

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-2>

Юрій БУЦЕНКО

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математичного аналізу та теорії ймовірностей, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056, armchairdoc@ukr.net

ORCID: 0000-0003-4806-9587

Володимир ЛАБЖИНСЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056, sergeant@aprodos.kpi.ua

ORCID: 0000-0003-0970-770X

Бібліографічний опис статті: Буценко Ю., Лабжинський, В. (2022). Машинний аналіз неконтрольованих параметрів промислових систем в режимі реального часу на основі нечіткої логіки. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 12–23, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-2>

МАШИННИЙ АНАЛІЗ НЕКОНТРОЛЬОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Проведено комплексне дослідження та визначено загальні теоретичні засади використання машинного аналізу неконтрольованих параметрів промислових систем в режимі реального часу на основі теорії нечіткої логіки. В основу запропонованої математичної моделі було покладено класифікацію, яка включає у себе три типи нечітких множин: нечітку множину першого порядку, нечітку множину другого порядку та інтервальну нечітку множину другого порядку. Для кожного зі згаданих типів множин було побудовано математичний апарат, що повною мірою відображає її особливості, але при цьому характеризується мінімальною ресурсомісткістю при роботі у режимі реального часу.

Метою дослідження є побудова комплексної методології розроблення FLS-бібліотек, математичний апарат якої передбачає застосування правила Мамдані та коефіцієнтів Такагі-Сугено для нечіткої множини першого порядку, нечіткої множини другого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку.

Розроблено методику побудови бібліотек для систем нечіткої логіки, яка складається з трьох етапів. Першим етапом є фазифікація, що переводить вхідний набір значень у нечітку множину та передусє етапу логічного виведення, який відповідає за представлення вхідного набору даних відповідно до встановленої системи правил. Останнім етапом є дефазифікація, що переводить нечітку множину вихідних даних у набір даних, які можуть бути використані системою керування промисловим комплексом. Визначено ефективність використання при вдосконаленні базової математичної моделі формулювання нечіткого правила для системи нечіткої логіки правила Мамдані та набору коефіцієнтів Такагі-Сугено. Розроблено узагальнений принцип побудови моделі формулювання нечіткого правила для системи нечіткої логіки.

Розроблена комплексна схема сценарію використання бібліотек систем нечіткої логіки, що може бути використана у мікроконтролерах роботизованих промислових систем, і включає у себе конфігурацію бібліотек та побудову системних алгоритмів.

Показано, що з допомогою представленої математичної моделі на базі однієї програмної платформи можна побудувати алгоритми аналізу неконтрольованих параметрів в режимі реального часу з різними конфігураціями, що включають у себе кілька бібліотек систем нечіткої логіки.

Ключові слова: нечітка логіка, фазифікація, інтервальна множина, правило Мамдані, коефіцієнти Такагі-Сугено.

Yurii BUTSENKO

Doctor of Philosophy in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Mathematical Analysis and Probabilities Theory, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky», Peremohy Avenue, 37, Kyiv, Ukraine, 03056, armchairdoc@ukr.net

ORCID: 0000-0003-4806-9587

Volodymyr LABZHYNISKIY

PhD, Associate Professor at the Department of Design Automation of Energy Processes and Systems, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky», Peremohy Avenue, 37, Kyiv, Ukraine, 03056, sergeant@aprodos.kpi.ua

ORCID: 0000-0003-0970-770X

To cite this article: Butsenko Yu., Labzhunskiy, V. (2022). Mashynnyi analiz nekontrolovanykh parametriv promyslovykh system v rezhymy realnoho chasu na osnovi nechitkoi lohiky [Machine analysis of uncontrolled parameters of industrial systems in real time based on fuzzy logic]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 12–23, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-2>

MACHINE ANALYSIS OF UNCONTROLLED PARAMETERS OF INDUSTRIAL SYSTEMS IN REAL-TIME APPLICATIONS BASED ON FUZZY LOGIC

A comprehensive study was conducted and the general theoretical principles of using machine analysis of uncontrolled parameters of industrial systems in real time based on the theory of fuzzy logic were determined. The proposed mathematical model was based on the classification, which includes three types of fuzzy sets: fuzzy set of the first order, fuzzy set of the second order and interval fuzzy set of the second order. For each of the mentioned types of sets, a mathematical apparatus was built that fully reflects its features, but at the same time is characterized by minimal resource consumption when working in real time.

The aim of the study is to build a comprehensive methodology for the development of FLS-libraries, the mathematical apparatus of which involves the application of the Mamdani rule and Takagi-Sugeno coefficients for the first-order fuzzy set, second-order fuzzy set and interval fuzzy set of the second order.

A methodology for building libraries for fuzzy logic systems has been developed, which consists of three stages. The first stage is phasing, which translates the input set of values into a fuzzy set and precedes the stage of logical inference, which is responsible for representing the input data set in accordance with the established system of rules. The last stage is defuzzification, which converts the fuzzy set of output data into a set of data that can be used by the industrial complex control system. The effectiveness of using the Mamdani rule and the set of Takagi-Sugeno coefficients in improving the basic mathematical model of formulating a fuzzy rule for a fuzzy logic system is determined. A generalized principle of building a model of formulating a fuzzy rule for a fuzzy logic system has been developed.

A comprehensive scheme of the scenario of using libraries of fuzzy logic systems, which can be used in microcontrollers of robotic industrial systems, and includes the configuration of libraries and the construction of system algorithms, has been developed.

It is shown that with the help of the presented mathematical model on the basis of one software platform it is possible to build algorithms for the analysis of uncontrolled parameters in real time with different configurations, including several libraries of fuzzy logic systems.

Key words: fuzzy logic, phasing, interval set, Mamdani rule, Takagi-Sugeno coefficients.

1. Вступ.

