

ОЧУВСТВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОАППАРАТУРЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА

А. В. Заяра¹, М. Е. Данилин²

¹ Военный инновационный технополис «Эра», Анапа, Россия

² Научно-производственное объединение «Аванти», Казань, Россия

¹ zaw1966@mail.ru, ² metod@avgr.tech

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для решения задачи очувствления технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов (РТК) через комплексирование сенсорной информации предлагается процедура мониторинга как составной части системы технического обслуживания и ремонта, основанной на проактивной концепции. *Материалы и методы.* С использованием метода ассоциативной аналогии проведено сравнение детерминированного по времени процесса снижения производительности функционирования РТК с ухудшением работоспособности человека, что предоставляет возможность оценивать техническое состояние по обобщенному параметру, характеризующему энергоэффективность РТК с использованием нечеткого логического вывода. *Результаты и выводы.* В процессе имитации такой когнитивной функции человека, как восприятие самочувствия, реализовано численное оценивание системой управления комплекса своего текущего технического состояния.

Ключевые слова: мобильный робототехнический комплекс, электроаппаратура, мониторинг технического состояния, нечеткий логический вывод

Для цитирования: Заяра А. В., Данилин М. Е. Очувствление технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов для решения задач мониторинга // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 63–70. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-7

SENSITIVITY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF MOBILE ROBOTIC COMPLEXES FOR SOLVING MONITORING TASKS

A.V. Zayara¹, M.E. Danilin²

¹ Military Innovative Technopolis "ERA", Anapa, Russia

² Scientific and Production Association "Avanti", Kazan, Russia

¹ zaw1966@mail.ru, ² metod@avgr.tech

Abstract. *Background.* To solve the problem of sensing the technical condition of the electrical equipment of mobile robotic complexes through the integration of sensory information, a monitoring procedure is proposed as an integral part of a maintenance and repair system based on a proactive concept. *Materials and methods.* Using the method of associative analogy, a comparison of the time-deterministic process of reducing the performance of the robotics complex with a deterioration in human performance has been carried out, which makes it possible to assess the technical condition according to a generalized parameter characterizing the energy efficiency of the RTK using fuzzy logical inference. *Results and conclusions.* In the process of simulating such a cognitive function of a person as the perception of well-being, a numerical assessment of the complex's current technical condition by the control system is implemented.

Keywords: mobile robotic complex, electrical equipment, monitoring of technical condition, fuzzy logical conclusion

For citation: Zayara A.V., Danilin M.E. Sensitivity of the technical condition of electrical equipment of mobile robotic complexes for solving monitoring tasks. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):63–70. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-7

Введение

Основным содержанием современных мобильных робототехнических комплексов (РТК) является сложная электроаппаратура различных видов, на которую в процессе эксплуатации воздействуют деструктивные факторы. Под их влиянием в самой аппаратуре происходят необратимые деградиационные процессы, приводящие в конечном счете к наступлению отказов [1]. Восстановление работоспособного состояния требует значительных трудозатрат и высокой квалификации специалистов. Своевременное оповещение эксплуатанта о наступлении предельного состояния¹, которое может возникнуть как в результате внутренних процессов старения, так и внешних воздействий на объект в процессе его функционирования, является актуальной задачей.

На этом основании исследования, направленные на реализацию идеи оценки технического состояния электроаппаратуры мобильных РТК, имеют практическую значимость. Эффективное функционирование мобильных роботов зависит от состояния их электроаппаратуры, поэтому разработка технологий, позволяющих оценивать и интерпретировать ее состояние в режиме реального времени, является ключевой задачей для обеспечения эффективного применения комплексов. Ее решение будет способствовать поиску и применению инновационных подходов к достижению целей технического диагностирования, что, в свою очередь, благотворно повлияет на улучшение ремонтпригодности и долговечности РТК.

Важным аспектом становится организация технической эксплуатации данного принципиально нового вида техники. Хотя уже разработана классификация роботов², для этих комплексов система технической эксплуатации еще не полностью сформирована. При современном, во многом эклектичном подходе к выбору концепции технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) разработчики технических систем часто отдают предпочтение проактивному подходу, который обеспечивает восстановление работоспособности изделия на основе данных о его фактическом техническом состоянии.

