов<sup>1</sup>. Согласно другому нормативному документу<sup>2</sup>, результаты контроля позволяют определить текущее состояние электроаппаратуры, классифицируя его как работоспособное, предельное или неработоспособное.

ТД как составная часть ТО является периодическим мероприятием и реализуется в рамках планово-предупредительной системы, которая в настоящее время применяется для обеспечения эксплуатации большинства технических систем. Однако традиционный подход к техническому обслуживанию не всегда позволяет оперативно реагировать на возникающие проблемы, что может приводить к неожиданным отказам, которые ставят под угрозу срыва выполнение боевых задач.

В связи с этим во вновь создаваемую для мобильных РТК систему ТОиР предлагается интегрировать элементы проактивной концепции, предполагающей непрерывный мониторинг технического состояния электроаппаратуры. Это позволит своевременно определять моменты проявления отказов и оптимизировать процесс восстановления. В данной статье рассматривается подход к оцениванию технического состояния электроаппаратуры наземных РТК на основе нечеткой классификации, что способствует повышению достоверности оценки технического состояния и, как следствие, улучшению показателей готовности комплексов.

## Материалы и методы

Одной из задач контроля технического состояния в рамках планово-предупредительной системы является подтверждение факта нахождения объекта диагностирования в предельном состоянии, которое определяется путем приближения значений контролируемых параметров к границам допусковых интервалов. Формальным основанием для определения предельного состояния служит критерий предельного состояния, представляющий собой совокупность признаков, установленных разработчиком, появление которых указывает на возникновение предельного состояния объекта. В данном контексте основным аргументом, который должен убедить эксплуатанта в необходимости назначения ремонтного воздействия, являются значения ресурса или срока сохраняемости.

<sup>1</sup> ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

Основное противоречие сложившейся ситуации заключается в необоснованной, с точки зрения достоверности, оценке текущего технического состояния РТК. Это приводит либо к отправке образца на ремонт при наличии достаточного остаточного ресурса, либо к преждевременному выведению изделия из эксплуатации в случае наступления внезапного отказа в промежутке между мероприятиями технического обслуживания (рис. 1).