Математичне моделювання неконтрольованих параметрів промислових систем у режимі реального часу є нетривіальною задачею. Процес виконання стандартних машинних алгоритмів, що працюють з невизначеним набором величин, є ресурсомістким з точки зору апаратного комплексу, а також вимагає значних часових витрат (Zgurovsky et al., 2017). Ефективним рішенням цієї проблеми є застосування систем нечіткої логіки (FLS: Fuzzy Logic Systems), що працюють з нечіткими множинами даних або з наборами даних, що пройшли процедуру фазифікації (Cardnes-Widma et al., 2019; Zadeh, 1975). Теорія нечітких множин була від початку запропонована як підхід, що поширює математичний апарат на аналіз лінгвістичних виразів та обрахунок ступенів істинності через показники

належності. Подальші дослідження показали, що коло задач теорії нечітких множин може бути поширено на аналіз поведінки складної системи, для якої неможливо розробити адекватну математичну модель з чітким визначенням функцій та їх показників. Таким чином, були запропоновані FLS другого порядку, що здатні ефективно обробляти невизначеності у входньому наборі даних (Eich, 2020; Kara et al., 2013; Mendel, 2001), що надалі було використано при розробленні систем керування індустріальними роботизованими комплексами (Mendel, 2001; Sahab et al., 2011; Miyajima, et al., 2016; Mendel, et al., 2016; Li, et al., 2007; Biglarbejan, et al., 2011; Benetar, et al., 2013; Madhava, et al., 2016; Bakluti, et al., 2009; Guarino, et. Al, 2007; Oich, 2011; Lucian, et al., 2011). У той же час слід зазначити, що методологія розроблення контролерів

нечіткої логіки (FLC: Fuzzy Logic Controllers) є технологічно складною задачею, причому не існує універсального інструментарію, що міг би спростити реалізацію контролерів зазначеного типу. Задача побудови цієї методології розроблення, особливо для контролерів, що працюють з невизначеними множинами другого порядку є актуальною задачею, що становить як теоретичну, так і практичну значимість. На сьогоднішній день існують спеціалізовані середовища для розроблення FLS-бібліотек Lucian, et al., 2011; Rusu-Angel, et al., 2012; Koch, et al., 2008; Resnik, 1997; Patira, 1996; Serrano, et al., 2015; Mendel, 2009), але перспективи їх застосування обмежені класом контролеру, зокрема вони не підтримують роботу з інтервальними нечіткими множинами другого порядку та коефіцієнтами Такагі-Сугено.

Таким чином невирішеною частиною задачі дослідження є побудова комплексної методології розроблення FLS-бібліотек (у тому разі і FLC-бібліотек). Це надасть широкі можливості для роботи з актуальними для сучасних промислових систем класами контролерів та забезпечить необхідну функціональність для їх проектування і впровадження. Для цього необхідно запропонувати системний підхід до впровадження універсальної і конфігурованої бібліотеки систем нечіткої логіки. Математичний апарат у такому разі включає у себе застосування правила Мамдані (Xiang, 2009; Mamdami, 1975; Granter, et al., 2010) для нечіткої множини першого порядку, нечіткої множини другого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку. Крім того, має бути застосована методика, що базується на коефіцієнтах Такагі-Сугено (Ma, et al., 2011). Розроблення зазначеної методології надасть можливість систематизувати процес моделювання архітектури програмного забезпечення, на базі загальної структури та вдосконаленої схеми FLS-бібліотеки. Отримані рішення можуть бути використані для контролерів роботизованих промислових систем на основі об'єктно-орієнтованої мови програмування та діаграм уніфікованої мова моделювання (UML: Unified Modeling Language) (Ma, et al., 2011).

Для створення модульної бібліотеки необхідно використовувати систему нечіткої логіки як єдиний клас, який охоплює інші класи функцій рівнів належності, фазифікації, логічного виведення і дефазифікації. Крім того, важливо визначити ефективність у математичній моделі нечіткої множини першого порядку, нечіткої множини другого порядку або інтервальної

нечіткої множини другого порядку відповідно до типу поставленої задачі. Так для інтервальної нечіткої множини другого порядку пропонується використати методологію агрегування та операцію редукації моделі (type reduction) (Ma, et al., 2011; Valashek-Babichenska, 2010). Налаштування конфігурації FLS-бібліотеки, що включає у себе набори входів та виходів, пропонується встановлювати в автономному режимі за допомогою міжплатформного графічного інтерфейсу, що суттєво спрощує задачу застосування розробленого інструментарію.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.

У роботі наведено результати досліджень за темою побудови алгоритмів машинного аналізу неконтрольованих параметрів промислових систем в режимі реального часу (Zgurovsky, et al., 2017) включав у себе аналіз принципів математичного моделювання у вказаній галузі (Cardnes-Widma, et al., 2019). Так, у роботі (Zadeh, 1975) розглядаються загальні принципи роботи з нечіткими множинами даних або з наборами даних, що пройшли процедуру фазифікації.

Проведений аналіз (Eich, et al., 2020) включав у себе дослідження методів застосування теорії нечітких множин при роботі з широким колом проблем. Зокрема, у роботі (Kara, et al., 2013) були розглянуті задача поширення математичного моделювання на аналіз лінгвістичних виразів, надалі були визначено особливості обрахунку ступенів істинності через показники належності (Mendel, 2001) та аналіз поведінки складної системи (Sahab, et al., 2011). Особливість розглянутих підходів полягала у тому, що математичне моделювання цільових функцій розглядалося як ресурсомістка задача або було принципово неможливим. Значна увага була приділена FLS другого порядку (Miyajima, et al., 2016), як математичному апарату, який здатний ефективно обробляти невідзначеності показників представлених вхідним набором даних (Mendel, et al., 2016). Показано, що при розробленні систем керування індустріальними роботизованими комплексами (Li, 2007), які працюють у режимі реального часу в умовах невизначеності середовища (Biglarbejan, et al., 2011), більш перспективним є застосування інтервальних FLS другого порядку (Benetar, et al., 2013). Такі FLS характеризуються меншими вимогами до програмно-апаратної платформи (Madhava, et al., 2016), на базі якої реалізуються системи зазначеного типу.

