

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

DOI: 10.18137/RNU.V9I187.22.04.P3

УДК 330.51-7

А.А. Золкин, Т.Г. Айгумов, В.С. Тормозов, К.А. Василенко

НЕЙРОНЕЧЕТКИЕ СИСТЕМЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ УСТРОЙСТВ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Аннотация. Рассматривается роль и значение адаптивных нейронечетких систем и теории нечетких множеств, метод определения истинности правил, показана итерационная особенность исследуемого алгоритма. В настоящее время экспертные системы на основе нечетких правил применяются в автомобильной, аэрокосмической и транспортной промышленности, в области изделий бытовой техники, сфере финансов, анализа и принятия управленческих решений и др. Приводится практическая реализация расчета функции слоя фаззификации и функциональное значение математического аппарата сети. Акцентируется значение использованного перцептрона в создании аппарата нечеткого вывода в цифровых и аналоговых актуаторах. Нечеткие системы, широко применяемые для понимания поведения системы, очень интерпретируемы и способны моделировать человеческие знания с помощью понятных лингвистических терминов. Предлагается модель практического использования алгоритма при моделировании работы устройства в беспилотном транспортном средстве.

Ключевые слова: нейронные сети, программное обеспечение, нейронечеткие системы логического вывода, машинное обучение, моделирование.

A.L. Zolkin, T.G. Aygumov, V.S. Tormozov, K.A. Vasilenko

NEURO-FUZZY SYSTEMS IN MODELING DEVICES OF UNMANNED VEHICLES

Abstract. The article discusses the role and importance of adaptive neuro-fuzzy systems and fuzzy set theory. The method of determining the truth of the rules is considered, the iterative feature of the algorithm under study is emphasized. Currently, expert systems based on fuzzy rules are used in the automotive, aerospace and transport industries, in the field of household appliances, in finance, analysis and management decision-making, and many others. A practical implementation of the calculation of the function of the fuzzification layer and the functional significance of the mathematical apparatus of the network are given. The importance of the used perceptron in the creation of a fuzzy inference apparatus in digital and analog actuators is emphasized. Fuzzy systems, widely used to understand system behavior, are highly interpretable and able to model human knowledge in understandable linguistic terms. A model for the practical use of the algorithm in simulating the operation of a device in an unmanned vehicle is proposed.

Keywords: neural networks, software, neuro-fuzzy inference systems, machine learning, modeling.

Введение

Математическая теория нечетких множеств (fuzzysets) и нечеткая логика (fuzzylogic) являются обобщениями классической теории множеств и классической формальной логики. Данные понятия были впервые предложены американским уче-

Золкин Александр Леонидович

доцент кафедры информатики и вычислительной техники. Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, город Самара. Сфера научных интересов: автоматика и автоматизация; информатика и вычислительная техника; прикладная информатика; программирование; транспорт. Автор 300 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: alzolkin@list.ru

Айгумов Тимур Гаджиевич

кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем. Дагестанский государственный технический университет, город Махачкала. Сфера научных интересов: прикладная информатика; программирование. Автор более 30 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: 915533@mail.ru

Тормозов Владимир Сергеевич

старший преподаватель кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем. Тихоокеанский государственный университет, город Хабаровск. Сфера научных интересов: искусственный интеллект; распознавание образов; цифровая обработка изображений. Автор более 20 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: 007465@pnu.edu.ru

Василенко Константин Александрович

преподаватель. Московский колледж управления, гостиничного бизнеса и информационных технологий «Царицыно», Москва; преподаватель. Колледж сервиса и дизайна Владивостокского государственного университета, город Владивосток. Сфера научных интересов: информатика и вычислительная техника; системный анализ. Автор 30 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: vip.al75@list.ru

ным Лотфи Заде (Lotfi Zadeh) в 1965 году. Основной причиной появления новой теории стало наличие нечетких и приближенных рассуждений при описании человеком процессов, систем, объектов.

Рассматривается процесс организации перцептрона, производится программный расчет и определяется функциональная роль адаптивной нечеткой системы в кибернетическом и вычислительном аспектах. Однако основным их недостатком является необходимость в привлечении экспертов исследуемой области для формирования правил и функций принадлежности. Именно поэтому было решено совместить нечеткие системы с нейронными сетями, обладающими хорошими обучающими возможностями, но которым не хватает способности к интерпретации. В результате появились нейронечеткие системы, которые стали довольно мощным инструментом для работы с нечеткими множествами [2; 3; 5; 6; 11].