Материалы и методы

Теоретические основы проактивной концепции ТО и Р оборудования постулируют, что изначально все причины неисправностей присутствуют в зачаточном виде во всех технических системах с начала жизненного цикла [2]. Различные факторы (конструктивные, технологические, эксплуатационные) в той или иной мере способствуют эволюции технического состояния [3]. Их совокупное воздействие вызывает ускоренное развитие одного или нескольких дефектов (отказов), которые становятся определяющими по отношению к работоспособности изделия. Назначая операции ТО и Р таким образом, чтобы уменьшить влияние деструктивных факторов, можно поддерживать работоспособное состояние РТК в течение заданного времени. Прежде всего, проактивная концепция базируется на достоверной оценке технического состояния всего комплекса, а в рассматриваемом случае – электроаппаратуры. Тем более современные сенсорные технологии способны обеспечить решение этой задачи в режиме реального времени. Другими словами, приоритетное значение в структуре этой концепции занимает мониторинг технического состояния.

Несмотря на то, что в настоящее время такие нормативные документы, как национальные стандарты, не представляют единого толкования понятия «мониторинг», наиболее корректной видится следующая трактовка³. Мониторинг – процесс непрерывного дистанционного контроля технического состояния объекта по определенному алгоритму с накоплением и оценкой полученной информации с целью идентификации текущего состояния объекта. Расширение функциональных разновидностей и метрологических возможностей современных датчиков позволяет контролировать признаки изменения технического состояния электроаппаратуры посредством проприоцептивных сенсоров, предназначенных для измерения параметров внутреннего состояния робота, и получать информацию о внешней среде с помощью экстероцептивных датчиков. Другими словами, если использовать метод аналогии, то эту сенсорную сеть можно сравнить с нервной системой человека. Проприоцептивные датчики аналогичны рецепторам в нашем теле, которые обеспечивают восприятие внутреннего состояния и движения. Экстероцептивные датчики же подобны рецепторам, отвечающим за восприятие

¹ ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

² ГОСТ Р 60.0.0.2–2016. Роботы и робототехнические устройства. Классификация.

³ ГОСТ 34913–2022. Системы технического диагностирования и мониторинга железнодорожной автоматики и телемеханики высокоскоростных железнодорожных линий. Общие технические требования.

внешней среды. Таким образом, сенсорная информация в полной мере способна обеспечить инструментальную достоверность мониторинга.

Развивая идею сравнения сложной электроаппаратуры современных РТК с живым организмом на основе деятельностного подхода [4], устанавливающего причинно-следственную связь между понятиями «здоровье человека» – «его самочувствие как личностное ощущение комплекса сигналов, поступающих в головной мозг от рецепторов организма» – «работоспособность, которая отождествляется с физической мощностью и оценивается с позиции результатов труда», предлагается аналогия со следующей логической цепочкой: «техническое состояние» – «его вид, характеризующий фактическими значениями контролируемых параметров: предельное, неработоспособное и др.» – «производительность». Не вызывает сомнения объективность тенденции снижения уровня работоспособности человека с возрастом и уровня производительности промышленного оборудования с течением времени, потому что именно в этом контексте используется этот термин в руководстве по стандарту технического обслуживания для обеспечения надежности¹.

Если применительно к электроаппаратуре РТК формализовать влияние деградационных процессов на изменение ее технического состояния как функцию времени, то его ухудшение, вызванное старением, можно выразить характеристикой, отражающей качество объекта через его энергоэффективность [5]. Этими терминами выражается внесистемная величина, условно характеризующая объем (качество) проделанной работы ко времени, за которое она была совершена.

Качественную оценку характеристики «энергоэффективность» в рассматриваемом контексте предлагается отождествить со способностью мобильного РТК выполнять заданные функции при определенном уровне потребления тока аккумуляторной батареи. Этот показатель может снижаться в результате старения электроаппаратуры и влияния других деструктивных факторов. В предлагаемом аспекте энергоэффективность транспортного мобильного РТК будет означать способность системы эффективно передвигаться по различным типам местности и в различных погодных условиях, обеспечивая решение задач по доставке грузов. На эту характеристику будут оказывать влияние скорость перемещения, точность навигации, устойчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды, автономность работы и прочие параметры, заданные оператором. Например, энергоэффективность транспортного РТК обычно будет ухудшаться при движении по мягкому грунтовому покрытию на основе чернозема во время дождя по сравнению с перемещением по твердой дороге в сухую погоду.

