

УДК 004.032.26

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ В КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Т. Н. Круглова

tatyana.kruglova.02@mail.ru

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова»

Поступила в редакцию 25.02.2019

**Аннотация.** Посвящена разработке киберфизической системы диагностирования электродвигателей технологического оборудования. Представлена структура киберфизической системы диагностирования, включающая пять уровней. Описан каждый уровень данной системы. Основное внимание уделено задаче принятия решения по оптимальному управлению технологическим оборудованием в зависимости от текущего состояния его электродвигателей. В качестве примера рассмотрена задача управления мобильным роботом с дифференциальным приводом. На базе аппарата нечеткой логики разработана модель принятия решения, позволяющая в зависимости от текущего состояния каждого из приводов выбрать способ управления мобильным роботом.

**Ключевые слова:** киберфизическая система диагностирования; технологическое оборудование; электроприводы; интеллектуальное принятие решения; нечеткая логическая модель.

### ВВЕДЕНИЕ

Надежное функционирование технологического оборудования требует постоянного контроля технического состояния всех его приводов с дальнейшей оптимизацией режима их работы и, следовательно, всего технологического процесса в целом. Решение данной задачи может быть достигнуто с помощью встроенной в корпус двигателей системы диагностирования технического состояния, которая осуществляет непрерывное измерение их рабочих параметров с последующим анализом полученной информации. Также такая система должна определять текущее и будущее техническое состояние и оптимизировать рабочие параметры объекта. Реализация этого подхода предполагает интеграцию вычислительных ресурсов в физические процессы, т.е. применение киберфизических систем [1]. В такие системы входят: ме-

ханическое оборудование, датчики и информационные системы, которые связаны на всех этапах жизненного цикла оборудования и взаимодействуют друг с другом с помощью стандартных интернет-протоколов. Это позволяет управлять оборудованием с учетом текущего и прогнозного состояния его электродвигателей, прогнозировать и адаптировать к изменениям условий эксплуатации и технического состояния оборудования.

### КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Структурная схема киберфизической системы диагностики технологического оборудования показана на рис. 1.

Киберфизическая система диагностирования имеет пять уровней: 1 – уровень соединения; 2 – уровень конверсии; 3 – облачный уровень; 4 – уровень познания; 5 – уровень конфигурации [2].