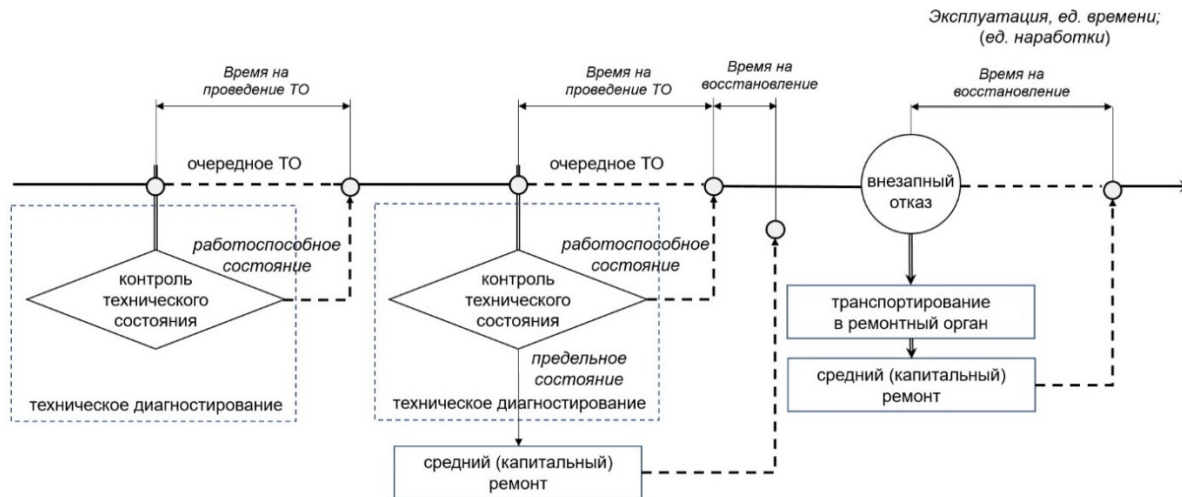


Рис. 1. Схема, поясняющая место ТД в планово-предупредительной системе ТОиР

Другими словами, наступление внезапного отказа, характеризующегося скачкообразным переходом в неработоспособное состояние, влечет за собой доставку неработоспособного РТК в ремонтный орган, где организуется восстановление работоспособности, которое начинается с поиска места и определения причин отказа. Как правило, в сложной электроаппаратуре эта процедура проводится на основе метода пробных замен или автономного метода [1]. Применение первого предполагает создание комплекта запасных частей, полностью дублирующего конструкцию РТК. Для реализации автономного метода задействуется дорогостоящая контрольно-проверочная аппаратура, с помощью которой контролируется техническое состояние каждого типового элемента замены. Затраты времени на транспортирование неработоспособного комплекса к месту ремонта и его восстановление в значительной степени ухудшают готовность объекта, которая функционально связана с показателями безотказности, ремонтпригодности и восстанавливаемости.

Возвратимся к проактивной концепции, обеспечивающей восстановление работоспособности изделия на основе данных о его фактическом техническом состоянии. Ее теоретические основы постулируют, что изначально все виды отказов присутствуют в зачаточном состоянии во всех технических системах. Они обусловлены конструкторскими, технологическими или эксплуатационными факторами. Воздействие совокупности данных факторов вызывает ускоренное развитие одного или нескольких отказов, которые становятся определяющими по отношению к работоспособности всего комплекса. Обоснованно назначая ремонтные воздействия с целью уменьшения влияния определяющих факторов, можно поддерживать работоспособное состояние электроаппаратуры в течение продолжительного времени [2].

Также согласно проактивной концепции электроаппаратура РТК подвержена старению, которое детерминируется деградиационными процессами, начиная с момента ввода в эксплуатацию. Применительно к промышленному оборудованию мера старения проявляется в снижении первоначально ожидаемого уровня производительности. Момент инициации этого снижения трактуется концепцией *RCM (Reliability-Centered Maintenance)* как признак потенциального отказа, указывающего на запуск деградиационных процессов. Если этот момент не выявляется, закономерным итогом ожидается наступление функционального отказа (событие перехода в состояние, характеризующееся невозможностью выполнять свои функции). Терминологией концепции *RCM* предусматривается «период развития отказа», определяемый как интервал *«P-F (Potential failure – Functional failure)»* между моментом времени, когда потенциальный отказ может быть выявлен, и моментом его перехода в функциональный отказ<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> SAE JA1011. Руководство по стандарту технического обслуживания для обеспечения надежности (Reliability-Centered Maintenance, RCM). 2002. 56 с.

Базовой составляющей проактивной концепции является перманентное оценивание технического состояния оборудования, которое имеет целью своевременное выявление начала интервала « $P-F$ » с целью назначения ремонтного воздействия. Применительно к промышленному оборудованию задача мониторинга, которая заключается в идентификации текущего состояния объекта, выполняется очень просто. В нормативном документе, определяющем концепцию *RCM*, в качестве примера рассматривается насос для перекачки воды из одного резервуара в другой с номинальной мощностью 1000 л/мин. Считается, что состояние потенциального отказа наступает в тот момент, когда из-за старения производительность насоса становится менее 800 л/мин.

Для мобильных РТК транспортного назначения, выполняющих задачи материально-технического обеспечения в различных ландшафтных и погодных условиях, численное оценивание производительности электроаппаратуры РТК с целью последующего анализа изменений ее показателей представляет собой сложную задачу. В отличие от промышленного насоса, который устанавливается в помещении с практически неизменным температурным диапазоном, транспортные РТК перевозят различные грузы по пересеченной местности в течение всего года. Таким образом, с учетом эксплуатации комплекса в сложных, непредсказуемых условиях необходимо найти решение, позволяющее не только зафиксировать момент вхождения в интервал « $P-F$ », но и аргументированно подтвердить начало развития потенциального отказа.