При цьому залишається невирішеною задача побудови методології розроблення FLC

(Bakluti, et al., 2009) та відповідного інструментарію математичного моделювання, що можна використовувати при реалізації контролерів (Guarino, et al., 2007). Як було показано у роботі (Oich, 2011) рішення у даному випадку найбільш важливо для роботи з невизначеними множинами другого порядку, а також інтервальними невизначеними множинами другого порядку (Lucian, et al., 2011). Розглянуто дослідження, що визначають ефективність роботи з середовищами для розроблення FLS-бібліотек (Rusu-Angel, et al., 2012), у котрих вказано на перспективи їх застосування окремими класами контролерів, ефективність роботи з коефіцієнтами Такагі-Сугено (Koch, et al., 2008) та загальну універсальність (Resnik, 1997). Було показано, що для створення модульної бібліотеки необхідно використовувати систему нечіткої логіки як єдиний клас, що охоплює класи функцій рівнів належності (Patiga, 1996), фазифікації (Serrano, et al., 2015), логічного виведення (Mendel, 2009) і дефазифікації (Xiang, 2009). З іншого боку, для інтервальної нечіткої множини другого порядку також можливо застосувати методологію агрегування і операцію редукції моделі (Mamdani, 1975).

Визначення належного математичного апарату включало у себе ознайомлення з роботами, що спеціалізуються на особливостях побудови конфігурованої бібліотеки систем нечіткої логіки на базі правила Мамдані (Granter, et al., 2010) Іншим підходом є використання коефіцієнтів Такагі-Сугено (Valashek-Babichevska, 2010) для нечіткої множини першого порядку, нечіткої множини другого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку. Крім того, для подальшого визначення загальної структури та вдосконаленої FLS-бібліотеки, контролерів промислових систем, було проведено аналіз робіт із застосування у цій галузі об'єктно-орієнтованої мови програмування та UML-діаграм (Ma., et al., 2011).

Таким чином, необхідно, вказати на необхідність побудови комплексної методології розроблення FLS-бібліотек, на базі яких можливо ефективно працювати з актуальними класами контролерів та забезпечити необхідну функціональність.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є побудова комплексної методології розроблення FLS-бібліотек, математичний апарат якої передбачає застосування правила Мамдані та коефіцієнтів Такагі-Сугено для нечіткої множини першого порядку, нечіткої множини другого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити вимоги до систем керування роботизованими комплексами;
- узагальнити математичний апарат, що базується на теорії нечітких множин та є актуальним при розробленні систем керування роботизованими промисловими комплексами;
- побудувати базову модель формулювання нечіткого правила для системи нечіткої логіки;
- побудова узагальненої схеми сценарію використання FLS-бібліотек та конфігурації FLS-бібліотеки;
- розробити методіку побудови модульної бібліотеки на базі алгоритмів фазифікації, логічного виведення та дефазифікації FLS-бібліотеки.

4. Методи розроблення методології на основі теорії нечітких множин

У дослідженні були використані сучасні методи математичного моделювання на базі нечітких множин, зокрема:

- математичний апарат на базі нечіткої множини першого порядку;
- математичний апарат на базі нечіткої множини другого порядку;
- математичний апарат на базі інтервальної нечіткої множини другого порядку;
- методи фазифікації, логічного виведення та дефазифікації;
- формулювання нечіткого правила для системи нечіткої логіки;
- сценарій використання FLS-бібліотек;
- схема конфігурації FLS-бібліотеки;
- методи визначення конфігурації FLS-бібліотек через FLS-структури, що включають у себе набори входів та виходів;
- міжплатформний графічний інтерфейс;
- методологія агрегування;
- операція редукції моделі;
- методи ручного конфігурування шляхом редагування файлу конфігурації, представленому у форматі XML.

5. Результати дослідження систем аналізу на основі нечіткої логіки

5.1. Побудова математичної моделі на основі нечітких множин

Розроблення математичного апарату, що базується на теорії нечітких множин має починатися з визначення основних елементів, що будуть надалі застосовані при використанні цього апарату. У рамках математичної моделі, що використовувалась при проведенні цього дослідження, було запропоновано взяти за основу загально прийнятну класифікацію. Зазначена класифікація включає у себе два типи

нечітких множин, і для кожного з типів побудувати систему рівнянь, що повною мірою відображає його особливості (Zgurovski, et al., 2017; Cardnes-Widma, et al., 2019).

Нехай F_1 є нечіткою множиною першого порядку (type-1 fuzzy set), що включає у себе сам набір елементів x та функцію $m_{F_1}(x)$, яка визначає їх рівні належності (corresponding membership values)

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = \sum_x (x, m_{F_1}(x)) \\ \left[\begin{array}{l} x \in X \\ m_{F_1}(x) \in [0;1] \end{array} \right. \end{array} \right. , \quad (1)$$

де X відповідає повному набору елементів, що розглядаються у межах математичного моделювання, а алгебраїчна сума $\Sigma(x, m_{F_1}(x))$ відповідає поняттю колекції множини об'єктів (collection). При побудові програмних алгоритмів машинного аналізу це використовується як клас для роботи з множиною об'єктів (Zadeh, 1975).

У свою чергу, нечітка множина другого порядку F_2 включає у себе набір елементів x , показник первинної належності (primary membership value) та функцію вторинної належності $m_{F_1}(x, u)$ яка як аргументи використовує два попередні показники. Визначення нечіткої множини другого порядку та повний набір обмежень, можуть бути наведені у наступній формі (Eich, 2020; Kara et al., 2013; Mendel, 2001):

$$\left\{ \begin{array}{l} F_2 = \sum_{u(x)} \sum_x ((x, u(x)), m_{F_2}(x, u(x))) \\ \left[\begin{array}{l} x \in X \\ m_{F_2}(x, u(x)) \in [0;1] \\ u(x) \in J(x) \\ J(x) \subseteq [0;1] \end{array} \right. \end{array} \right. , \quad (2)$$

де $J(x)$ становить повний набір значень показника первинної належності для заданого елемента нечіткої множини x .