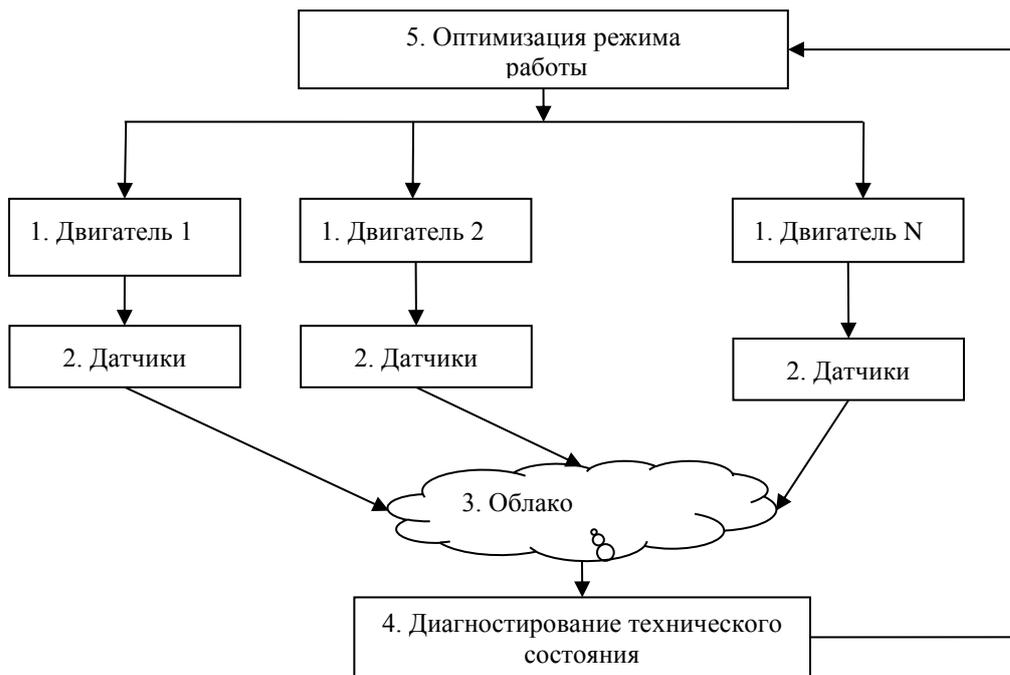


Рис. 1. Структура киберфизической системы диагностирования технологического оборудования

На уровне «Соединение» осуществляется выбор и установка датчиков, которые могут быть сконструированы для самоподключения и самоконтроля за состоянием объекта.

На уровне «Конверсия» данные от устройств с автономным подключением и датчиков измеряют характеристики критических проблем, и производится выбор методов анализа полученной информации, которые будут использованы для определения возможных неисправностей.

Хранение и обработка больших объемов диагностической информации осуществляется в облачных серверах. Это позволит осуществить информационную связь между приводами различных строительных роботов, что позволит оптимизировать технологический процесс с учетом состояния отдельного исполнительного элемента.

На уровне «Познание» выбираются методы диагностирования электродвигателей технологического оборудования [3], которые должны удовлетворять следующим требованиям:

- возможность оценки технического состояния в режиме реального времени;
- минимальный состав измеряемых параметров;

- отсутствие сложного громоздкого измерительного оборудования, установленного на корпусе привода, что может повлиять на работу технологического оборудования;

- возможность использования на движущемся объекте с повышенной влажностью и запыленностью;

- применимость для двигателей постоянного и переменного тока;

- возможность автоматического анализа измеренных параметров;

- возможность отличать неисправность от смены режима работы электродвигателя;

- возможность записывать и хранить результаты диагностики на облачном сервере и предоставлять пользователю интернет-протокол.

Результаты диагностики используются для дальнейшей оптимизации режима работы технологического оборудования.

На уровне «Конфигурация» происходит оптимизация работы объекта диагностирования с учетом фактического состояния его электродвигателей.

Таким образом, для разработки киберфизической системы диагностирования необходимо:

- осуществить выбор контролируемых параметров и средств их измерения;

- разработать методы диагностирования, удовлетворяющие перечисленным выше требованиям;
- разработать систему принятия решения по результатам диагностирования для последующей оптимизации работы технологического оборудования.

### МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Анализ основных дефектов электродвигателей постоянного и переменного тока [4] показал, что большинство электрических и механических неисправностей может быть обнаружено путем контроля тока электродвигателя. Данный параметр может быть измерен без применения специальных датчиков, используя обмотку электродвигателя в качестве источника диагностической информации [5].

Для анализа временного токового сигнала в настоящее время широко используется Фурье-преобразование [6], которое имеет ряд существенных недостатков [7], делающих его не применимым для анализа сигналов, содержащих динамически изменяющуюся нагрузку. В качестве альтернативного способа анализа сигналов тока электродвигателя применен вейвлет-анализ, который рассматривает временные функции в терминах колебаний, локализованных по времени и частоте, обеспечивая их двумерную развертку. При этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные, что дает возможность анализа сигналов во временном и частотном диапазоне одновременно. Вейвлет-функции базиса позволяют сконцентрировать внимание на тех или иных локальных особенностях анализируемых процессов, которые не могут быть выявлены с помощью традиционных преобразований Фурье и Лапласа. При этом масштаб вейвлета, как единица шкалы частотно-временного представления сигналов, обратно пропорционален частоте Фурье-анализа [7], следовательно, знания, накопленные за годы применения Фурье-преобразования для анализа сигналов, могут быть применены для вейвлет-анализа после

соответствующего перерасчета частот Фурье-преобразования в масштаб вейвлета.