Возвращаясь к мониторингу технического состояния электроаппаратуры, предлагается в качестве обобщенной характеристики, которая могла бы отражать величину потребляемой энергии, вес перевозимого груза, скорость перемещения, условия окружающей среды и, самое главное, характеризовала бы общее техническое состояние комплекса, использовать понятие «нагруженность» [5]. Для электроаппаратуры мобильных РТК транспортного назначения – это характеристика, которая интегрально оценивает техническое состояние в процессе выполнения роботом своих функций и учитывает энергетические показатели (рабочее напряжение, потребляемый ток), температуру окружающей среды и другие параметры, влияющие на производительность и безотказность комплекса.

Очевидно, что необратимые процессы старения электроаппаратуры однозначно окажут влияние на нагруженность. Другими словами, комплекс со значительной выработкой ресурса (времени нахождения в эксплуатации или пробегом) будет иметь худшие показатели энергопотребления, чем новый робот. Аналогичный вывод можно сделать в отношении проявления зарождающегося отказа. Деструктивные факторы, сопровождающие эксплуатацию (дополнительные нагрузки, не предусмотренные проектной документацией, воздействие условий окружающей среды и пр.), в той или иной мере приводят к развитию различных неисправностей. Их определяющее воздействие также будет проявляться через значения нагруженности.

Аппаратные платформы современных мобильных РТК позволяют разместить технологии искусственного интеллекта (ИИ). Следовательно, решение задачи имитации такой когнитивной функции человека, как восприятие собственного самочувствия, вполне реализуемо. Проводя аналогию между очувствлением роботом собственного технического состояния со знакомым каждому человеку понятием личностного восприятия самочувствия, представляется возможность формализовать нагруженность с использованием аппарата нечеткой логики как временную характеристику $Q(t)$.

¹ SAE JA1011. Руководство по стандарту технического обслуживания для обеспечения надежности (Reliability-Centered Maintenance, RCM).

Внедрение в системы управления РТК современных сенсорных технологий добавило в робототехнический лексикон новый термин «очувствление», которое представляется как процесс интеграции данных, сгенерированных множеством сенсоров для формирования знаний¹, подразумевающих априорное применение технологий ИИ. В данном аспекте оптимально подходит продукционная модель нечеткого логического вывода, которая позволяет работать с данными, обладающими свойствами неопределенности.

Оценивание нагруженности в процессе применения РТК посредством технологий ИИ предлагается рассматривать как способность системы распознавать изменения в своем техническом состоянии, анализировать, запоминать их и передавать информацию об этих изменениях оператору. Это будет способствовать повышению уровня автономности комплекса в отношении контроля своего функционирования.

Возвращаясь к нагруженности как к внесистемной, интегральной величине, характеризующей на первичном этапе исследований такой энергетический показатель, как величину потребляемого тока $I(t)$ и параметр производительности – скорость движения $v(t)$, предлагается их комплексировать с использованием процедуры нечеткого логического вывода. Первым шагом в направлении реализации этой процедуры является преобразование лингвистических переменных в нечеткие значения. Для этого входные величины в соответствии с правилами нечеткой логики интерпретируются лингвистическими переменными [6]. Введение нечеткости в процедуру мониторинга технического состояния подразумевает оценивание входных величин и самой нагруженности совокупностью термов, которые сопоставляются с некоторой степенью уверенности с определенными интервалами значений выбранных физических величин. Для $I(t)$ предлагается следующая градация: слабый, средний и большой. Скорость $v(t)$ оценивается как низкая, средняя и высокая. Далее преобразование лингвистических переменных в нечеткие значения требует присвоить термам конкретные численные границы, которые формируются с применением методов статистической обработки экспертной информации. Каждому терму ставится в соответствие треугольная функция принадлежности. Схема, поясняющая структуру процесса нечеткого логического вывода, представлена на рис. 1.

