

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

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

УДК 623.486

doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14

### ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОАППАРАТУРЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

А. В. Заяра<sup>1</sup>, М. Е. Данилин<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Научно-производственное объединение «Аванти», Казань, Россия

<sup>1</sup> zaw1966@mail.ru, <sup>2</sup> metod@avgr.tech

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Современные робототехнические комплексы оснащаются сложной электроаппаратурой, на долю которой приходится более половины отказов, обусловленных деградиационными процессами. В целях предупреждения о приближении предельного состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов транспортного назначения необходимо проводить мониторинг. *Материалы и методы.* Рассматривается модель изменения технического состояния на основе нечеткого логического вывода, позволяющая реализовать задачи мониторинга. *Результаты и выводы.* Разработка мониторингового обеспечения на основе этой модели позволит увеличить срок эксплуатации робототехнических комплексов транспортного назначения.

**Ключевые слова:** электроаппаратура, изменение технического состояния, диагностирование, мониторинг, нечеткий логический вывод

**Для цитирования:** 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

### USE OF FUZZY LOGICAL OUTPUT FOR SIMULATING A PROCESS FOR CHANGING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF MOBILE ROBOTIC COMPLEXES

A.V. Zayara<sup>1</sup>, M.E. Danilin<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Scientific and Production Association "Avanti", Kazan, Russia

<sup>1</sup> zaw1966@mail.ru, <sup>2</sup> metod@avgr.tech

**Abstract.** *Background.* Modern robotic systems are equipped with complex electrical equipment, which accounts for more than half of the failures caused by degradation processes. Monitoring of the electrical equipment of mobile

robotic systems (RTCs) for transport purposes is necessary to warn of the approaching limit. *Materials and methods.* The model of change of technical condition based on fuzzy inference, allowing to implement monitoring tasks, is considered. *Results and conclusions.* The development of monitoring support based on this model will increase the life of the transport RTC.

**Keywords:** electrical equipment, change of technical condition, diagnosis, monitoring, fuzzy inference

**For citation:** Zayara A.V., Danilin M.E. Use of fuzzy logical output for simulating a process for changing the technical condition of electrical equipment of mobile robotic complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(2):120–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14

### Введение

Любая техническая система в определенный момент времени при определенных условиях внешней среды характеризуется фактическими значениями параметров, которые обычно контролируются в процессе технического диагностирования при техническом обслуживании (ТО). Для решения задач мониторинга всего комплекса предлагается использовать обобщенный информативный параметр, характеризующий техническое состояние системы. Он может определяться как агрегированная или синтезированная величина, которая отражает основные аспекты состояния системы на основе анализа различных диагностических параметров, включая физические, функциональные, электрические, механические или статистические показатели. Традиционно с этой целью используется функция состояния [1, 2], характеризующая качество комплекса и его работоспособность.

### Материалы и методы

В процессе моделирования электроаппаратура рассматривается как объект диагностирования и интерпретируется системой с  $n$  входами и  $m$  выходами (рис. 1). Все входные воздействия характеризуются множеством  $X = \bigcup_{i=1}^n X_i$ , которое описывает ту часть воздействующих факторов, которая определяет условия эксплуатации, начиная от погодных условий и заканчивая величиной сменной нагрузки. Разумеется, чем больше параметров будет учтено при формировании этого объединения, тем полнее и объективнее будет характеристика. Сюда же следует отнести и управляющие входные воздействия. В практике предварительной обработки сигналов для этих воздействий принимается гипотеза о стационарности изменения их во времени [1].