В результате большого количества экспериментов, выполненных на двигателях постоянного и переменного тока с различными неисправностями и условиями нагружения, удалось установить закономерность изменения вейвлет-коэффициентов на характерных масштабах от наличия неисправностей и изменения нагрузки на электродвигатель. Данная закономерность справедлива для сигналов тока, напряжения и виброскорости двигателей постоянного и переменного тока [4].

Полученные пять характерных сигналов могут быть использованы для разработки системы метода интеллектуального диагностирования электродвигателей, позволяющей выполнить автоматическую классификацию сигналов [8]. Для этого моделируется нейронная сеть прямой передачи сигнала (рис. 2), входами которой являются значения вейвлет-коэффициентов – используются по характерной шкале, нехарактерной для отказа, выходами – классы диагноза: «11» – исправен не нагружен; «12» – исправен нагружен; «21» – неисправен не нагружен; «22» – неисправен нагружен.

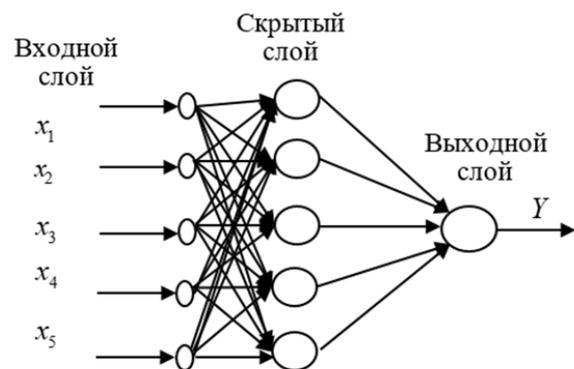


Рис. 2. Структура нейронной сети классификации вейвлет-коэффициентов

Для обучения нейронной сети использован алгоритм Левенберга–Марквардта [9], предназначенный для оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей. Этот алгоритм заключается в последовательном приближении заданных начальных значений параметров к требуемому ло-

кальному оптимуму. Установлен обучающий выбор, состоящий из множества пар свободной переменной  $x \in X^M$  (входные данные сети) и зависимой переменной  $y \in Y^M$  (целевой вектор).

Установлена функциональная зависимость, представляющая регрессию  $u = f(\omega, x_n)$ , непрерывно дифференцируемую в области  $W \times X$ . Параметр  $\omega$  является вектором весовых коэффициентов.

Требуется найти такое значение вектора  $\omega$ , которое поставило бы локальный минимум функции ошибки:

$$E_D = \sum_{n=1}^N (y_n - f(\omega, x_n))^2.$$

Перед началом работы алгоритма задается начальный вектор весовых коэффициентов  $\omega$ .

На каждом шаге итерации этот вектор заменяется вектором  $\omega + \Delta\omega$ . Для оценки приращения  $\Delta\omega$  используется линейная функция:

$$f(\omega + \Delta\omega, x_n) \approx f(\omega, x_n) + J\Delta\omega,$$

где  $J$  – Якобиан функции  $f(\omega, x_n)$  в точке  $\omega$ , который может быть представлен наглядно в виде:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(\omega, x_1)}{\partial \omega_1} & \frac{\partial f(\omega, x_1)}{\partial \omega_R} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial f(\omega, x_N)}{\partial \omega_1} & \frac{\partial f(\omega, x_N)}{\partial \omega_R} \end{bmatrix},$$

где  $\omega = [\omega_1, \dots, \omega_R]^T$  – вектор весов сети.

Приращение  $\Delta\omega$  в точке  $\omega$ , доставляющий минимум  $E_D$ , равно нулю, поэтому для нахождения последующего значения приращения  $\Delta\omega$  приравнивается к нулю вектор частных производных  $E_D$  по весу  $\omega$ .

$$E_D = |y - f(\omega + \Delta\omega)|^2,$$

где  $y = [y_1, \dots, y_N]^T$

$$f(\omega + \Delta\omega) = [f(\omega + \Delta\omega, x_1), \dots, f(\omega + \Delta\omega, x_N)]^T.$$

