

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА

© 2018 Ю.Е. Кувайскова

Ульяновский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 01.11.2018

Основной задачей диагностики является определение технического состояния объекта с целью обеспечения его надежного и безопасного функционирования. Предполагается, что имеется объект, техническое состояние которого характеризуется набором диагностических параметров. По значениям этих параметров необходимо оценить в каком состоянии находится объект: исправном или неисправном. Данная задача может быть решена, например, методами машинного обучения. Однако проблема состоит в том, что нельзя заранее определить, какой из методов машинного обучения обеспечит корректное решение задачи. В данной работе для диагностики технического состояния объекта предлагается использование методов нечеткой логики. Правила нечеткой логики позволяют моделировать систему в случае невозможности применения традиционных методов, а также вместо точных математических вычислений более эффективно использовать качественные оценки технического состояния объекта. Однако методы нечеткой логики не заменяют традиционные подходы, а наоборот, дополняют их. Для преобразования четких входных значений диагностических параметров объекта в нечеткие выходные, характеризующие техническое состояние объекта, используется алгоритм нечеткого логического вывода Мамдани. Для оценки эффективности использования нечеткой логики для диагностики технического состояния объектов при двух значениях выходной переменной используются критерии качества бинарной классификации:  $F$ -мера и критерий  $AUC$ . Эффективность предлагаемого подхода показана на примере диагностики технического состояния объекта по восьми заданным параметрам его функционирования с использованием нечеткой логики, а также базовыми методами машинного обучения (логистическая регрессия, дискриминантный анализ и наивный байесовский классификатор). Показано, что применение нечеткой логики позволяет повысить точность технической диагностики на 5%–8% по сравнению с базовыми методами машинного обучения.

*Ключевые слова:* нечеткая логика, диагностика, технический объект.

### ВВЕДЕНИЕ

Диагностика технического состояния объекта проводится с целью обеспечения его надежного и безопасного функционирования [1–3]. Чем точнее проведена диагностика, то есть точнее определено техническое состояние объекта, тем своевременнее можно принять меры к устранению неисправности (если она есть).

О техническом состоянии объекта можно судить по значениям набора контролируемых параметров его функционирования, образующим матрицу  $X$ , элементы которой  $x_{ij}$  – результат  $i$ -го наблюдения по  $j$ -му параметру;  $i = 1, \dots, l$ ,  $j = 1, \dots, p$  ( $l$  – объем наблюдений,  $p$  – число диагностических параметров объекта). Существует некоторая неизвестная зависимость между диагностическими параметрами объекта и его состояниями. При одних значениях параметров технический объект исправен, при других – неисправен. Техническое состояние объекта описывается вектором  $Y$ , принимающим значение

1, если объект исправен, и 0 при неисправном состоянии объекта.

Задача сводится к оценке технического состояния объекта (исправное или неисправное) по заданным значениям диагностических параметров.

Данная задача может быть решена, например, методами машинного обучения [4–6]. Однако при их использовании нельзя заранее определить, какой из методов обеспечит корректное решение задачи. Поэтому при решении конкретных задач проводят апробацию множества методов машинного обучения, что иногда бывает трудоемко.

Также для оценки и прогнозирования состояния объекта по множеству параметров его функционирования применяются методы регрессионного моделирования и анализа временных рядов [7–10]. Результатом данных методов является массив прогнозируемых численных значений контролируемых параметров объекта, который необходимо дополнительно исследовать для получения оценок состояния объекта.

В данной работе для диагностики технического состояния объекта предлагается использование методов нечеткой логики [11–14]. Пра-

*Кувайскова Юлия Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и информатика». E-mail: u.kuvaiskova@mail.ru*

вила нечеткой логики позволяют моделировать систему в случае невозможности применения традиционных методов, а также вместо точных математических вычислений более эффективно использовать качественные оценки технического состояния объекта. Однако методы нечеткой логики не заменяют традиционные подходы, а наоборот, дополняют их.

Целью работы является исследование эффективности применения методов нечеткой логики для технической диагностики объектов.

### НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА

Для описания параметров функционирования объекта (входных переменных) вводится лингвистическая переменная, принимающая два нечетких значения «отлично» и «плохо». Переменной присваивается нечеткий терм «отлично», если регистрируемое значение параметра объекта находится в отрезке допустимых значений. Если значение параметра выходит за критические границы, то лингвистическая переменная принимает значение «плохо». Критические границы диагностических параметров определяются экспертом.

Для описания термов лингвистической переменной диагностических параметров объекта вводятся функции принадлежности [11–14].

Для термина «отлично» применяется z-подобная функция принадлежности:

$$\mu_z = \begin{cases} 1, x \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, \frac{a+b}{2} < x < b \\ 0, b \leq x \end{cases}, \quad (1)$$

для термина «плохо» – s-подобная функция:

$$\mu_s = \begin{cases} 0, x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, \frac{a+b}{2} < x < b \\ 1, b \leq x \end{cases}. \quad (2)$$

Переменная выхода, описывающая техническое состояние объекта, задается двумя нечеткими терминами: «исправное состояние» и «неисправное состояние».