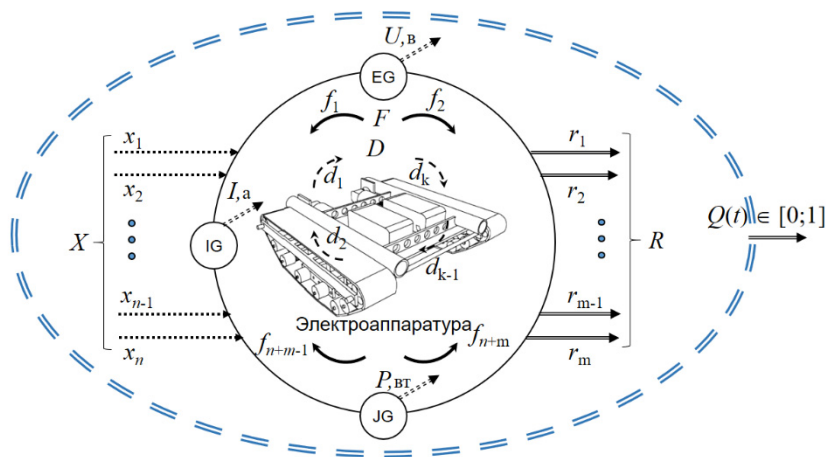


Рис. 1. Схема, поясняющая структуру системы технического состояния РТК

В качестве выходов объекта следует рассматривать показатели  $R = \bigcup_{j=1}^m r_j$ , характеризующие качество выполнения функциональных задач. Например, для транспортных РТК это будут скорость движения, быстродействие выполнения команд управления и т.д.

Проводя анализ электроаппаратуры как целостной системы, в качестве диагностических параметров предлагается рассматривать сигналы с проприоцептивных датчиков, предназначенных для

измерения внутреннего состояния комплекса. Совокупность этих показателей образует множество  $\Xi = \bigcup_{i=1}^p \xi_i$ , в котором каждый элемент  $\xi_i$  сопоставлен параметру, характеризующему техническое состояние электроаппаратуры комплекса в целом, например, величинам потребляемых тока ( $I$ ) или мощности ( $P$ ). Разумеется, каждая величина  $\xi_i$  подвергается измерительной операции. Погрешности измерительных цепей на данном этапе исследований предлагается не учитывать.

Все элементы множеств  $X$  и  $R$  находятся в постоянном взаимодействии между собой, так как электроаппаратура представляет собой динамическую систему. В процессе мониторинга можно попытаться выделить лишь частные аспекты влияния  $X$  на  $R$ , проявление которого оценивается посредством элементов множества  $\Xi$ , т.е. утверждение  $\Xi \subset R$  справедливо. Упомянутое взаимодействие дает основание сформулировать определение системы изменения технического состояния.

Динамическая система технического состояния – это совокупность процессов, способствующих эволюции электроаппаратуры в процессе функционирования (эксплуатации) РТК. Изменения технического состояния контролируются через постоянно варьируемые диагностические параметры, которые используются для непрерывного мониторинга их изменения и оценивания степени деградации. Анализ данной системы возможен на основе сбора и обработки информации о диагностических параметрах.

Термин «динамическая» в наименовании системы имеет особый семантический оттенок и характеризует способность системы изменять свои свойства со временем. В этом контексте динамика системы отражает ее функционирование и эволюцию. Идеальная динамическая система технического состояния должна быть способностью к адаптации, т.е. реагировать на изменения своих диагностических параметров и принимать меры для настройки или оптимизации работы в качестве реакции на эти изменения. Прилагательное «динамическое» подразумевает в качестве аргумента функции  $Q(t)$  реальное время. Следовательно, реакцией системы является ее отклик на события по изменению состояния контролируемого объекта за время, достаточное для идентификации порождающего эти события процесса, и обеспечивающая заданную достоверность его оценивания. Тогда логичной формой представления всех элементов множеств  $X$  и  $R$  (с учетом  $\Xi \subset R$ ) будут временные ряды, которые предлагается использовать в качестве исходных данных для анализа динамической системы изменения технического состояния.