Слід також зазначити, що у випадку коли для нечіткої множини другого порядку виконується наступна рівність:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{F_2}(x, u) = 1 \\ \left[\begin{array}{l} \forall x \in X \\ \forall u(x) \in J(x) \end{array} \right. \end{array} \right. , \quad (3)$$

таку множину слід відносити до інтервальної нечіткої множини другого порядку F_{2i} . Для неперервних значень елементів множин X та $J(x)$ функція F_{2i} визначається як:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{2i} = \int \left(\frac{\int \frac{du}{u(x)}}{x} \right) dx \\ \left[\begin{array}{l} x \in X \\ u(x) \in J(x) \\ J(x) \subseteq [0;1] \end{array} \right. \end{array} \right. , \quad (4)$$

Аналогічно, для дискретних значень елементів множин X та $J(x)$ та множини кортежів функція F_{2i} може бути наведена у такому вигляді (Sahab, et al., 2011; Miyajima, et al., 2016; Mendel, et al., 2006; Li, et al., 2007):

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{2i} = \sum_x \left(\frac{\sum_{J(x)} \frac{1}{u(x)}}{x} \right) = ((x, u(x)), 1) \\ \left[\begin{array}{l} x \in X \\ u(x) \in J(x) \\ J(x) \subseteq [0;1] \end{array} \right. \end{array} \right. . \quad (5)$$

За допомогою F_{2i} так само, як і на базі F_2 , можна визначати рівень невизначеності належності елементів, але використання інтервальної множини надає можливість спростити математичний апарат (Biglarbejan, et al., 2011; Benetar, et al., 2013; Madhava, et al., 2016; Bakluti, et al., 2009; Guarino, et. Al, 2007; Oich, 2011; Lucian, et al., 2011).

Розроблення FLS для нечітких множин як першого так і другого порядку включає у себе наступні етапи (Rusu-Angel, et al., 2012; Koch, et al., 2008; Resnik, 1997; Patira, 1996; Serrano, et al., 2015; Mendel, 2009):

– фазифікацію, як процес, що за допомогою функції визначення рівнів належності переводить вхідний набір значень у нечітку множину;

– логічне виведення, що відповідає за процес відображення вхідного набору даних, представленого у вигляді нечіткої множини, у вихідний набір даних, що також представлений у вигляді нечіткої множини, відповідно до встановленої системи правил;

– дефазифікацію, як процес, що переводить нечітку множину вихідних даних у набір даних, які можна використовувати надалі.

У рамках цієї моделі співвідношення між наборами входів та виходів системи може бути визначено на основі правила Мамдані для FLS (Xiang, 2009; Mamdami, 1975). Нехай система складається з P входів – набір $\{x_1, x_2, \dots, x_p, \dots, x_P\}$ і Q виходів – набір $\{y_1, y_2, \dots, y_p, \dots, y_Q\}$. Тоді можна сказати, що окреме правило R^i виконується,

якщо за умови, коли кожен вхід x_p відповідає антецеденту нечіткої множини A_p^i , кожен вихід y_q відповідає консеквенту нечіткої множини C_q^i (рис. 1).

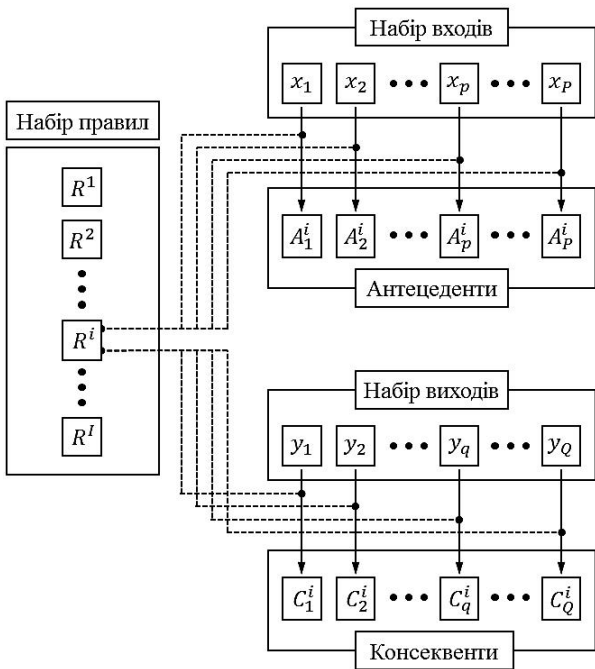


Рис. 1. Базова модель формування нечіткого правила для системи FLS

Таким чином, виконання окремого правила R^i можна визначити як t -норму ініціалізації множини антецедентів A_p^i .

Подальший розвиток базової математичної моделі формування нечіткого правила для системи FLS зумовлює використання набору коефіцієнтів Такагі-Сугено $c_{o,q}^i$ та $c_{p,q}^i$ (Valashek-Babichavska, 2010; Ma, et al., 2011). Такий набір відповідає за визначення набору виходів y_q системи, що моделюється, у відповідності до набору вхідів x_p та окремого нечіткого правила R^i :

$$\begin{cases} y_1^i = c_{0,1}^i + c_{1,1}^i \cdot x_1 + c_{2,1}^i \cdot x_2 + \dots + c_{p,1}^i \cdot x_p + \dots + c_{p,1}^i \cdot x_p \\ y_2^i = c_{0,2}^i + c_{1,2}^i \cdot x_1 + c_{2,2}^i \cdot x_2 + \dots + c_{p,2}^i \cdot x_p + \dots + c_{p,2}^i \cdot x_p \\ \dots \\ y_q^i = c_{0,q}^i + c_{1,q}^i \cdot x_1 + c_{2,q}^i \cdot x_2 + \dots + c_{p,q}^i \cdot x_p + \dots + c_{p,q}^i \cdot x_p \\ \dots \\ y_1^i = c_{0,q}^i + c_{1,q}^i \cdot x_1 + c_{2,q}^i \cdot x_2 + \dots + c_{p,q}^i \cdot x_p + \dots + c_{p,q}^i \cdot x_p \end{cases} \cdot (6)$$

Надалі для нечіткої множини першого порядку слід використати метод дефазифікації на основі зваженого середнього, а для множини другого порядку – алгоритми, які працюють з невизначеними границями (uncertainty bounds output processing). Такий підхід надасть змогу отримати чіткі значення на виході FLS.