Внедрение проактивной концепции предусматривает обязательную оценку фактического состояния, перманентно проводимую в режиме реального времени. Несмотря на то, что в работе [3] рассматривается концепция эксплуатации по состоянию, в ней также делается акцент на сбор и накопление диагностической информации в процессе контроля технического состояния. В традиционном представлении реализация такой процедуры заключается в выборе определенной совокупности диагностических параметров, для которых по результатам контроля оценивается нахождение их значений в заданных границах областей работоспособности. Если хотя бы для одного из параметров это условие не соблюдается, объект диагностирования признается неработоспособным.

При внешней простоте такого подхода его реализация наталкивается на ряд существенных трудностей. Прежде всего, это относится к выбору совокупности параметров. Как правило, такими параметрами являются выходные параметры отдельных функциональных элементов, а совокупность параметров выбирается в зависимости от предъявляемых требований (минимум затрат на диагностирование в сочетании с максимумом достоверности контроля при ограничении его продолжительности). Очевидно, что в зависимости от целевой функции совокупность параметров будет различной, а следовательно, и качество оценки технического состояния будет меняться. Кроме того, весьма жестким является требование о взаимной независимости диагностических параметров [3].

Значительные трудности возникают при аппаратной реализации этого подхода. Возникает потребность в значительном числе разнородных первичных преобразователей, что сопровождается усложнением аппаратуры встроенного контроля. В качестве альтернативного варианта предлагается переход к комплексному контролю, осуществляемому на основе анализа обобщенного параметра, под которым понимается искусственно синтезируемый сигнал, характеризующий техническое состояние электроаппаратуры в целом [3].

Для решения задачи оценивания технического состояния электроаппаратуры в режиме реального времени предлагается отождествить ее производительность с энергоэффективностью, комплексно характеризующей техническое состояние всего робота. Для этого вводится искусственная характеристика «нагруженность», под которой понимается внесистемная величина, отражающая эффективность функционирования комплекса в процессе применения по назначению по отношению к величине потребляемой энергии. Численно оценивать эту характеристику предлагается с использованием нечеткого логического вывода в процессе мониторинга технического состояния [4].

Эта величина интегрально оценивает техническое состояние всей электроаппаратуры в процессе выполнения комплексом своих функций в интервале значений от 0 до 1 и учитывает энергетические показатели (потребляемый ток и скорость движения), влияющие на долговечность электроаппаратуры. Ее текущее значение определяется на основе комплексирования данных о входных величинах (лингвистических переменных): линейной скорости движения  $v(t)$ , м/с, и потребляемого тока  $I(t)$ , А, поступающих с проприоцептивных датчиков. Для каждой из них на основе экспертного оценивания устанавливаются термы: для скорости – низкая, средняя, высокая; для тока – слабый, средний, большой. Комплексирование осуществляется с использованием нечеткого логического вывода на основе импликации Мамдани. Центральным элементом в процедуре нечеткого вывода является база правил, которая содержит информацию о структуре модели. В базе каждому сочетанию термов входных величин соответствует свой терм нагруженности [5]. Пример такой базы представлен в табл. 1.

Таблица 1

База правил для модели нечеткого логического вывода

| Входные величины         |                                    | Уровень нагруженности $Q(t)$ |
|--------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Скорость движения $v(t)$ | Величина потребляемого тока $I(t)$ |                              |
| Низкая                   | Слабый                             | Легкий                       |
| Средняя                  | Слабый                             | ≠                            |
| Высокая                  | Слабый                             | ≠                            |
| Низкая                   | Средний                            | Тяжелый                      |
| Средняя                  | Средний                            | Умеренный                    |
| Высокая                  | Средний                            | ≠                            |
| Низкая                   | Большой                            | Критический                  |
| Средняя                  | Большой                            | Тяжелый                      |
| Высокая                  | Большой                            | Умеренный                    |

Возвращаясь к условию определения состояния потенциального отказа РТК, априорно можно сделать вывод, что потенциальному отказу, при котором производительность начинает снижаться, априорно может быть сопоставлен уровень нагруженности «критический» с сочетанием термов «низкая» скорость и «большое» значение потребляемого тока. Из базы исключаются сочетания термов «высокая» и «средняя» скорость с терминами «слабый» и «средний» для потребляемого тока как противоречащие закону сохранения энергии.