Методы исследования

Наибольшее распространение в настоящее время получила архитектура нейронечеткой системы ANFIS, в который вывод осуществляется на основе аппарата нечеткой логики, а параметры функций принадлежности настраиваются с использованием метода обратного распространения ошибки [4].

Результаты исследования

ANFIS (adaptive neuro-fuzzy inference system) – адаптивная сеть на основе системы нечеткого вывода Такаги – Сугено. Данная система соответствует набору нечетких правил IF-THEN, которые обладают способностью к обучению для аппроксимации нелинейных функций [7; 9]. Общая форма модели вывода Такаги – Сугено может быть представлена следующим образом [8; 12]:

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ это } A_1 \text{ И } x_2 \text{ это } A_2 \text{ И } \dots \text{ И } x_n \text{ это } A_n, \text{ ТО } y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Правила вывода Такаги – Сугено для нейронечеткой сети, изображенной на Рисунке 1, будут выглядеть следующим образом:

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ это } A_1 \text{ И } x_2 \text{ это } B_1, \text{ ТО } y = f(x_1, x_2); \quad (2)$$

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ это } A_2 \text{ И } x_2 \text{ это } B_2, \text{ ТО } y = f(x_1, x_2). \quad (3)$$

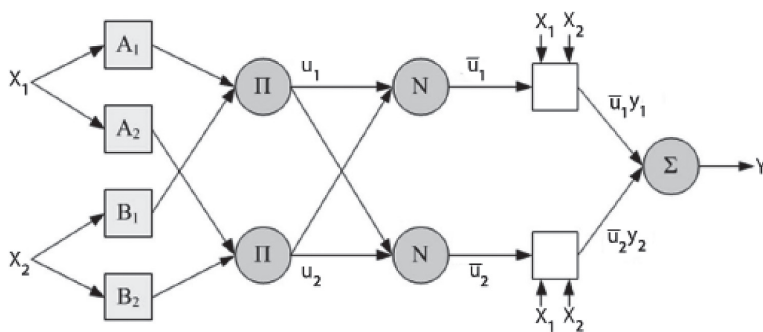


Рисунок 1. Блок-структура адаптивной нейронечеткой системы вывода (ANFIS)

Первый слой является слоем фаззификации, роль которого – установить соответствие между численными значениями входных переменных системы нечеткого вывода и значениями функций принадлежности соответствующих им термам лингвистических переменных. Лингвистическая переменная – это переменная, которая может принимать значения фраз из естественного или искусственного языка.

Например, лингвистическая переменная «скорость» может иметь термы «высокая», «средняя», «очень низкая» и др. Таким образом, каждый нейрон на первом слое в качестве функции активации содержит функцию принадлежности, определяющую степень, с которой входы соответствуют всем своим термам. Степени принадлежности каждой функции вычисляются с использованием набора параметров предпосылки {a, b, c}. В качестве функции принадлежности может быть выбрана, к примеру, гауссова функция

$$g(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}, \quad (4)$$

где a – максимальная высота; b – сдвиг пика от 0; c – ширина колокола.

Однако так как значения функции принадлежности должны изменяться в диапазоне от [0; 1], то параметр a всегда будет равен 1.

Второй слой обозначается как «слой правил», так как количество нейронов на нем равно количеству правил системы. Каждый узел второго слоя соединен только с теми узлами первого слоя, которые формируют посылаки соответствующего правила. Результа-

том слоя являются antecedentes (посылки) нечетких правил, другими словами, выходом каждого узла будет являться степень истинности текущего правила. Данная степень определяется как логическое произведение (минимум) от множества степеней принадлежности по формуле

$$\mu_i = \mu_{A_i}(x_1) * \mu_{B_i}(x_2), \quad i = 1 \dots m. \quad (5)$$

Пример выполнения данного произведения для двух входов и двух правил для каждого входа представлен на Рисунке 2.