5. 2. Побудова програмних алгоритмів на базі FLS-бібліотек

Розроблення математичного апарату є першим етапом створення алгоритмів машинного аналізу неконтрольованих параметрів промислових систем в режимі реального часу на основі нечіткої логіки, наступні етапи включають у себе розроблення системного програмного забезпечення (ПЗ). Узагальнена схема сценарію використання FLS-бібліотек при побудові модуля керування роботизованими промисловими системами представлена на рис. 2.

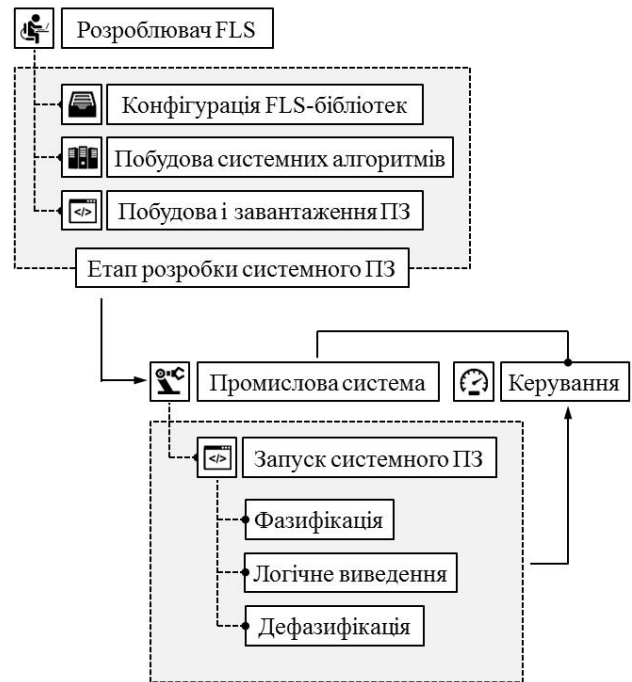


Рис. 2. Узагальнена схема сценарію використання FLS-бібліотек

Представлена діаграма базується на наборі етапів розроблення системного ПЗ, що використовується у мікроконтролерах роботизованих промислових систем, яка включає у себе конфігурацію FLS-бібліотек, побудову системних алгоритмів і ПЗ. Відповідно, етапи фазифікації, логічного виведення і дефазифікації, на основі яких здійснюється контроль за нечіткими правилами, розкриваються під час використання ПЗ, що включає у себе FLS-бібліотеки.

Узагальнена схема конфігурації FLS-бібліотеки включає у себе наступні набори (рис. 3):

- FLS, що містить механізм формування логічного виведення, методи логічної кон'юнкції та диз'юнкції, метод агрегації даних, метод імплікації, метод обробки вихідних даних, правила, а також має включати тип системи;

- множина входів, що складається з набору даних та функції, яка визначає рівні належності елементів цього набору;
- множина виходів, елементи якої визначають з допомогою правила Мамдані або коефіцієнтів Такагі-Сугено;
- множина виходів Такагі-Сугено, що можуть бути отримані для нечітких множин першого порядку або інтервальних нечітких множини другого порядку;

- множина правил, що складається з антецедентів нечіткої множини, консеквентів нечіткої множини, ваг та логіки зв'язків;
 - набір функцій рівнів належності елементів набору, що складається з наборів функцій для нечітких множин першого порядку або інтервальних нечітких множин другого порядку.
- Запропонована схема надає можливість розробити універсальну методику налаштування конфігурації FLS-бібліотек.

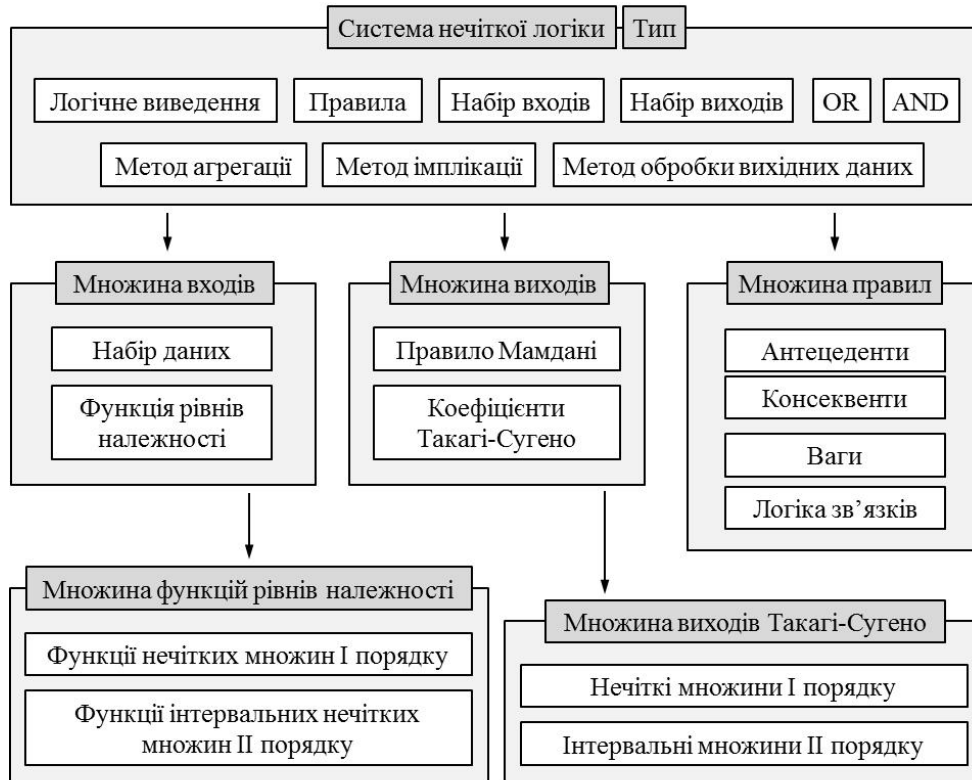


Рис. 3. Узагальнена схема конфігурації FLS-бібліотеки

5. 3. Налаштування конфігурації та структури FLS-бібліотек

Конфігурація FLS-бібліотек, тобто властивості FLS-структур, що включають у себе набори входів та виходів, встановлюється в автономному режимі за допомогою міжплатформного графічного інтерфейсу (GUI-редактора). Іншим підходом може бути редагування файлу конфігурації, представлений у форматі розширеної мови розмітки (XML) у ручному режимі. Збережений файл конфігурації надалі може бути завантажений до розробленої FLS-бібліотеки, що дозволяє використовувати розроблений підхід у інших реалізаціях алгоритмів машинного аналізу неконтрольованих параметрів промислових систем.