Преобразование и дифференцирование этого уравнения:

$$\begin{aligned} |y - f(\omega + \Delta\omega)|^2 &= (y - f(\omega + \Delta\omega))^T (y - f(\omega + \Delta\omega)) = \\ &= f^T(\omega + \Delta\omega) f(\omega + \Delta\omega) - 2y^T f(\omega + \Delta\omega) + y^T y \end{aligned}$$

получим:

$$\frac{\partial E_D}{\partial \omega} = (J^T J) \Delta\omega - J^T (y - f(\omega)) = 0.$$

Таким образом, чтобы найти значение  $\Delta\omega$ , необходимо решить систему линейных уравнений

$$\Delta\omega = (J^T J)^{-1} J^T (y - f(\omega)).$$

Поскольку число условий матрицы  $J^T J$  является квадратом числа условий матрицы  $J$ , то матрица  $J^T J$  может быть вырожденной, следовательно, параметр регуляризации Маркварда  $\lambda \geq 0$

$$\Delta\omega = (J^T I)^{-1} J^T (y - f(\omega)),$$

где  $I$  – единичная матрица.

Этот параметр задается на каждой итерации алгоритма. Если значение ошибки  $E_D$  уменьшается быстро, малое значение  $\lambda$  сводит этот алгоритм к алгоритму Гаусса–Ньютона.

Алгоритм останавливается в том случае, если приращение  $\Delta\omega$  на последующей итерации меньше существующего значения, или если вектор весовых коэффициентов  $E_D$  дает ошибку меньше заданной, или если количество циклов обучения нейронной сети исчерпано. Значение вектора  $\omega$  на последней итерации считается обязательным.

Таким образом, получен метод интеллектуального диагностирования электродвигателей технологического оборудования, позволяющий с помощью совместного применения вейвлет-анализа и нейронных сетей определить техническое состояние и режим функционирования оборудования.

Алгоритм применения данного метода представлен на рис. 3.

Реализация данного метода в составе киберфизической системы позволит получить информацию для дальнейшей оптимизации работы оборудования.

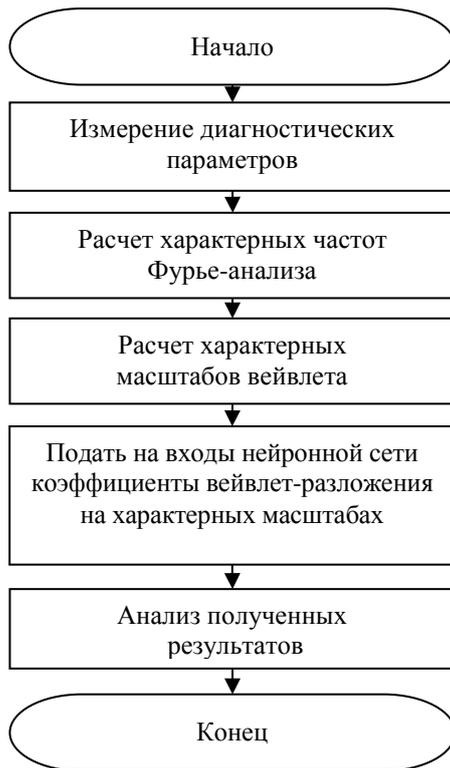


Рис. 3. Алгоритм диагностирования технического состояния приводов робота

#### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

После того как определено техническое состояние каждого электродвигателя, возникает необходимость выбора режима работы технологического оборудования, в составе которого они работают. В качестве примера рассмотрим мобильный робот с четырьмя независимыми электроприводами «мотор-колесо» [8]. В общем случае четырехколесный мобильный робот с дифференциальным приводом (рис. 4) может перемещаться в пространстве одним из трех способов: с помощью колес  $D^1$  и  $D^2$  (передний привод); с помощью колес  $D^3$  и  $D^4$  (задний привод); с помощью всех четырех колес одновременно (полный привод).

Согласно предложенной модели диагностирования, текущее состояние каждого двигателя может быть отнесено к одному из следующих классов диагнозов: «11» – исправен не нагружен; «12» – исправен нагружен; «21» – неисправен не нагружен или «22» – неисправен нагружен.