Сочетание термов «низкая скорость» и «большой ток» отождествляется с уровнем нагруженности «критический». Выдвигается гипотеза, что класс технического состояния проявляется одновременно с запуском процессов, которые в итоге приведут к функциональному отказу. Предположительно такое сочетание термов должно сигнализировать о зарождении и развитии в электроаппаратуре потенциального отказа.

Возвращаясь к нечеткому логическому выводу на основе импликации Мамдани, который используется для определения значения нагруженности  $Q(t)$ , следует отметить его уникальную способность оценивать энергоэффективность электроаппаратуры в различных условиях использования РТК. Реализация данного подхода осуществляется по схеме продукционного правила «если ..., то ...» между нечеткими множествами. Для оценивания значения нагруженности применяется правило

*modus ponens*:  $\frac{A, A \rightarrow B}{B}$ : если истинно высказывание  $A$  и из  $A$  следует  $B$ , то высказывание  $B$  будет

тоже истинным. Нечеткая импликация используется для установления связи между входными данными и выводом. В общем виде для конкретного момента времени  $t_i$  значение нагруженности формализуется следующим образом:

$$Q(t_i) = \sup T(\mu_{Q(t)}(x), \mu_R(I(t_i), v(t_i))), \quad (1)$$

$$\mu_R(I(t_i), v(t_i)) = I_M(\mu_A(I(t_i)), \mu_B(v(t_i))),$$

как импликация по Мамдани  $I_M(a, b) = \min\{a, b\}$ ,

где  $\mu_{Q(t)}(x)$  – текущее значение функции принадлежности для нагруженности  $Q(t_i)$ ,  $x \in [0, 1]$ ;  $\sup T$  – верхняя граница треугольной конормы ( $t$ -конормы): объединения функций принадлежности входной и выходной величин  $\mu_R(I(t_i), v(t_i))$ ;  $I_M(a, b)$  – результат нечеткой импликации по Мамдани, реализующей логическое умножение значений функций принадлежности;  $\mu_A(I(t_i))$  и  $\mu_B(v(t_i))$  – значения функций принадлежности, соответственно, для величин потребляемого тока  $I(t_i)$  и скорости  $v(t_i)$ .

Согласно правилу *modus ponens*, продукция типа «если величины тока и скорости принимают значения  $I(t_i)$  и  $v(t_i)$ , то значение нагруженности принимает вид  $Q(t_i)$ » рассчитывается в следующей последовательности:

- 1) проводится фаззификация: определяются значения функций принадлежности при текущих значениях входных величин  $\mu_A(I(t_i))$  и  $\mu_B(v(t_i))$ ;
- 2) рассчитывается степень истинности предпосылок  $\alpha_j = \min(\mu_A(I(t_i)), \mu_B(v(t_i)))$ ;
- 3) определяется степень истинности следствий  $\mu_{Q(t_i)}(x) = \min(\alpha_j, \mu_{Q(t)}(x))$ ;

4) строится композиция следствий:  $MF(x) = \max(\mu_{Q(t)}(x))$ ;

5) осуществляется дефаззификация:  $x^* = \frac{\int_{\min}^{\max} xMF(x)dx}{\int_{\min}^{\max} MF(x)dx}$ .

Текущему значению нагруженности присваивается  $Q(t_i) = x^*$  [6].