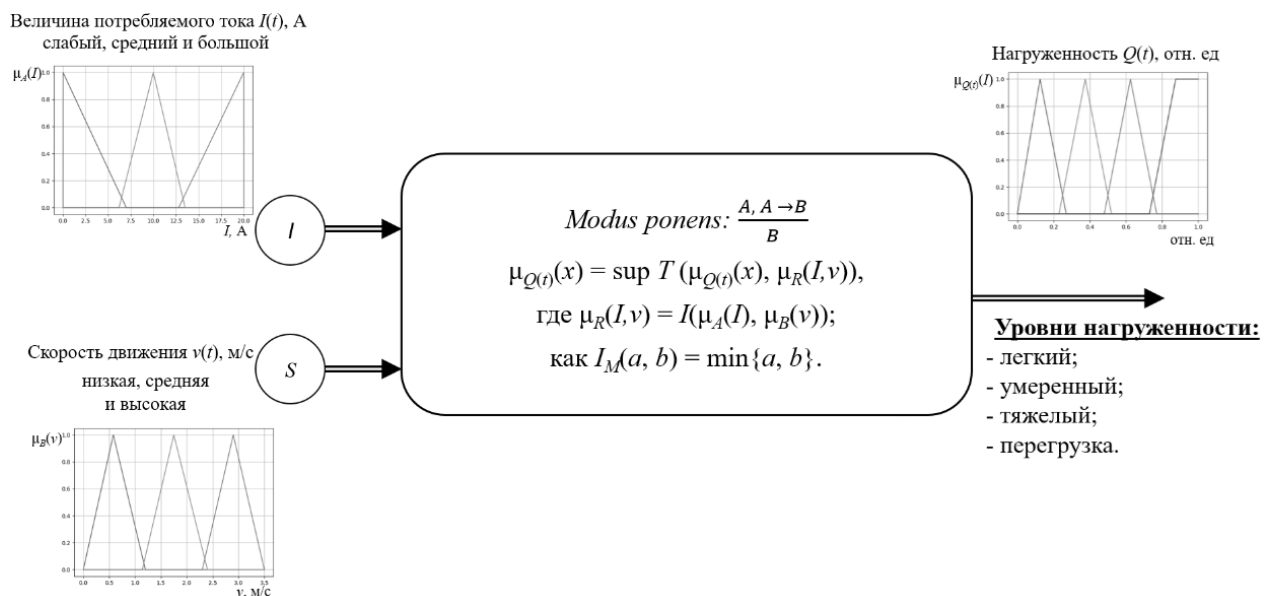


Рис. 1. Схема, поясняющая сущность процедуры оценивания нагруженности с использованием нечеткого логического вывода

Возвращаясь к методу аналогии, предлагается охарактеризовать нагруженность электроаппаратуры робота с использованием приближенных суждений о собственной оценке работоспособности человека (своего самочувствия). Применительно к оцениванию лингвистической переменной «Уровни нагруженности» предлагается логичным применить термы «легкий», «умеренный», «тяжелый» и «критический».

¹ ГОСТ Р 60.6.0.1–2021. Роботы и робототехнические устройства. Сервисные мобильные роботы. Уровни автономности. Термины и определения.

При легкой степени выполняется условие $0 < Q(t) \leq 0,25$. Электроаппаратура РТК легко справляется с текущими задачами подобно человеку, который испытывает легкую физическую нагрузку.

Умеренная нагрузка характеризуется работой с «затруднениями» как человек, который выполняет интенсивные физические упражнения. Усталость постепенно накапливается. Значение функции ТС – в интервале $0,25 < Q(t) \leq 0,5$.

Тяжело нагруженная система испытывает значительные трудности при выполнении задач и работает с затруднениями как человек, который выполняет физические упражнения с нагрузкой и чувствует накапливающуюся усталость. Значение функции ТС находится в пределах $0,5 < Q(t) \leq 0,75$.

Критический уровень сигнализирует о том, что система находится на грани своих возможностей и может перестать функционировать, как человек, который испытывает критическое утомление и может потерять способность продолжать выполнять задачи. Значение функции удовлетворяет условию $0,75 < Q(t) \leq 1,0$.

Центральным элементом в процедуре нечеткого вывода является база правил, потому что в ней содержится информация о структуре модели. Именно состоятельность и непротиворечивость базы правил обеспечивает адекватность имитации технологией ИИ переданных от человека знаний по оцениванию технического состояния электроаппаратуры РТК. В полной базе каждому сочетанию входных воздействий соответствует свой терм выходной величины. Полнота базы обеспечивается условием того, что с каждым возможным входным состоянием связано определенное выходное. При этом связка обосновывается логически. В рассматриваемом примере акцент делается именно на отсутствии противоречий и используется неполная база (табл. 1). По этой причине консеквент № 3 «величина потребляемого тока – слабая, а скорость РТК – высокая» противоречит здравому смыслу. Также исключено правило № 6.