Понятие динамики системы также означает, что внутри самой электроаппаратуры действуют факторы, вызывающие необратимые изменения, обусловленные процессами физико-химических превращений (старения). На схеме (рис. 1) они поясняются стрелками с обозначением  $d_i$ . Это счетное

множество  $D = \bigcup_{l=1}^k d_l$  определяет необратимые, деградационные изменения. Именно факторы  $d_i$  способствуют ухудшению технического состояния всего комплекса (старению). В международном стандарте<sup>1</sup> процесс старения рассматривается с точки зрения снижения производительности. Когда производительность комплекса опускается ниже минимума, который допускается пользователем, регистрируется функциональный отказ. И наоборот, если производительность ресурса удается поддерживать на уровне выше минимального, объект продолжает функционировать. Для объективной оценки протекания старения предлагается использовать функцию технического состояния.

Функция технического состояния электроаппаратуры  $Q(t)$  – это временной показатель, характеризующий качество объекта диагностирования через его производительность, которая, в свою очередь, определяется как внесистемная величина, равная отношению объема проделанной работы ко времени, за которое она была совершена. При этом следует отметить, что функция  $Q(t)$  не имеет никакого отношения к энтропии как функции состояния термодинамической системы.

Учитывая то обстоятельство, что непосредственный опыт применения функции технического состояния  $Q(t)$  отсутствует, предлагается следующая концепция. Рассматривая динамическую систему технического состояния в отношении современного мобильного РТК, аппаратная платформа которого позволяет разместить технологии ИИ, можно предположить, что применение метода аналогии позволит сравнить функцию технического состояния с самочувствием человека. Перенос ассоциации на знакомое каждому человеку понятие представляет возможность формализовать выходное

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

значение функции  $Q(t)$ . В данном случае использование аналогии между динамической системой изменения технического состояния робота и состоянием здоровья человека позволяет обнаружить параллели и подобия в технической и физиологической разновидностях функционирования и поддержки состояния. Предлагаемая концепция аргументированно служит основой для разработки системы диагностирования электроаппаратуры РТК на основе методов, используемых для мониторинга здоровья человека.

Прежде всего, предлагаемая концепция гармонично укладывается в рамки нечеткой логики. Значения любой величины в таком случае будут заменены термами. Применительно к оцениванию понятий (лингвистических переменных) «Самочувствие» или «Техническое состояние» логично представляются применимыми термы «Легкое», «Умеренное», «Тяжелое» и «Критическое». Для реализации лингвистической переменной необходимо определить точные физические значения ее термов. Предлагается нормировать «Техническое состояние» значением из диапазона от 0 до 1:  $Q(t) \in [0;1]$ .

Упомянутое динамическое взаимное влияние определяется факторами, образующими множество  $F$ . Рассматриваемые факторы представляют очевидные зависимости, обусловленные общими физическими закономерностями. В общем виде они формализуются как отображение

$$F: X \rightarrow R.$$

Каждый элемент этого множества дает обозначение своему отдельному отображению  $f_i$ , соответствующему своему правилу. Например, для транспортного робота, основной задачей которого является транспортировка груза справедливыми будут следующие правила и соответствующие отображения.

1. Увеличение веса груза  $m_{Гр}$  влечет повышение степени нагруженности РТК

$$f_1: m_{Гр} \rightarrow Q_m. \quad (1)$$

2. Возрастание скорости движения комплекса  $v_{РТК}$  способствует увеличению нагруженности

$$f_2: v_{РТК} \rightarrow Q_v. \quad (2)$$

3. Увеличение потребляемого аппаратурой тока свидетельствует о возрастании уровня нагруженности

$$f_3: I_{РТК} \rightarrow Q_A. \quad (3)$$

Явное количество правил  $f_i$  и будет определять мощность множества  $F$ .

Функция состояния формируется в результате анализа и оценки с последующим объединением очевидных информативных факторов, влияющих на состояние системы

$$Q = Q_m \cup Q_v \cup Q_A,$$

где  $Q_m$  – фактор влияния веса перевозимого груза на производительность мобильного РТК;  $Q_v$  – фактор влияния скорости движения комплекса на его состояние;  $Q_A$  – аргумент, позволяющий оценивать техническое состояние комплекса по величине потребляемого аппаратурой тока.