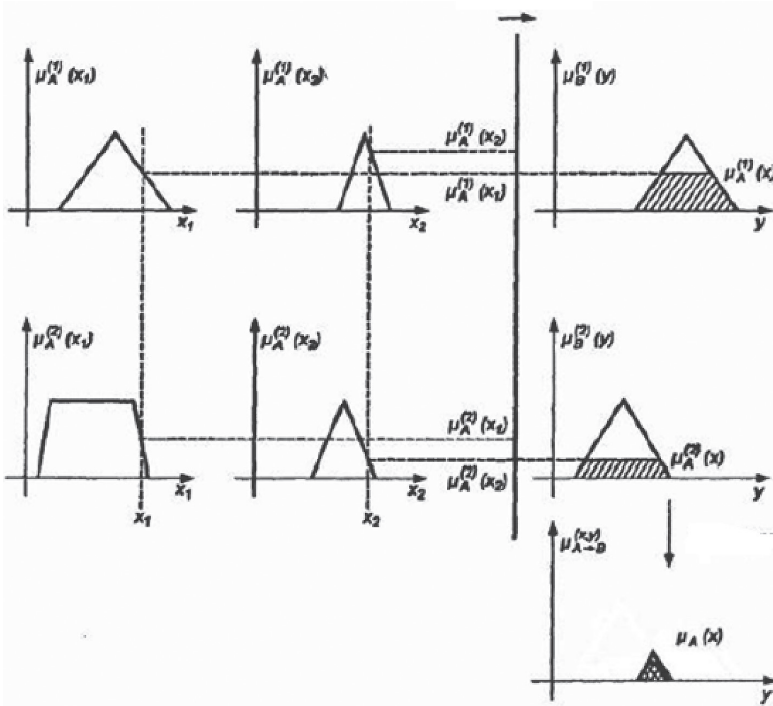


Рисунок 2. Определение степени истинности правил

Процесс обучения сети выполняется итерационно. Каждая итерация состоит из двух этапов. На первом этапе при помощи обучающей выборки находят оптимальные параметры заключений четвертого слоя с помощью метода наименьших квадратов, после чего с помощью метода обратного распространения ошибки изменяются параметры предпосылок. Данная процедура выполняется до тех пор, пока ошибка не уменьшается до требуемого значения.

Для лучшего понимания принципа работы нейронечеткой системы ANFIS будет рассмотрен пример обучения сети с нуля.

Так как данный вид нейронечеткой системы обладает хорошей аппроксимационной способностью нелинейных функций, то в качестве обучающей выборки будут приняты параметры функции от двух переменных и ее результат.

Обзор отечественных и зарубежных источников литературы показывает, что одним из перспективных направлений развития искусственного интеллекта является комбинирование технологий с целью получения новых алгоритмов машинного обучения [1; 10]. Так,

Нейронечеткие системы в моделировании устройств беспилотных транспортных средств

комбинирование теории нечетких множеств и нейросетевых технологий привело к появлению нейронечетких сетей ANFIS.

Результаты сравнительного анализа моделирования работы турбины двигателя (см. Рисунок 3) в библиотеках Python по машинному обучению (Scikit-learn, Tensorflow, Keras, pyTorch) показал, что в них реализован функционал по работе с нейронными сетями прямого распространения, но отсутствует реализация функций для моделирования нейронечетких сетей ANFIS, что было исправлено.

| x1 | x2 | y |
|-----|-----|----------------------|
| -10 | -8 | -0.00672789715494514 |
| -8 | 2 | 0.0562263067414631 |
| -6 | 4 | 0.00881093109436063 |
| -4 | 0 | -0.189200623826982 |
| -2 | -2 | 0.206705452607952 |
| 0 | -10 | -0.054402111088937 |
| 0 | 0 | 1 |
| 2 | -8 | 0.0562263067414631 |
| 4 | 4 | 0.0357968760565192 |
| 6 | -4 | 0.00881093109436063 |
| 8 | 10 | -0.00672789715494514 |
| 10 | 6 | 0.00253346549549811 |

Рисунок 3. Обучающая выборка

Таким образом, сеть будет иметь на входе две переменные – x_1 и x_2 . Пусть каждая из переменных принимает значение из множества термов $\{A1, A2\}$ и $\{B1, B2\}$ соответственно. В таком случае третий слой будет содержать 4 правила. Функция принадлежности $A1$ имеет параметры $b = -10$ и $c = 4$; $A2$: $b = 10$ и $c = 6$; $B1$: $b = -10$ и $c = 8$; $B2$: $b = 7$ и $c = 6$.