FLS-бібліотеки розробляють на основі об'єктно-орієнтованого підходу, у рамках якого застосовуються класи, що включають у себе

методи для виконання операцій фазифікації, логічного виведення та дефазифікації для FLS першого та другого порядку. Таким чином, на базі однієї програмної платформи можна побудувати FLC-алгоритми аналізу неконтрольованих параметрів в режимі реального часу з різними конфігураціями, що включають у себе кілька FLS-бібліотек. Виділення функції визначення рівнів належності та методів фазифікації, логічного виведення і дефазифікації як окремих класів з власними атрибутами надає можливість виконувати кожну з FLS-операцій незалежно від інших. При цьому у FLS-бібліотеці чіткі входи і чіткі виходи представлені як елементи вектора, отже чіткі вхідні дані передаються до операцій FLS-бібліотеки як вектор, і всі чіткі виходи з операцій FLS-бібліотеки також є векторами. Розглянемо складові методики побудови FLS-бібліотеки

для машинного аналіз неконтрольованих параметрів промислових систем в режимі реального часу на основі об'єктно-орієнтованого підходу. У запропонованому методі, базовий клас включає у себе підклас, який відповідає за операцію фазифікації (рис. 4). Вказаний підклас у свою чергу включає у себе підкласи функції визначення рівнів належності для нечіткої множини першого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку.

Підклас функції логічного виведення, у свою чергу, будується на основі правил конфігурації, методу виконання нечітких логічних операцій, методів імплікації і агрегації, а також метод відображення вхідного набору нечітких даних у вихідний набір нечітких даних. Для того, щоб вихідний набір нечітких даних був придатним для дефазифікації, процес імплікації має виконуватися для кожного правила, що стосується опису вихідного набору, а процес агрегації – для кожного FLS-виходу. У запропонованій структурі FLS-бібліотеки для виконання операції нечіткого виводу клас має формуватися на основі класу логічного виведення. Таким чином, клас логічного виведення складається з підкласів функції визначення рівнів належності для

цій, методів імплікації і агрегації, а також метод відображення вхідного набору нечітких даних у вихідний набір нечітких даних. Для того, щоб вихідний набір нечітких даних був придатним для дефазифікації, процес імплікації має виконуватися для кожного правила, що стосується опису вихідного набору, а процес агрегації – для кожного FLS-виходу. У запропонованій структурі FLS-бібліотеки для виконання операції нечіткого виводу клас має формуватися на основі класу логічного виведення. Таким чином, клас логічного виведення складається з підкласів функції визначення рівнів належності для