Его формализация также логично представляется в виде композиции отображений

$$Q = f_1 \circ f_2 \circ \dots \circ f_k \circ \dots \circ f_i \circ \dots \circ f_{n-1} \circ f_n,$$

где  $n$  – количество информативных факторов, участвующих в формировании системы.

Для разработки модели, которая должна описывать динамику изменения технического состояния, первоначально необходимо перевести неоднозначные физические закономерности, способствующие процессу необратимых изменений в электроаппаратуре (старению), постараться перевести в язык формальных математических формул типа отображений (1)–(3) [3]. Для создания интеллектуальных систем, способных адекватно взаимодействовать с человеком, рассматриваются приближенные рассуждения при описании процессов и явлений в динамической системе типа «слабый – средний – большой – запредельный». Эти рассуждения формализуются значениями функции принадлежности определенному нечеткому множеству для каждого элемента. Функция принадлежности может принимать значения только на отрезке  $[0,1]$ . Следует подчеркнуть, что функция принадлежности отражает субъективный взгляд специалиста на задачу, вносит индивидуальность в ее решение [4]. Общий вид функции принадлежности нечеткого множества задается характером моделируемого процесса,

а значения конкретных параметров функции принадлежности могут определяться посредством статистического или экспертного оценивания, или даже носить субъективный характер [5].

Для выполнения процедуры нечеткого логического вывода отображения (1), (2) и (3) представляются импликациями, последовательная композиция которых выполняется с использованием подпрограмм на языке *Python* из библиотеки *Skfuzzy* в соответствии со свойствами ассоциативности и коммутативности. Реализацию предлагаемого вывода значений функции состояния возможно осуществить на основе диагностико-информационной платформы (рис. 2).