В этом случае имеем следующие функции принадлежности:

$$\begin{aligned} \mu_{A1}(x) &= e - (x + 10)^2/32; \mu_{A2}(x) = e - (x - 10)^2/72; \\ \mu_{B1}(x) &= e - (x+10)^2/128; \mu_{B2}(x) = e - (x - 7)^2/72. \end{aligned} \quad (6)$$

Данные функции принадлежности представлены на Рисунке 4.

Вычислим выходные значения первого слоя для первого примера обучающей выборки $x_1 = -10$, $x_2 = -8$:

$$\begin{aligned} \mu_{A1}(x_1) &= 1; \\ \mu_{A2}(x_1) &= 0,003866; \\ \mu_{B1}(x_2) &= 0,969233; \\ \mu_{B2}(x_2) &= 0,043938. \end{aligned}$$

Вычислим выходные значения второго слоя:

$$\begin{aligned} u_1 &= \mu_{A1}(x_1) \cdot \mu_{B1}(x_2) = 1 \cdot 0,969233 = 0,969233; \\ u_2 &= \mu_{A2}(x_1) \cdot \mu_{B2}(x_2) = 0,003866 \cdot 0,043938 = 0,00017. \end{aligned}$$

Большое практическое использование функции принадлежности слоя фаззификации раскрывается через обратную операцию дефаззификации – процесса перехода от функции принадлежности выходной лингвистической переменной к ее четкому (числовому)

значению. Цель дефаззификации состоит в том, чтобы, используя результаты аккумуляции всех выходных лингвистических переменных, получить количественные значения для каждой выходной переменной, которые используются внешними по отношению к системе нечеткого вывода устройствами (исполнительными механизмами интеллектуальной системы алгебраических уравнений).

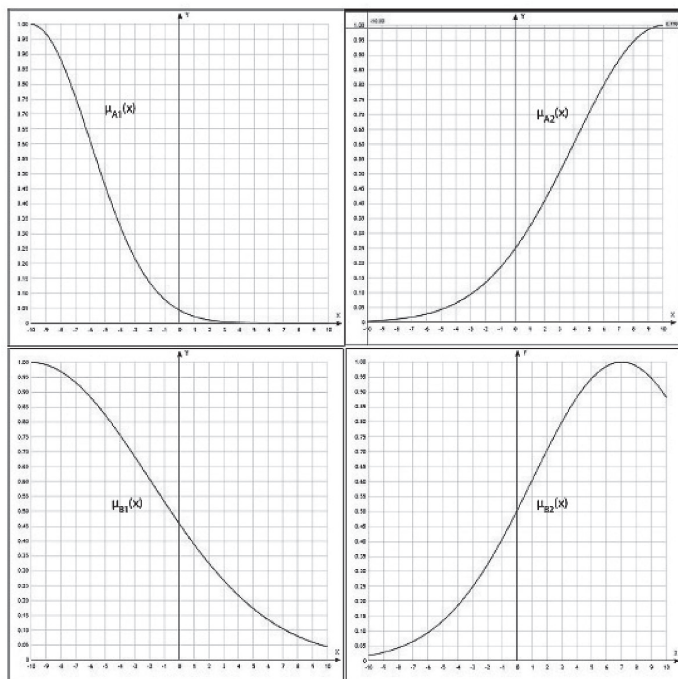


Рисунок 4. Функции принадлежности слоя фаззификации турбины двигателя беспилотного транспортного средства (практический компонент моделирования)

Практико-ориентированная составляющая заключается в возможности редуцирования функции принятия решений, основанной на математическом аппарате сети ANFIS и использовании скалярного компаратора при принятии решений в последовательном изменении состояния гидравлических и механических приводов, клапанов и симплексных (подверженных влиянию со стороны управляющего механизма) устройств. Исследуемый принцип Такаги – Сугено в программной модифицированной реализации имел следующее применение.

Нейросетевая конструкция имеет две входные переменные: ошибка, представляющая собой рассогласование между требуемой и фактической частотой вращения силовой турбины в двигателе беспилотного автомобиля, и скорость изменения ошибки. Термножество лингвистических входных переменных содержит по два термина с гауссовыми функциями принадлежности. База знаний содержит четыре предиктивных правила для изменения степени интенсивности работы актуатора турбины в рамках концепции управляемого индустриального интернета вещей.