Таблица 1

База правил модели нечеткого логического вывода

Номер правила	Входные величины		Нагруженность $Q(t)$
	величина потребляемого тока $I(t)$	скорость движения $v(t)$	
1	Слабый	Низкая	Легкая
2	Слабый	Средняя	Легкая
3	Слабый	Высокая	∅
4	Средний	Низкая	Тяжелая
5	Средний	Средняя	Умеренная
6	Средний	Высокая	∅
7	Большой	Низкая	Критическая
8	Большой	Средняя	Тяжелая
9	Большой	Высокая	Критическая

Затем реализуется непосредственно процедура нечеткого логического вывода с применением нечеткой импликации Мамдани, которая используется для определения отношения «если ..., то ...» между нечеткими множествами. Для оценивания значения нагруженности предлагается применить правило *modus ponens*: $\frac{A, A \rightarrow B}{B}$: если истинно высказывание A и из A следует B , то высказывание B будет тоже истинным [7]. Нечеткая импликация используется для определения отношения между входными данными и выводом. В общем виде процедура формализуется следующим образом:

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

$$\mu_R(I, v) = I(\mu_A(I), \mu_B(v)), \text{ как } I_M(a, b) = \min\{a, b\},$$

где $\mu_{Q(t)}(x)$ – текущее значение функции принадлежности для нагруженности $Q(t_i)$; $\sup T$ – верхняя граница треугольной конормы (t -конормы) объединения функций принадлежности входной и выходной величин $\mu_R(I, v)$; $I_M(a, b)$ – результат нечеткой импликации по Мамдани, реализующей логическое умножение значений функций принадлежности.

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 $\alpha_j = \min(\mu_A(I(t_i)) \vee \mu_B(v(t_i)))$;
- 3) определяется степень истинности следствий $\mu_{Q(t)_j}(x) = \min(\alpha_j, \mu_{Q(t)}(x))$;
- 4) строится композиция следствий: $MF(x) = \max(\mu_{Q(t)_j}(x))$.

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

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

Все перечисленные процедуры реализованы с использованием подпрограмм на языке *Python* из библиотеки *Skfuzzy*.

Для более корректного применения сформированного аппарата нечеткого логического вывода необходимо определиться с последовательностью действий по предварительной обработке сенсорных данных входных величин и интерпретацией непосредственно самой нагруженности $Q(t)$.

Временные ряды $I(t)$ и $v(t)$ предлагается подвергнуть процедуре обработки с использованием хорошо апробированного фильтра Калмана [8]. Математическое обоснование применения этого фильтра основывается на тезисе, что модель процесса характеризуется вектором состояния в определенные моменты времени. Оптимальным вариантом можно считать, что этот вектор в процессе применения фильтра должен включать в себя следующие параметры: текущее значение, скорость изменения значения (первая производная) и, по возможности, ускорение изменения значения (вторая производная).

Эти параметры позволяют моделировать динамику изменения показаний датчика и учитывать неопределенность в измерениях. Фильтр Калмана адаптирует состояние системы, используя информацию измерений и модели системы, чтобы предсказывать состояние системы в следующий момент времени с учетом шумов и неопределенности.

Для реализации возможности учета второй производной модели случайного процесса предлагается предварительная интерполяция временного ряда показаний дискретного датчика с использованием кубического сплайна, что позволит в процессе обработки временного ряда более точно оценивать значения второй производной и включать их в вектор состояния фильтра Калмана. Это, в свою очередь, способствует улучшению качества фильтрации и более точной оценке состояния системы на основе показаний цифрового датчика. Графики временных рядов, подвергнутые интерполяции с последующей фильтрацией, представлены на рис. 2. Все процедуры реализованы на языке *Python* с использованием подпрограмм из библиотеки *Pandas* [9].

В процессе имитации такой когнитивной функции, как восприятие самочувствия, воспроизводится попытка оценить свое текущее техническое состояние. Несмотря на динамичность его изменения, осознание должно охватывать определенный промежуток времени. Другими словами, необходимо попытаться имитировать какое-либо примитивное проявление такой человеческой способности, как память.

Исследования, проведенные в этой области, свидетельствуют, что наличие такого механизма, как эпизодическая память, предоставляет возможность хотя бы для реактивного поведения. Речь о выборе действий в соответствии с желаемым результатом пока не идет. Однако наличие памяти, создающей предпосылки для какого-либо планирования действий, может способствовать возникновению нового феномена – феномена сознания [10].