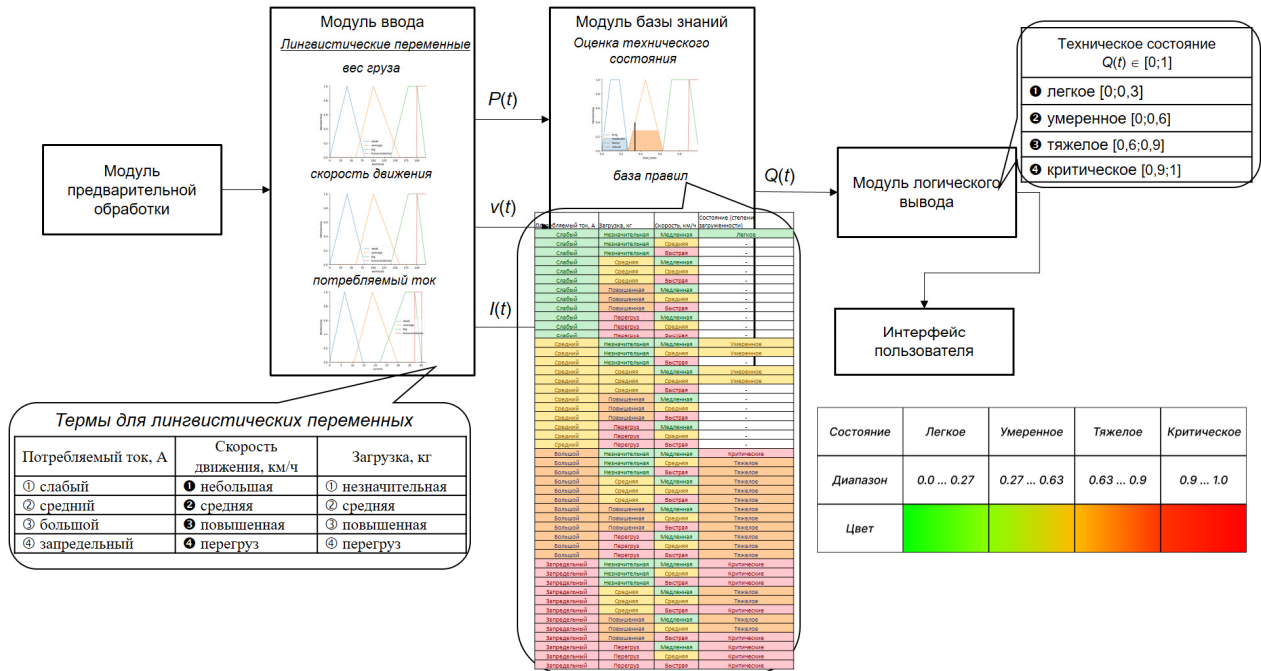


Рис. 2. Схема, поясняющая сущность процедуры определения значений функции технического состояния с использованием нечеткого логического вывода

Помимо численной оценки качества электроаппаратуры через ее производительность предлагается визуализация процесса изменения технического состояния путем сопоставления выведенного значения функции  $Q(t)$  из диапазона  $[0,1]$  определенному оттенку спектра видимого света [6, 7]. 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.

### Заключение

Таким образом, системный подход и аппарат нечеткой логики предоставляют возможность учитывать неопределенность и нечеткость исходных данных, что особенно актуально в процессе анализа динамических систем. С помощью нечетких правил и функций принадлежности можно определить градации состояний электроаппаратуры с учетом различных факторов.

### Список литературы

1. Гаскаров Д. В., Голинкевич Т. А., Мозгалевский А. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / под ред. Т. А. Голинкевича. М. : Сов. радио, 1974. 224 с.
2. Мишанов Р. О., Пиганов М. Н. Методика определения набора информативных параметров для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности радиоэлектронных средств // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 1. С. 93–104. doi: 10.21685/2307-4205-2017-1-12
3. Пенькова Т. Г., Вайнштейн Ю. В. Модели и методы искусственного интеллекта : учеб. пособие. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. 116 с.

4. Демидова Г. Л., Лукичев Д. В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. СПб. : Университет ИТМО, 2017. 81 с.
5. 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
6. Данилин М. Е., Заяра А. В., Федулов В. Д. Предложения по организации виртуальных испытаний алгоритмов распознавания объектов в системах управления мобильных робототехнических комплексов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 100–106.
7. Гришко А. К., Лысенко А. В., Кочегаров И. И. Логико-математические принципы мультиагентного управления интеллектуальными мобильными объектами и системами в динамической среде // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 4.

### References

1. Gaskarov D.V., Golinkevich T.A., Mozgalevskiy A.V. *Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti radioelektronnoy apparatury = Forecasting the technical condition and reliability of electronic equipment*. Moscow: Sov. radio, 1974:224. (In Russ.)
2. Mishanov R.O., Piganov M.N. Methodology for determining a set of informative parameters for individual forecasting of quality and reliability indicators of radioelectronic devices. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(1):93–104. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2017-1-12
3. Pen'kova T.G., Vaynshteyn Yu.V. *Modeli i metody iskusstvennogo intellekta: ucheb. posobie = Models and methods of artificial intelligence : a textbook*. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2019:116. (In Russ.)
4. 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 objects*. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2017:81. (In Russ.)
5. 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
6. Danilin M.E., Zayara A.V., Fedulov V.D. Proposals for the organization of virtual tests of object recognition algorithms in control systems of mobile robotic complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):100–106. (In Russ.)
7. Grishko A.K., Lysenko A.V., Kochegarov I.I. Logical and mathematical principles of multi-agent management of intelligent mobile objects and systems in a dynamic environment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(4).

### 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-кт, 41)  
E-mail: zaw1966@mail.ru

#### Максим Евгеньевич Данилин

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

#### Andrey V. Zayara

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

#### 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 05.02.2024**

**Поступила после рецензирования / Revised 20.02.2024**

**Принята к публикации / Accepted 03.03.2024**