На следующем этапе формируется база знаний (правил) с использованием нечетких высказываний вида «β есть α» и связок «И», «Если..., то...».

Логика составления базы знаний следующая. Предполагается, что если значение хотя бы одного из параметров выходит за критические границы, то диагностируется неисправное состояние объекта, если значения всех параметров находятся в области допустимых значений, то диагностируется исправное состояние объекта.

В этом случае нечеткая база знаний имеет следующий вид:

**Правило 1:** если параметр  $x_1$  есть «отлично» и параметр  $x_2$  есть «отлично» и параметр  $x_3$  есть «отлично» и ... и параметр  $x_p$  есть «отлично», то  $Y$  есть «исправное состояние»;

**Правило 2:** если параметр  $x_1$  есть «плохо» и параметр  $x_2$  есть «отлично» и параметр  $x_3$  есть «отлично» и ... и параметр  $x_p$  есть «отлично», то  $Y$  есть «неисправное состояние»;

**Правило 3:** если параметр  $x_1$  есть «отлично» и параметр  $x_2$  есть «плохо» и параметр  $x_3$  есть «отлично» и ... и параметр  $x_p$  есть «отлично», то  $Y$  есть «неисправное состояние»;

...

**Правило  $2^p$ :** если параметр  $x_1$  есть «плохо» и параметр  $x_2$  есть «плохо» и параметр  $x_3$  есть «плохо» и ... и параметр  $x_p$  есть «плохо», то  $Y$  есть «неисправное состояние».

Для преобразования четких входных значений в нечеткие выходные используется алгоритм нечеткого логического вывода Мамдани [11–13], который имеет следующие шаги.

1. **Фаззификация** численных значений параметров объекта. Пусть входные переменные приняли некоторые конкретные (четкие) значения  $x_1, \dots, x_p$ . Для каждого из предпосылок базы правил с помощью функций принадлежности (1) и (2) вычисляются степени истинности:

$$\mu_j = \mu(x_j), j = 1, \dots, p.$$

2. **Логический вывод.** Для каждого правила системы нечеткого вывода, включающего предпосылки, связанные между собой при помощи логической операции «И», определяются степени истинности заключений как минимальное значение истинностей всех его предпосылок:

$$\alpha_k = \min_{1 \leq j \leq p} \mu_j, k = 1, \dots, 2^p.$$

3. **Композиция.** Нечеткие значения выходной переменной каждого заключения базы правил объединяются в итоговое нечеткое подмножество с использованием операции логического максимума степеней истинности.

4. **Определение результата.** Из полученного нечеткого множества значений переменной выхода методом левого (правого) максимума определяется конечное диагностируемое техническое состояние объекта в виде нечеткого термина: «исправное состояние» или «неисправное состояние».

Для оценки эффективности использования нечеткой логики для диагностики техническо-

го состояния объектов при двух значениях выходной переменной могут быть использованы критерии, что и для оценки качества бинарной классификации [15].

В случае, когда в выборке число исправных состояний объекта значительно превышает число неисправных, применяются такие характеристики, как точность  $P$  и полнота  $R$ :

$$P = \frac{TP}{TP + FP}, R = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (3)$$

где  $TP$  – количество правильно диагностированных исправных состояний;  $FP$  – количество неправильно диагностированных исправных состояний;  $FN$  – количество неправильно диагностированных неисправных состояний объекта.

На основе этих показателей вычисляется  $F$ -мера:

$$F = \frac{2R}{P + R}. \quad (4)$$

При близости величины  $F$  к единице считается, что качество диагностики выше.

Критерий  $AUC$  характеризует площадь, ограниченную ROC-кривой и осью доли неправильно диагностированных исправных состояний [15].

В случае двух классов состояний объекта (исправное и неисправное) критерий  $AUC$  вычисляется по формуле:

$$AUC = \frac{1 + TPR - FPR}{2}, \quad (5)$$

где  $FPR$  – доля неправильно диагностированных исправных состояний,  $TPR$  – доля правильно диагностированных исправных состояний.

Чем выше показатель  $AUC$ , тем качественнее результаты диагностики.

$AUC$ . Результаты исследования представлены в таблице 1.

Из результатов проведенного исследования следует, что по  $F$ -мере лучший результат диагностики технического состояния объекта показал метод нечеткого логического вывода. По критерию  $AUC$  результат, полученный методами нечеткой логики, оказался эквивалентным результату, полученному методом логистической регрессии, и лучше, чем для остальных методов.

Итак, применение нечеткой логики позволяет повысить точность диагностики на 5%–8% по сравнению с базовыми методами машинного обучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для диагностики технического состояния объекта предложено использование методов нечеткой логики, достоинствами которых является возможность их использования даже в случае трудоемкости или невозможности проведения точных вычислительных расчетов. Однако методы нечеткой логики не заменяют традиционные подходы, а наоборот, дополняют их.