Предпочтительным режимом работы робота является полный привод, поэтому в случае исправного не нагруженного состояния всех двигателей робота,  $D^1 = D^2 = D^3 = D^4 = \langle 11 \rangle$  целесообразно выбрать данный режим.

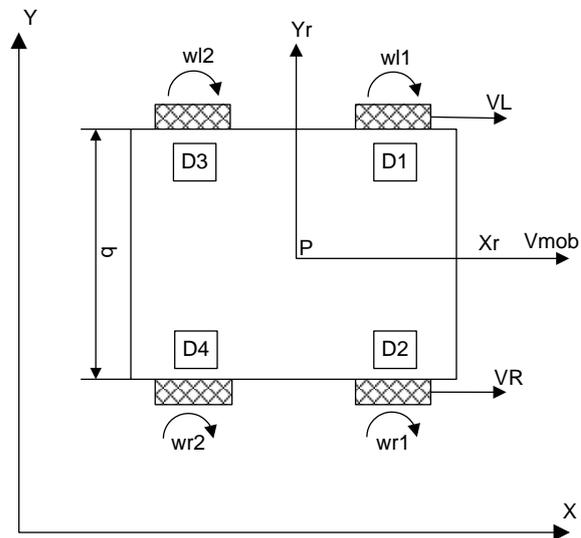


Рис. 4. Модель четырехколесного мобильного робота с дифференциальным приводом

В случае исправного нагруженного режима работы «12» всех четырех, а также одноименных (правых или левых) двигателей также целесообразно применять полный привод без изменения режима работы остальных двигателей. При нагруженном исправном состоянии передних приводов  $D^1, D^2$ , когда робот едет по уклону вниз, необходимо увеличить нагрузку на задние двигатели  $D^3, D^4$ . Если нагружены задние двигатели  $D^3, D^4$ , что соответствует движению по уклону вверх, необходимо увеличить скорость вращения передних двигателей  $D^1, D^2$ . При исправном нагруженном состоянии одного из передних двигателей  $D^1$  или  $D^2$ , что характерно при застревании колеса, необходимо увеличить скорость вращения заднего одноименного колеса  $D^3$  или  $D^4$  соответственно. Если застряло заднее колесо  $D^3$  или  $D^4$ , то необходимо увеличить нагрузку на оба передних колеса  $D^1$  и  $D^2$ .

Изменение режима управления происходит при неисправном состоянии «21» или «22» одного из приводов. Так, при отказе одного или двух задних приводов необходимо перейти на передний привод. При от-

казе одного или обоих передних двигателей, необходимо перейти на задний привод или развернуться на 180 °С, тем самым перейдя на передний привод. В случае отказа одного переднего и одного заднего привода необходимо прекратить эксплуатацию робота.

Приведенная логика управления может быть реализована с помощью нечеткой логической модели *Mamdani* [9], имеющая четыре входа и четыре выхода. В качестве входов задаются возможные четыре состояния для каждого из электродвигателей (рис. 5, а), выходами – текущий режим работы каждого из приводов мобильного робота (рис. 5, б). Диапазон определения выходных переменных задается в диапазоне  $[-1; 1]$ . При этом – значение «-1» соответствует отключению двигателя; «0» – использовать текущий режим; «1» увеличение скорости вращения двигателя.

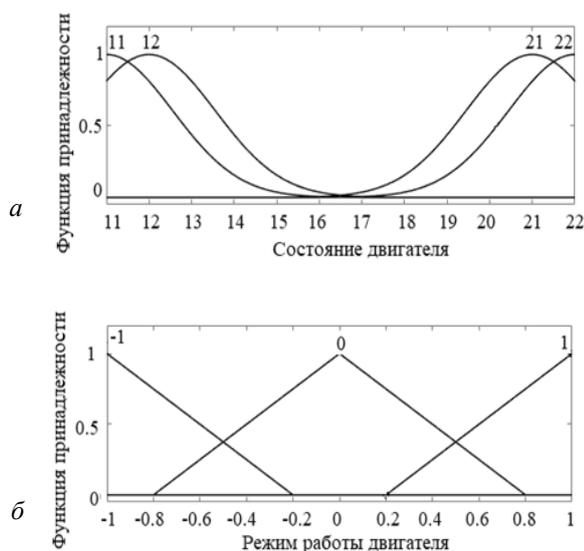


Рис. 5. Функции принадлежности нечеткой модели принятия решений:

а – входные функции; б – выходные функции

Выходное решение по управлению каждым из четырех колес может быть получено с помощью алгоритма [9], который имеет следующий вид:

1. Предполагается, что входные переменные приняли некоторые конкретные (четкие) значения  $x_1^0, x_2^0, x_3^0, x_4^0$ , и находятся уровни «отсекания» для предпосылок каждого из правил:

$$\alpha_1 = \min[A_1(x_1^0), A_1(x_2^0), A_1(x_3^0), A_1(x_4^0)] ;$$

$$\alpha_2 = \min[A_2(x_1^0), A_2(x_2^0), A_2(x_3^0), A_2(x_4^0)] ;$$

$$\alpha_3 = \min[A_3(x_1^0), A_3(x_2^0), A_3(x_3^0), A_3(x_4^0)] ;$$

$$\alpha_4 = \min[A_4(x_1^0), A_4(x_2^0), A_4(x_3^0), A_4(x_4^0)] .$$

2. Для каждого правила вычисляются индивидуальные выходы

$$y_1^* = f_1 ; \dots\dots\dots y_n^* = f_n .$$

3. Вычисляется агрегатный выход нечеткой логической системы

$$y_i^* = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot y_i^*}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} .$$

Примером графической интерпретации данного нечеткого логического вывода является поверхность отклика (рис. 6).

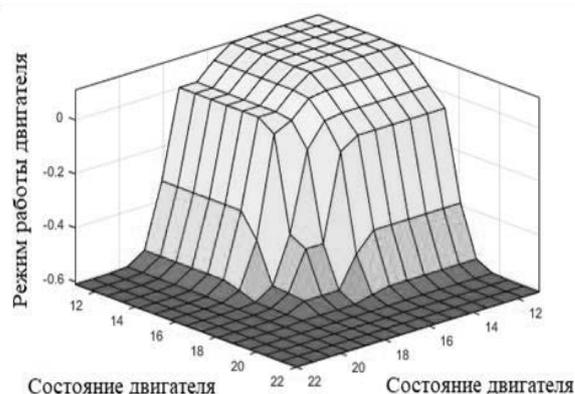


Рис. 6. Поверхность отклика интеллектуальной модели принятия решения

Результат работы модели может быть интерпретирован следующим образом.

После подстановки коэффициентов, показывающих текущее состояние каждого электропривода, для каждого из четырех приводов будет определен коэффициент, определяющий требуемый режим работы. Отрицательное значение показывает, что двигатель необходимо отключить. Значение, близкое к нулю, показывает, что режим работы необходимо оставить без изменения. Число, близкое к 1, показывает на необходимость увеличить скорость вращения двигателя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результаты разработки интеллектуальной модели принятия решений по управлению дифференциальным мобильным роботом с учетом технического состояния его электродвигателей. Данная модель позволяет по результатам диагностирования и определения режима нагружения каждого электродвигателя выбрать способ управления роботом, изменив скорость вращения одного или нескольких двигателей, а также переключаться с полноприводного управления на передний или задний привод, что позволит повысить ресурс мобильного робота.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cyber-physical** systems: Concepts, technologies and implementation principles in Tools and Methods / Horvath W. et. al. // Competitive Engineering Symposium (TMCE) 2012, p. 19–36. [ W. Horvath, et. al., “Cyber-physical systems: Concepts, technologies and implementation principles in Tools and Methods” in *Competitive Engineering Symposium (TMCE)*, pp. 19-36, 2012. ]