Результаты и выводы

Результаты исследования подтверждают, что выбор формируется бессознательно и становится осознанным примерно через полсекунды. Исходя из этого, для сглаживания временного ряда нагруженности $Q(t)$ предлагается использовать оператор простого скользящего среднего с окном продолжительностью 0,5 с. Пример визуализации обобщенной характеристики технического состояния представлен на рис. 2.

Помимо численной оценки качества электроаппаратуры через ее производительность предлагается индикация процесса изменения технического состояния путем сопоставления рассчитанного значения функции $Q(t)$ из диапазона $[0, 1]$ определенному оттенку спектра видимого диапазона оптического излучения [11, 12]. Легкую степень нагруженности предлагается окрасить в зеленый цвет,

критическому состоянию будет соответствовать темно-красный. Своевременное оповещение оператора о критическом состоянии электроаппаратуры комплекса позволит принять решение о назначении проактивного обслуживания в целях предотвращения перехода объекта в неработоспособное состояние.

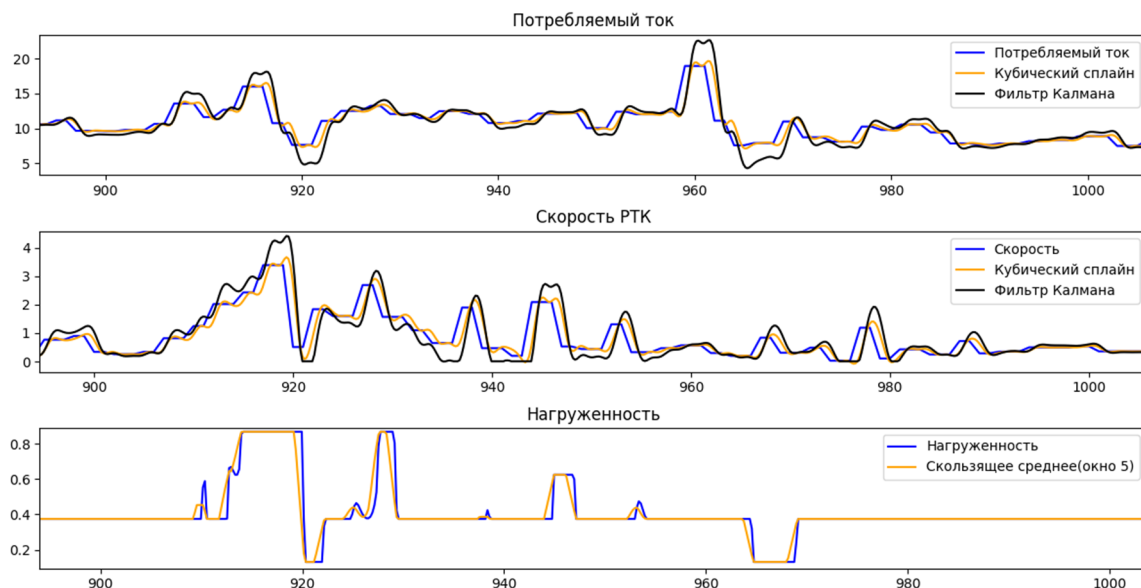


Рис. 2. Графики, поясняющие сглаженные временные ряды входных величин и нагрузки для электроаппаратуры транспортного РТК

Таким образом, одним из направлений создания системы ТО и Р для мобильных РТК, базирующейся на проактивной концепции, является интеграция в систему управления комплексов алгоритмов нечетких вычислений, позволяющих реализовать процедуру мониторинга технического состояния по обобщенному информативному параметру для решения задачи очувствления технического состояния.