Для формального подтверждения наступления момента активации механизма, способного привести к функциональному отказу, предлагается создать координатную плоскость на основе базы правил, на которой по оси абсцисс откладывается скорость  $v(t)$ , м/с, а по оси ординат – величина потребляемого тока  $I(t)$ , А. Плоскость разделена на прямоугольники, границы которых определяются диапазонами термов.

Каждый прямоугольник характеризует класс технического состояния комплекса, сопоставляя каждому сочетанию термов условный класс работоспособности  $R$ . Применительно к результатам импликации класс работоспособности трактуется как нечеткая параметрическая категория, которая характеризует текущее состояние электроаппаратуры с точки зрения производительности в режиме реального времени. «Нечеткость» каждого класса будет определяться сочетанием термов входных величин. Например, в определенный момент времени  $t_i$  при «низкой» скорости движения и «средней» величине потребляемого тока уровень нагруженности будет оцениваться как «тяжелый» (табл. 2). Численное подтверждение обеспечивается результатом нечеткого логического вывода (1).

Рассчитанные значения нагруженности распределяются по численным интервалам:

$0 < Q(t) \leq 0,33$  – легкий;

$0,25 < Q(t) \leq 0,66$  – умеренный;

$0,66 < Q(t) \leq 0,95$  – тяжелый;

$0,95 < Q(t) < 1,0$  – критический.

Таблица 2

Классы состояний  $R$  электроаппаратуры мобильного РТК

| Скорость $v(t)$ , м/с | Потребляемый ток $I(t)$ , А |           |             |
|-----------------------|-----------------------------|-----------|-------------|
|                       | Слабый                      | Средний   | Большой     |
| Низкая                | Легкий                      | Тяжелый   | Критический |
| Средняя               | ≠                           | Умеренный | Тяжелый     |
| Высокая               | ≠                           | ≠         | Умеренный   |

Каждый класс работоспособности  $R_i$  соответствует назначенному интервалу нагруженности со своим термом. Априорно выдвигается гипотеза, что состояние потенциального отказа для транспортного РТК, свидетельствующего об ухудшении энергоэффективности, наступает в момент перехода нагруженности на критический уровень при  $Q(t) > 0,95$ .

Тем не менее численное значение  $Q(t)$  является условным показателем, обладающим значительной долей неопределенности. Его значение подтверждает принадлежность текущего состояния электроаппаратуры к тому или иному классу работоспособности с субъективной степенью уверенности, поскольку формализация функций принадлежности для лингвистических переменных производится на основе экспертного оценивания. Решить задачу вероятностного подтверждения предлагается с использованием метода ядерной оценки плотности вероятности (в англоязычной научной литературе именуется «*Kernel density estimation, KDE*») [7].

### Результаты и выводы

В классическом представлении в качестве вероятностной модели используется многомерное Гауссово распределение, основанное на допущении о независимости диагностических признаков [8]. В качестве альтернативного варианта предлагается использовать математический аппарат, позволяющий сохранить информацию о потенциальных зависимостях между случайными величинами. В частности, вместо представления многомерного распределения как произведения одномерных нормальных распределений, совместная плотность распределения определяется с помощью *KDE*-подхода, предоставляющего возможность адекватной оценки многомерных распределений. Оптимальным с точки зрения автора видится применение ядра Епанечникова [7].

Сущность этого метода применительно к двумерному распределению контролируемых параметров (скорости движения  $v(t)$  и величине потребляемого тока  $I(t)$ ) заключается в оценке плотности вероятности их распределения, основываясь на их значениях в двумерном пространстве. Статистические выборки  $v(t)$  и  $I(t)$  начинают формироваться в момент превышения нагрузенностью порога уровня «критический» с частотой дискретизации проприцептивных датчиков. В течение времени нахождения значения нагрузенности  $Q(t) > 0,95$  оценивается совместная плотность распределения значений контролируемых параметров [7]:

$$\hat{f}(v, I) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K_E \left( \frac{v - v_j}{h}, \frac{I - I_j}{h} \right), \quad (2)$$