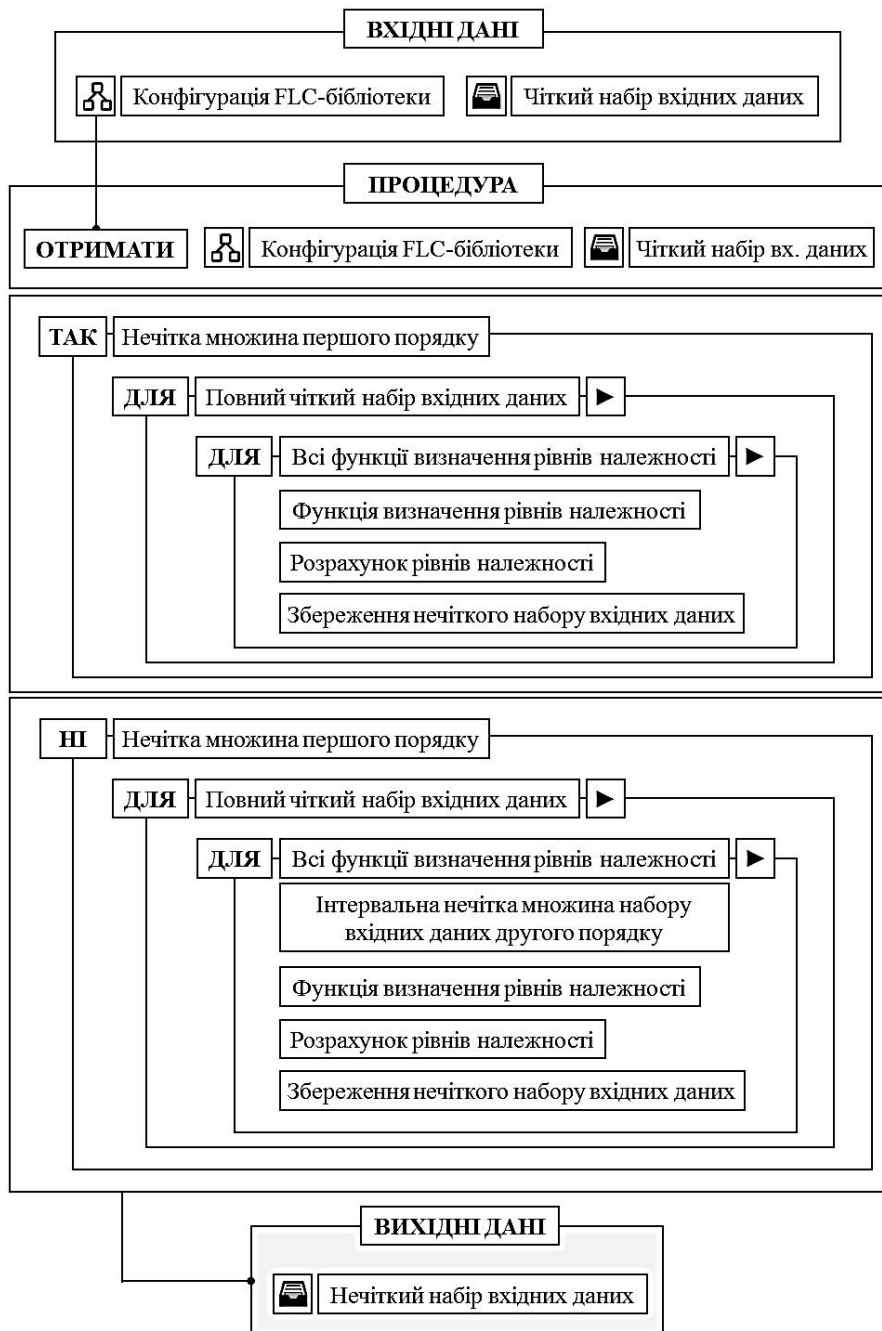


Рис. 4. Структура алгоритму фазифікації FLS-бібліотеки

нечіткої множини першого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку, що використовуються у процесах імплікації і агрегації за правилами Мамдані.

Нарешті, для FLS-бібліотеки необхідно визначити клас дефазифікації вихідних даних. Якщо нечіткої множини першого порядку останній етап включає у себе лише процес дефазифікації, то для інтервальної нечіткої множини другого порядку цьому процесу передують операції редукації моделі. Причому обом операціям відповідають набори методів, що обираються залежно від конфігурації FLS-бібліотеки. Так, наприклад, для нечіткої множини першого порядку пропонується використовувати метод дефазифікації центроїда та методики середнього зваженого дефазифікації. Кінцева архітектура поєднує операції фазифікації, логічного виведення та дефазифікації і дозволяє застосувати декілька FLC-алгоритмів у межах однієї програми з незалежними конфігураціями.

6. Обговорення результатів дослідження методик конфігурації FLS-бібліотек

У результаті проведеного дослідження було розроблено математичний апарат, що базується на теорії нечітких множин. За основу визначення базових елементів математичного моделювання було запропоновано взяти класифікацію, яка включає у себе нечіткі множини першого порядку, нечіткі множини другого порядку та інтервальні нечіткі множини другого порядку. Для кожного з типів нечітких множин була представлена система рівнянь, що повною мірою відображає його особливості та при цьому є зручною для подальшого моделювання. При цьому співвідношення між наборами входів та виходів системи нечітких множин було визначено на основі правила Мамдані, а подальший розвиток математичної моделі формулювання нечіткого правила для базувався на використанні набору коефіцієнтів Такагі-Сугено. Була представлена узагальнена схема сценарію використання FLS-бібліотек при побудові модуля керування роботизованими промисловими системами, діаграма якої базується на наборі етапів розроблення системного ПЗ і включає у себе конфігурацію FLS-бібліотек та побудову системних алгоритмів. При цьому узагальнена схема конфігурації FLS-бібліотеки складається з наборів FLS, множини входів, множини виходів, множини виходів Такагі-Сугено, множини правил, а також набору функцій рівнів належності елементів. Було показано, що налаштування конфігурації FLS-бібліотеки, можна встановлювати в автономному режимі за допомогою міжплатформного графічного інтерфейсу, що суттєво

спрощує задачу застосування розробленого інструментарію. Була розроблена структура алгоритму фазифікації FLS-бібліотеки, а також запропоновано засади побудови модулів логічного виведення та дефазифікації. Проведене дослідження дозволило сформулювати основні положення для побудови комплексної методології розроблення і FLS-бібліотек для нечіткої множини першого порядку, нечіткої множини другого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку.

7. Висновки

1. Відповідно вимогам до систем керування роботизованими комплексами вказано на необхідність побудови математичного апарату, що базується на теорії нечітких множин. Запропоновано загальну методику, що включає у себе два типи нечітких множин, для кожного з яких побудується система рівнянь, що відображає його особливості.

2. Побудовано математичний апарат, що включає у себе нечіткі множини першого порядку, нечіткі множини другого порядку та інтервальні нечіткі множини другого порядку. При розробці математичного апарату було визначено правило Мамдані і набори коефіцієнтів Такагі-Сугено.

3. Розроблено модель формулювання нечіткого правила для системи нечіткої логіки. Зазначена модель включає у себе схему сценарію використання FLS-бібліотек, діаграма якої містить конфігурацію FLC-бібліотек та методику побудову системних алгоритмів.

4. Побудовано узагальнену схему конфігурації FLS-бібліотеки, що складається з наборів FLS, множини входів, множини виходів, множини виходів Такагі-Сугено, множини правил, а також набору функцій рівнів належності елементів.

5. Розроблено методику побудови модульної бібліотек, у якій система нечіткої логіки використовується як єдиний клас, що охоплює інші класи функцій рівнів належності, фазифікації, логічного виведення і дефазифікації. Вказано на необхідність визначення ефективності математичної моделі кожного з типів нечіткої множини та необхідність застосування методології агрегування та операцію редукації моделі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Згуровський М.З., Зайченко І.П. *The Fundamentals of Computational Intelligence: System Approach*. – Springer International Publishing, 2017. – 375 с.
2. Карднес-Відма М., Марін Р. (2019). FTCLoGic: Fuzzy Temporal Constraint Logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 363, 84–112. doi:10.1016/j.fss.2018.05.014.