2. **Bulgakov A., Kruglova T., Bock T.** A Cyber-physical System of Diagnosing Electric Drives of Building Robots // 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, (ISARC 2018), (Berlin, July 22-25 2018.) P. 8-15. [ A. Bulgakov, T. Kruglova, T. Bock, “A Cyber-physical System of Diagnosing Electric Drives of Building Robots” in *35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, (ISARC 2018)*, pp. 8-15, 2018. ]

3. **Bulgakov A., Kruglova T.** Intelligent method of Electric drive diagnostic with due Account for its operation mode // Journal of Applied Engineering Science – 2017. № 4 (15). pp. 426-432. [A. Bulgakov, T. Kruglova “Intelligent method of Electric drive diagnostic with due Account for its operation mode” in *Journal of Applied Engineering Science*, no. 4 (15). pp. 426-432, 2017. ]

4. **Bulgakov A., Kruglova T., Bock T.** Synthesis of the AC and DC Drives Fault Diagnosis Method for the Cyber-physical Systems of Building Robots // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. №: 03060 [ A. Bulgakov, T. Kruglova, T. Bock, “Synthesis of the AC and DC Drives Fault Diagnosis Method for the Cyber-physical Systems of Building Robots” in *MATEC Web of Conferences*, vol. 251, no. 03060, 2018. ]

5. **Intelligent** Sensorless Fault Diagnosis of Mechatronics Module Wavelet Transformation / Kruglova T et al. // Asian Journal of Information Technology, 2016, № 15 (22), pp. 4694-4697. [ T. Kruglova, et al., “Intelligent Sensorless Fault Diagnosis of Mechatronics Module Wavelet Transformation” in *Asian Journal of Information Technology*, vol. 15, no. 22, pp. 4694-4697, 2016. ]

6. **Körner T. W.** Fourier Analysis, Cambridge University Press. 1988. 550 p. [ T. W. Körner, *Fourier Analysis*. Cambridge University Press, 1988. ]

7. **Kruglova T. N.** Wavelet analysis for fault diagnosis of electrical machines using current signals // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) Chelyabinsk 2016 [ T. N. Kruglova, “Wavelet analysis for fault diagnosis of electrical machines using current signals” in *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Chelyabinsk, 2016. ]

8. **Bishop R.** The mechatronics handbook. Texas. 2002. 1229 p. [ R. Bishop, *The mechatronics handbook*. Texas, 2002. ]

9. **Круглов В. В., Борисов В. В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика // 2-е изд., стереотип. М.: Телеком, 2002. 382 с. [ V. V. Kruglov, V. V. Borisov, *Artificial neural networks. Theory and practice*, (in Russian). 2nd ed., Stereotype. Moscow: Telecom, 2002. ]

## ОБ АВТОРЕ

**КРУГЛОВА Татьяна Николаевна**, доц. каф. МигПА. Дипл. инженер (ЮРГТУ, 2004). Канд. техн. наук. Иссл. в области оптимального управления роботами с учетом технического состояния электродвигателей.

## METADATA

**Title:** Intellectual decision making in cyber-physical diagnosis system for technological equipment motors

**Authors:** T. N. Kruglova

**Affiliation:** Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Russia.

**Email:** tatyana.kruglova.02@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 1 (83), pp. 97-103, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** In the article the cyber-physical system for diagnosing electric motors of process equipment is devoted. The structure of the cyber-physical diagnosis system is presented, which includes five levels. Each level of this system is described. The main attention is paid to the problem of making decisions on the optimal control of technological equipment depending on the current state of its electric motors. As an example, we consider the problem of controlling a mobile robot with a differential drive. A decision-making model has been developed on the basis of a fuzzy logic apparatus, which allows, depending on the current state of each drive, to choose a method for controlling a mobile robot.

**Key words:** Cyber-physical diagnostic system; technology equipment; electric drives; intelligent decision making; fuzzy logic model.

**About authors:**

**KRUGLOVA, Tatyana Nikolaevna**, Assoc. prof. PhD Dept. of Mechatronic hydraulic and pneumatic automation. Dipl. engineer (SRSTU, 2004).