где  $n$  – объем выборки;  $h$  – параметр сглаживания, зависящий от величины  $n$ ;  $K_E$  – ядро Епанечникова, которое определяется системой

$$\hat{f}(v, I) = \begin{cases} \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n \frac{3}{4} \left( 1 - \frac{v^2 + I^2}{h^2} \right), & v^2 + I^2 \leq h^2; \\ 0, & v^2 + I^2 > h^2. \end{cases}$$

Ядро Епанечникова  $K_E$ , обладающее формой «купола», позволяет получить непрерывную оценку плотности. Этот метод эффективно учитывает локальные особенности распределения, обеспечивая более точное представление о вероятностной структуре, при этом позволяя избегать противоречия зависимости случайных величин.

График плотности (рис. 2) строится в вероятностном пространстве, в котором плоскость, образованная осями абсцисс и ординат, формируется путем трансформации базы правил входных величин на основе классов состояний  $R$  (табл. 2). По оси аппликата применительно к рассматриваемому случаю совместного распределения откладывается плотность вероятности (2).

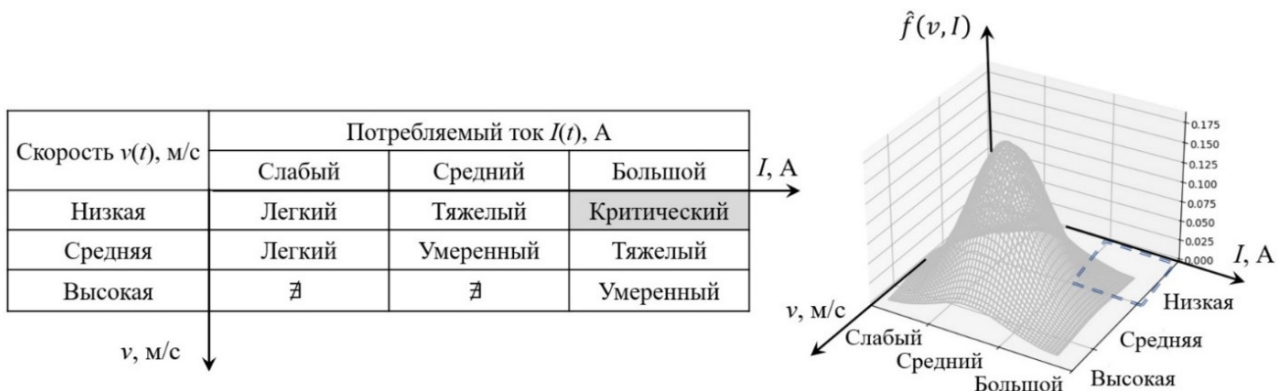


Рис. 2. Пример графика плотности совместной вероятности контролируемых параметров, построенный в *Python* методом *KDE*

Применение встроенных библиотек *Python* [9] для реализации метода *KDE* предоставляет необходимые инструменты для визуализации и статистической классификации. Решение второй задачи сводится к оцениванию вероятности принадлежности текущего состояния объекта диагностирования к выбранному классу. Значение этой вероятности определяется как двойной интеграл в заданных интервалах изменения случайных величин. Для рассматриваемого примера геометрической интерпретацией оценивания вероятности попадания значений случайных величин  $v(t)$  и  $I(t)$  в определенные интервалы является величина объема под поверхностью, заданной совместной плотностью распределения. Этот объем соответствует вероятности и визуализируется в виде параллелепипеда, основание которого представляет собой прямоугольник со сторонами, совпадающими с границами класса работоспособности.

Заключительным шагом в процедуре статистической классификации является переход от поверхности совместного распределения контролируемых параметров к пространственной гистограмме, которая позволяет оценить вероятности принадлежности текущего состояния электроаппаратуры к каждому из классов работоспособности. В частности, особый интерес представляет вероятность возникновения

критического состояния для сочетания термов контролируемых величин: низкая скорость и высокое потребление тока. Процедура распределения значений вероятности по классам работоспособности поясняется гистограммой на рис. 3.