Список литературы

1. Гаскаров Д. В., Голинкевич Т. А., Мозгалецкий А. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / под ред. Т. А. Голинкевича. М. : Сов. радио, 1974. 224 с.
2. Проактивная концепция ТОиР // Ассоциация EAM. URL: <https://eam.su/proaktivnaya-koncepciya-toir.html> (дата обращения: 27.05.2024).
3. Закономерности процессов износа деталей и узлов электрооборудования // Снабжение электротехническим оборудованием. URL: <https://www.ess-ltd.ru/diagnostics-electrical/zakonomernosti-protseessov-iznosa/> (дата обращения: 27.05.2024).
4. Стрижакова О. В., Орлов В. А., Фетисов О. Б. Про здоровье, самочувствие и работоспособность человека // Ученые записки университета имени П. Ф. Лесгафта. 2022. № 11. С. 535–539.
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. Демидова Г. Л., Лукичев Д. В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. СПб. : Университет ИТМО, 2017. 81 с.
7. Броневиц А. Г., Лепский А. Е. Нечеткие модели анализа данных и принятия решений : учеб. пособие. М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. 264 с.
8. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации : в 2 ч. СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. Ч. 2. 179 с.
9. Interpolating time series in Pandas using Cubic spline // Stack Overflow. URL: <https://stackoverflow.com/questions/13930367/interpolating-time-series-in-pandas-using-cubic-spline> (дата обращения: 08.07.2024).
10. Budson A. E., Richman K. A., Kensinger E. A. Consciousness as a Memory System // Cognitive and Behavioral Neurology. URL: https://journals.lww.com/cogbehavneurol/fulltext/2022/12000/consciousness_as_a_memory_system.5.aspx (дата обращения: 02.11.2024).
11. Грибер Ю. А., Юнг И. Л. Здоровье и болезнь: цветовые ассоциации в современной русской культуре // Человек и культура. 2018. № 5. С. 32–43. doi: 10.25136/2409-8744.2018.5.23491

12. Егжов Д. В., Надейкина Л. А., Терешко П. О. Система поддержки авиапассажиров с использованием технологий мониторинга их местоположения // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 124–129.

References

1. 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.)
2. Proactive MRO concept. *Assotsiatsiya EAM = EAM Association*. (In Russ.). Available at: <https://eam.su/proaktivnaya-koncepciya-toir.html> (accessed 27.05.2024).
3. Patterns of wear processes of parts and components of electrical equipment. *Snabzhenie elektrotekhnicheskim oborudovaniem = Supply of electrical equipment*. (In Russ.). Available at: <https://www.ess-ltd.ru/diagnostics-electrical/zakonomernosti-protessov-iznosa/> (accessed 27.05.2024).
4. Strizhakova O.V., Orlov V.A., Fetisov O.B. About human health, well-being and efficiency. *Uchenye zapiski universiteta imeni P.F. Lesgafta = Scientific notes of the P.F. Lesgaft University*. 2022;(11):535–539. (In Russ.)
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. Demidova G.L., Lukichev D.V. *Regulyatory na osnove nechetkoy logiki v sistemakh upravleniya tekhnicheskimi ob"ektami = Regulators based on fuzzy logic in control systems of technical facilities*. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2017:81. (In Russ.)
7. Bronevich A.G., Lepskiy A.E. *Nechetkie modeli analiza dannykh i prinyatiya resheniy: ucheb. posobie = Fuzzy models of data analysis and decision-making : textbook*. Moscow: Izd. dom Vysshey shkoly ekonomiki, 2022:264. (In Russ.)
8. Kononov A.A. *Osnovy traektornoy obrabotki radiolokatsionnoy informatsii: v 2 ch. = Fundamentals of trajectory processing of radar information: in 2 parts*. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2014;Pt.2:179. (In Russ.)
9. Interpolating time series in Pandas using Cubic spline. *Stack Overflow*. Available at: <https://stackoverflow.com/questions/13930367/interpolating-time-series-in-pandas-using-cubic-spline> (accessed 08.07.2024).
10. Budson A.E., Richman K.A., Kensinger E.A. Consciousness as a Memory System. *Cognitive and Behavioral Neurology*. Available at: https://journals.lww.com/cogbehavneurol/fulltext/2022/12000/consciousness_as_a_memory_system.5.aspx (accessed 02.11.2024).
11. Griber Yu.A., Yung I.L. Health and disease: color associations in modern Russian culture. *Chelovek i kul'tura = Man and Culture*. 2018;(5):32–43. (In Russ.). doi: 10.25136/2409-8744.2018.5.23491
12. Egzhov D.V., Nadeykina L.A., Tereshko P.O. Air passenger support system using location monitoring technologies. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(3): 124–129. (In Russ.)

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

Andrey V. Zayara

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

Максим Евгеньевич Данилин

генеральный директор,
Научно-производственное объединение «Аванти»
(Россия, г. Казань, ул. Тополевая, 57)
E-mail: metod@avgr.tech

Maksim E. Danilin

General director,
Scientific and Production Association "Avanti"
(57 Topolevaya street, Kazan, 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 01.05.2025