Заключение и выводы

Проделано моделирование одной итерации процесса обучения для первых двух слоев данной нейронечеткой сети. На каждом последующем шаге выполняются аналогичные

вычисления, в результате которых постепенно изменяются функции принадлежности. Процесс обучения продолжается до тех пор, пока ошибка выхода сети превышает заранее установленное значение. Рассмотрен математический аппарат сети ANFIS.

В рамках данного исследования на программном языке Python реализован класс, позволяющий моделировать работу, обучение и тестирование сети ANFIS, результаты которых были репрезентированы в форме графиков $\mu A1$ (см. Рисунок 4).

Литература

1. Чирков М., Лачинина Т., Чистяков М. Знания и информация как синергия платформенного подхода цифровизации глобального развития // Свободная мысль. 2020. № 5 (1683). С. 37–44.
2. Abhishek K.M., Mitra R. (2013) Design of ANFIS Controller Based on Fusion Function for Linear Inverted Pendulum. Proc. of International Conference on Advances in Computing: Part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC, vol. 174). New Delhi, Springer India Indian Institute of Technology, Roorkee, Haridwar, 2013, pp. 379–386.
3. Akhilesh K.M., Devesh K.P. (2015) Vehicle Classification Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS). Proc. of Fourth International Conference on Soft Computing for Problem Solving: Part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC, vol. 336). Delhi, Springer India, pp. 137–152.
4. Bedri K., Nicolas F., Patrick G., Guillaume V., Tournebize J., Gaëlle T. (2011) Hydraulic Head Interpolation in an Aquifer Unit Using ANFIS and Ordinary Kriging. Computational Intelligence: Part of the Studies in Computational Intelligence book series (SCI, vol. 343). Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 265–276.
5. Dah-Jing J., Zong-Ming C. (2005) ANFIS Based Dynamic Model Compensator for Tracking and GPS Navigation Applications. International Conference on Natural Computation, Advances in Natural Computation: Part of the Lecture Notes in Computer Science book series (LNCS, vol. 3611). Keelung, Department of Communications and Guidance Engineering, National Taiwan Ocean University, 20224 Keelung, Taiwan, pp. 425–431.
6. Jaime T., Francisco L., Julio M., Alejandro P., Miguel M. (2008) SERS and ANFIS: Fast Identification of the Presence of Retrovirus in CD4 Cells, Cause of AIDS. Mexican International Conference on Artificial Intelligence: MICAI 2008: Advances in Artificial Intelligence, 7th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, Atizapán de Zaragoza, Mexico, October 27–31, 2008. Institut für Informationssysteme (DBAI), TU Wien, Austria, pp. 936–947.
7. Khaled A.A., Ahmed A.E., Mohamed A., Aboul E.H., Tarek G., Pei-Wei T., Jeng-Shyang P. (2017) Hybrid Krill-ANFIS Model for Wind Speed Forecasting. International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics, Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent 49 Systems and Informatics 2016: Part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC, vol. 533). Cham, Springer International Publishing AG, pp. 365–372.
8. Kyunghoon J., Inseong L., Hajun S., Jungmin K., Sungshin K. (2012) Vision Guidance System for AGV Using ANFIS. International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Intelligent Robotics and Applications: 5th International Conference, ICIRA 2012, Montreal, QC, Canada, October 3–5, 2012, Proc., Part I. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 377–385.
9. Rijun Z., Caishui H., Hui L., Meiyun Z., Meixin Z., Zhongsheng L., Liwu S., Fengqin L. (2014) Application of the Wavelet-ANFIS Model. Computer Engineering and Networking, Proceedings of the 2013 International Conference on Computer Engineering and Network (CENet 2013), Part of the Lecture

Notes in Electrical Engineering book series (LNEE, vol. 277). Cham, Springer International Publishing Switzerland, pp. 1373–1379.

10. Tormozov V.S., Zolkin A.L., Vasilenko K.A. (2020) Optimization of neural network parameters based on a genetic algorithm for prediction of time series. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, p. 9271536. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271536.

11. Xiaoxu L., Xiaofeng Y., Ren J., Jing L. (2019) Soil Moisture Retrieval Using UWB Echoes via ANFIS and ANN. International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems: Communications, Signal Processing, and Systems: Part of the Lecture Notes in Electrical Engineering book series (LNEE, vol. 463). Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd, pp. 1261–1268.