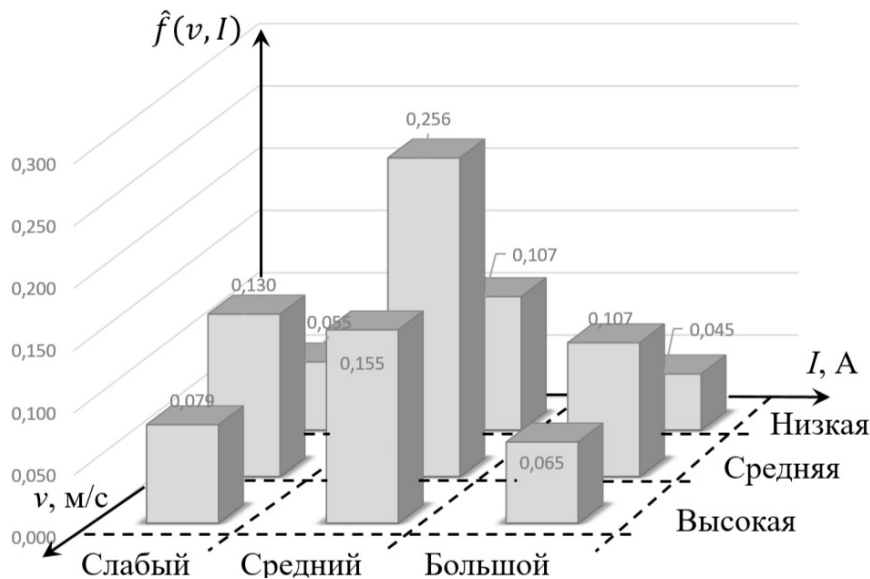


Рис. 3. Гистограмма, поясняющая распределение вероятности принадлежности текущего состояния к классам работоспособности

### Заключение

Решение задачи регистрации момента вхождения электроаппаратуры мобильных РТК в интервал « $P-F$ », для которых традиционные методы не позволяют явно зафиксировать снижение производительности, достигается путем фиксации момента достижения нагруженности установленного порога  $Q(t) > 0,95$ . Нахождение в критическом состоянии может быть вызвано кратковременными факторами, такими как перегрузка, налипание грунта или снега на гусеницы и т.п. Для недопущения необоснованных выводов о наступлении функционального отказа следует перейти от результатов нечеткого вывода к вероятностной оценке технического состояния.

Аргументированное подтверждение принадлежности текущего состояния электроаппаратуры к определенному классу работоспособности достигается оценкой вероятности попадания контролируемых величин в заданные интервалы, формирующие этот класс.

Определение начала процесса развития отказа должно априорно соответствовать периоду определенной длительности, в течение которого уровень текущего состояния классифицируется как «критический». Продолжительность этого периода предполагается оценивать на основе результатов ускоренных испытаний РТК. Предварительная оценка принадлежности текущего состояния к конкретному классу работоспособности осуществляется при превышении вероятностью порога в 0,2.

Таким образом, предложенный математический аппарат обоснования момента назначения ремонтного воздействия как элемента проактивной концепции ТОиР будет способствовать повышению готовности РТК.

### Список литературы

1. Фандеев В. П. Технологии и средства анализа отказов восстанавливаемых электронных изделий приборостроения : монография. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. 193 с.
2. Проактивная концепция ТОиР // Ассоциация ЕАМ. URL: <https://eam.su/proaktivnaya-koncepciya-toir.html> (дата обращения: 16.03.2025).
3. Барзилович Е. Ю., Воскобоев В. Ф. Эксплуатация авиационных систем по состоянию (Элементы теории). М. : Транспорт, 1981. 197 с.
4. Данилин М. Е., Заяра А. В. Моделирование процесса изменения технического состояния электроаппаратуры робототехнических комплексов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 21–30. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-3