Эффективность предлагаемого подхода продемонстрирована на примере диагностики технического состояния объекта по восьми заданным параметрам его функционирования. Оказалось, что применение нечеткой логики позволяет повысить точность диагностики на 5%–8% по сравнению с базовыми методами машинного обучения.

Описанный подход может быть использован специалистами для технической диагностики объектов во многих технических приложениях, в частности, в авиации.

Таблица 1. Критерии качества

Методы диагностики	$F$ -мера	$AUC$
Логистическая регрессия	0,845	0,796
Дискриминантный анализ	0,815	0,708
Наивный байесовский классификатор	0,817	0,736
Нечеткая логика	0,885	0,795

## ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для оценки эффективности предлагаемого подхода была проведена диагностика технического состояния объекта по восьми заданным параметрам его функционирования с использованием нечеткой логики, а также базовыми методами машинного обучения (логистическая регрессия, дискриминантный анализ и наивный байесовский классификатор).

Для решения задачи использовались пакеты прикладных программ Mathcad и Matlab. Критериями качества служили  $F$ -мера и критерий

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
2. Кувайскова Ю.Е., Алешина А.А. Техническая диагностика объектов с использованием методов нечеткой логики // Радиотехника. 2017. № 6. С. 32–34.
3. Крашенинников В.Р., Бубыр Д.С., Клячкин В.Н. Повышение надежности системы управления водоочисткой при использовании программного блока раннего предупреждения о нарушении показателей качества воды // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 2. С. 61–66.
4. Теория и практика машинного обучения : учебное

- пособие / В.В. Воронина, А.В. Михеев, Н.Г. Ярушкина, К.В. Святков. Ульяновск: УлГТУ, 2017. 290 с.
5. Witten I.H., Frank E. Data mining: practical machine learning tools and techniques. 2nd ed. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2005. 525 p.
  6. Breiman L. Bagging Predictors // Machine Learning. 1996. V. 24 (2). P. 123-140.
  7. Родионова Т.Е. Применение адаптивного регрессионного моделирования для описания функционирования технического объекта // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 6-2. С. 572-575.
  8. Родионова Т.Е. Применение структурно-параметрической идентификации для описания функционирования технического объекта // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. 2015. № 1-2 (9). С. 208-210.
  9. Кадырова Г.Р. Оценка и прогнозирование состояния технического объекта по регрессионным моделям // Автоматизация процессов управления. 2015. № 4 (42). С. 90-95.
  10. Кувайскова Ю.Е. Моделирование динамики состояния объекта на основе адаптивных динамических регрессий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 6-2. С. 479-482.
  11. Kuvayskova Y.E. The Prediction Algorithm of the Technical State of an Object by Means of Fuzzy Logic Inference Models // Procedia Engineering. «3rd International Conference «Information Technology and Nanotechnology», ITNT 2017». 2017. С. 767-772.
  12. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 166 с.
  13. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М: Горячая линия-Телеком, 2007. 288 с.
  14. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. М.: Финансы и статистика, 2004. 320 с.
  15. Шунина Ю.С., Алексеева В.А., Клячкин В.Н. Критерии качества работы классификаторов // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2015. № 2 (70). С. 67-70.

## USING FUZZY LOGIC TO DIAGNOST THE TECHNICAL STATE OF AN OBJECT

© 2018 Yu.E. Kuvayskova

Ulyanovsk State Technical University

The main task of diagnostics is to determine the technical state of the object in order to ensure its reliable and safe operation. It is assumed that there is an object, the technical state of which is characterized by a set of diagnostic parameters. From the values of these parameters is necessary to evaluate the state of the object: serviceable or unserviceable. This problem can be solved, for example, by methods of machine learning. However the problem consists in what can't be defined in advance what of methods of machine learning will provide the correct solution of a task. In this paper, the use of fuzzy logic methods is proposed for diagnosing the technical state of an object. The rules of fuzzy logic make it possible to model the system in the case of the impossibility of applying traditional methods, and also, instead of exact mathematical calculations, it is more efficient to use qualitative assessments of the technical state of the object. However, fuzzy logic methods do not replace traditional approaches, but, on the contrary, complement them. To convert the clear input values of the diagnostic parameters of the object into fuzzy output, characterizing the technical state of the object, the Mamdani fuzzy inference algorithm is used. To assess the effectiveness of using fuzzy logic to diagnose the technical state of objects with two values of the output variable, the quality criteria of the binary classification are used: the F-measure and the AUC criterion. The effectiveness of the proposed approach is shown by the example of diagnosing the technical state of an object using eight specified parameters of its operation using fuzzy logic, as well as basic machine learning methods (logistic regression, discriminant analysis and a naive Bayes classifier). It is shown that the use of fuzzy logic can improve the accuracy of technical diagnosis by 5%–8% compared with the basic methods of machine learning.

*Keywords:* fuzzy logic, diagnostics, technical object.