12. Yumashev A., Koneva E., Borodina M., Lipson D., Nedosugova A. (2019). Electronic apps in assessing risk and monitoring of patients with arterial hypertension. La Prensa Medica Argentina, 105 (4), 235–245.

References

1. Chirkov M., Lachinina T., Chistyakov M. (2020) *Znaniya i informacija kak sinergija platformennogo podhoda cifrovizacii global'nogo razvitiya* [Knowledge and information as a synergy of the platform approach to digitalization of global development]. *Svobodnaya mysl'*, No. 5 (1683), pp. 37–44 (in Russian).

2. Abhishek K.M., Mitra R. (2013) Design of ANFIS Controller Based on Fusion Function for Linear Inverted Pendulum. Proc. of International Conference on Advances in Computing: Part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC, vol. 174). New Delhi, Springer India Indian Institute of Technology, Roorkee, Haridwar, 2013, pp. 379–386.

3. Akhilesh K.M., Devesh K.P (2015) Vehicle Classification Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS). Proc. of Fourth International Conference on Soft Computing for Problem Solving: Part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC, vol. 336). Delhi, Springer India, pp. 137–152.

4. Bedri K., Nicolas F., Patrick G., Guillaume V., Tournebize J., Gaëlle T. (2011) Hydraulic Head Interpolation in an Aquifer Unit Using ANFIS and Ordinary Kriging. Computational Intelligence: Part of the Studies in Computational Intelligence book series (SCI, vol. 343). Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 265–276.

5. Dah-Jing J., Zong-Ming C. (2005) ANFIS Based Dynamic Model Compensator for Tracking and GPS Navigation Applications. International Conference on Natural Computation, Advances in Natural Computation: Part of the Lecture Notes in Computer Science book series (LNCS, vol. 3611). Keelung, Department of Communications and Guidance Engineering, National Taiwan Ocean University, 20224 Keelung, Taiwan, pp. 425–431.

6. Jaime T., Francisco L., Julio M., Alejandro P., Miguel M. (2008) SERS and ANFIS: Fast Identification of the Presence of Retrovirus in CD4 Cells, Cause of AIDS. Mexican International Conference on Artificial Intelligence: MICA I 2008: Advances in Artificial Intelligence, 7th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, Atizapán de Zaragoza, Mexico, October 27–31, 2008. Institut für Informationssysteme (DBAI), TU Wien, Austria, pp. 936–947.

7. Khaled A.A., Ahmed A. E., Mohamed A., Aboul E.H., Tarek G., Pei-Wei T., Jeng-Shyang P. (2017) Hybrid Krill-ANFIS Model for Wind Speed Forecasting. International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics, Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics 2016: Part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC, vol. 533). Cham, Springer International Publishing AG, pp. 365–372.

8. Kyunghoon J., Inseong L., Hajun S., Jungmin K., Sungshin K. (2012) Vision Guidance System for AGV Using ANFIS. International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Intelligent Robotics and Applications: 5th International Conference, ICIRA 2012, Montreal, QC, Canada, October 3-5, 2012, Proc., Part I. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 377–385.
9. Rijun Z., Caishui H., Hui L., Meiyan Z., Meixin Z., Zhongsheng L., Liwu S., Fengqin L. (2014) Application of the Wavelet-ANFIS Model. Computer Engineering and Networking, Proceedings of the 2013 International Conference on Computer Engineering and Network (CENet 2013), Part of the Lecture Notes in Electrical Engineering book series (LNEE, vol. 277). Cham, Springer International Publishing Switzerland, pp. 1373–1379.
10. Tormozov V.S., Zolkin A.L., Vasilenko K.A. (2020) Optimization of neural network parameters based on a genetic algorithm for prediction of time series. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, p. 9271536. DOI: 10.1109/FarEast-Con50210.2020.9271536.
11. Xiaoxu L., Xiaofeng Y., Ren J., Jing L. (2019) Soil Moisture Retrieval Using UWB Echoes via ANFIS and ANN. International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems: Communications, Signal Processing, and Systems: Part of the Lecture Notes in Electrical Engineering book series (LNEE, vol. 463). Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd, pp. 1261–1268.
12. Yumashev A., Koneva E., Borodina M., Lipson D., Nedosugova A. (2019). Electronic apps in assessing risk and monitoring of patients with arterial hypertension. La Prensa Medica Argentina, 105 (4), 235–245.