5. Заяра А. В., Данилин М. Е. Применение нечеткого логического вывода для моделирования процесса изменения технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 120–125. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14
6. Броневиц А. Г., Лепский А. Е. Нечеткие модели анализа данных и принятия решений : учеб. пособие. М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. 264 с.
7. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятности и ее применение. 1969. № 14:1. С. 156–161.
8. Гаскаров Д. В., Голинкевич Т. А., Мозгалеvский А. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / под ред. Т. А. Голинкевича. М. : Сов. радио, 1974. 224 с.
9. Seaborn Kdeplot – A Comprehensive Guide // Geeksforgeeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/seaborn-kdeplot-a-comprehensive-guide/> (дата обращения: 21.03.2025).

### References

1. Fandeev V.P. *Tekhnologii i sredstva analiza otkazov vosstanavlivaemykh elektronnykh izdeliy priborostroeniya: monografiya = Technologies and means of failure analysis of recoverable electronic instrumentation products : monograph*. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2000:193. (In Russ.)
2. Proactive MRO concept. *Assotsiatsiya EAM = EAM Association*. (In Russ.). Available at: <https://eam.su/proaktivnaya-koncepciya-toir.html> (accessed 16.03.2025).
3. Barzilovich E.Yu., Voskoboev V.F. *Ekspluatatsiya aviatsionnykh sistem po sostoyaniyu (Elementy teorii) = State-of-the-art operation of aviation systems (Elements of theory)*. Moscow: Transport, 1981:197. (In Russ.)
4. Danilin M.E., Zayara A.V. Modeling the process of changing the technical condition of electrical equipment of robotic complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):21–30. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-3
5. Zayara A.V., Danilin M.E. Application of fuzzy logical inference for modeling the process of changing the technical condition of electrical equipment of mobile robotic complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):120–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14
6. Bronevich A.G., Lepskiy A.E. *Nechetkie modeli analiza damnykh i prinyatiya resheniy: ucheb. posobie = Fuzzy models of data analysis and decision-making : textbook*. Moscow: Izd. dom Vyshey shkoly ekonomiki, 2022:264. (In Russ.)
7. Epanechnikov V.A. Nonparametric estimation of multidimensional probability density. *Teoriya veroyatnosti i ee primeneniye = Probability theory and its application*. 1969;(14:1):156–161. (In Russ.)
8. Gaskarov D.V., Golinkevich T.A., Mozgalevskiy A.V. *Prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti radioelektronnoy apparatury = Forecasting the technical condition and reliability of electronic equipment*. Moscow: Sov. radio, 1974:224. (In Russ.)
9. Seaborn Kdeplot – A Comprehensive Guide. *Geeksforgeeks*. Available at: <https://www.geeksforgeeks.org/seaborn-kdeplot-a-comprehensive-guide/> (accessed 21.03.2025).

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Андрей Владимирович Заяра

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
научно-исследовательского отдела,  
Военный инновационный технополис «ЭРА»  
(Россия, г. Анапа, Пионерский пр-т, 41)  
E-mail: [zaw1966@mail.ru](mailto:zaw1966@mail.ru)

#### Владимир Петрович Фандеев

доктор технических наук, профессор,  
преподаватель кафедры общетехнических дисциплин,  
Филиал Военной академии  
материально-технического  
обеспечения имени генерала армии  
А. В. Хрулева в г. Пензе  
(Россия, г. Пенза, Военный городок)  
E-mail: [lyudmilarotmanova@yandex.ru](mailto:lyudmilarotmanova@yandex.ru)

#### Andrey V. Zayara

Candidate of technical sciences,  
senior research fellow of the research department,  
Military Innovative Technopolis "ERA"  
(41 Pionersky avenue, Anapa, Russia)

#### Vladimir P. Fandeyev

Doctor of technical sciences, professor,  
lecturer of the sub-department  
of general technical disciplines,  
Branch of the Military Academy  
of Logistics named after Army General  
A.V. Khrulev in Penza  
(Military town, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

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

**Поступила в редакцию/Received 05.04.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 02.05.2025**