3. Задех Л.А. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning ii. *Information sciences*, 8 (4): 301–357, 1975
4. Ейох І., Ейох Дж. (2020). Interval Type-2 Intuitionistic Fuzzy Logic System for Time Series and Identification Problems – A Comparative Study. *International Journal of Fuzzy Logic Systems*, 10(1), 1–17. doi: 10.5121/ijfls.2020.10101.
5. Кара А.Б., Вагнер С., Харпас Х. (2013). Multiobjective Optimization and Comparison of Nonsingleton Type-1 and Singleton Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21(3), 459–476. doi: 10.1109/tfuzz.2012.2236096.
6. Мендель Дж.М. Uncertain rule-based fuzzy logic system: introduction and new directions. *Prentice–Hall PTR*, 2001.
7. Сахаб Н., Харпас, Х. (2011). A type-2 nonsingleton type-2 fuzzy logic system to handle linguistic and numerical uncertainties in real world environments. *2011 IEEE Symposium on Advances in Type-2 Fuzzy Logic Systems (T2FUZZ)*. doi:10.1109/t2fuzz.2011.5949565.
8. Міядзіма Х., Сірей Н. (2016). System identifications by SIRMs models with linear transformation of input variables. *Artificial Intelligence Research*, 5(2). doi: 10.5430/air.v5n2p55.
9. Мендель Дж.М., Лю Ф. Interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14 (6) :808–821, 2006.
10. Лі М., Джін Т (2007). An Adaptive Tracking Control for Robotic Manipulators based on RBFN. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 7 (2), 96–101. doi:10.5391/ijfis.2007.7.2.096.
11. Бірларбеджан М., Мелік В., Мендель Дж.М. Design of novel interval type-2 fuzzy controllers for modular and reconfigurable robots: theory and experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (4): 1371–1384, 2011.
12. Бенетар Б, Айкелін У. (2013). Performance Measurement Under Increasing Environmental Uncertainty in the Context of Interval Type-2 Fuzzy Logic Based Robotic Sailing. *SSRN Electronic Journal*. 8 (4): 17–25 doi: 10.2139/ssrn.2828470
14. Мадхава М., Мегана Н, Супрія М. (2016). Automatic Train Control System Using Fuzzy Logic Controller. *Bonfring International Journal of Research in Communication Engineering*, 6(Special Issue), 56–61. doi: 10.9756/bijrce.8201
15. Баклуті Н. Алімі А.М. The geometric interval type-2 fuzzy logic approach in robotic mobile issue. P. 1971–1976, 2009.
16. Гуаріно Д., Сафіотті А. (2007). A Study on Intelligent System Design of U-Business Service by Using Ubiquitous Component Technologies. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9(1), 10. doi: 10.5772/45857
17. Ойх Дж. (2011). Fuzzy Logic Deadzone Compensation for a Mobile Robot. *Fuzzy Controllers, Theory and Applications*. doi:10.5772/13676.
18. Люсіан Т., Міхаела Р. (2011). New Applications of Fuzzy Logic Methodologies in Aerospace Field. *Fuzzy Controllers, Theory and Applications*. doi:10.5772/14540
19. Русу-Ангел С., Герм Л. (2012). Embedded Fuzzy Logic Controllers in Electric Railway Transportation Systems. *Fuzzy Controllers- Recent Advances in Theory and Applications*. doi:10.5772/48588.
20. Кох М, Шаферс Л., Кляйніохан Б. An efficient data flow oriented fuzzy library. P. 3159–3162, 2008.
21. Резнік Л. (1997). Fuzzy Sets, Logic and Control. *Fuzzy Controllers Handbook*, 3–18. doi:10.1016/b978-075063429-8/50006-3.
22. Патіра М.Дж. (1996). Design Considerations of Digital Fuzzy Logic Controllers. *Fuzzy Logic*, 143–175. doi:10.1007/978-3-322-88955-3_5
23. Сепрано Ф.Є, Флорес М.А.. C++ library for fuzzy type-2 controller design with particle swarm optimization tuning. P. 1–7, 2015.
24. Мендель Дж. Systems, controls, and control theory. *Handbook of Fuzzy Computation*. doi: 10.1887/0750304278/b438c3
25. Сянг Н. (2009). Cooperative Evolutionary Learning of Linguistic Fuzzy Rules and Parametric Aggregation Connectors for Mamdani Fuzzy Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15(6), 1162–1178. doi: 10.1109/tfuzz.2007.904121.
26. Мамдані Є. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7 (1): 1–13, 1975.
27. Грантер Дж.Л., Фодор Дж.А. (2010). Takag Sugeno type fuzzy automaton model. *International Journal of Man-Machine Studies*, 5 (2):. doi:10.1109/fuzzy.2010.5583982.

28. Валашек-Бабічевська А. (2010). Takagi Sugeno-Kang type fuzzy models with fuzzy equations in the consequence part. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 3 (2) doi:10.1109/mmars.2010.5587260
29. Ма З., Жанг Ф., Ян Л., Ченг Дж. (2011). Representing and reasoning on fuzzy UML models: A description logic approach. *Expert Systems with Applications*, 38 (3), 2536–2549. doi:10.1016/j.eswa.2010.08.042

REFERENCES:

1. Zgurovsky, M.Z., Zaychenko, I.P. (2017). *The Fundamentals of Computational Intelligence: System Approach*. Springer International Publishing, 375 p.
2. Cardnes-Widma, M., Marin, R. (2019). FTC Logic: Fuzzy Temporal Constraint Logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 363, 84–112. doi:10.1016/j.fss.2018.05.014.
3. Zadeh, L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning ii. *Information sciences*, 8 (4): 301–357.
4. Eich, I., Eich, J. (2020). Interval Type-2 Intuitionistic Fuzzy Logic System for Time Series and Identification Problems – A Comparative Study. *International Journal of Fuzzy Logic Systems*, 10(1), 1–17. doi: 10.5121/ijfls.2020.10101.
5. Kara, A.B., Wagner, S., Hagrass, H. (2013). Multiobjective Optimization and Comparison of Nonsingleton Type-1 and Singleton Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21(3), 459–476. doi: 10.1109/TFUZZ.2012.2236096.
6. Mendel, J.M. *Uncertain rule-based fuzzy logic system: introduction and new directions*. Prentice–Hall PTR, 2001.
7. Sahab, N., Hagrass, H. (2011). A type-2 non-singleton type-2 fuzzy logic system to handle linguistic and numerical uncertainties in real world environments. 2011 IEEE Symposium on Advances in Type-2 Fuzzy Logic Systems (T2FUZZ). doi:10.1109/t2fuzz.2011.5949565.
8. Miyajima, H., Shigei, N. (2016). System identifications by SIRMs models with linear transformation of input variables. *Artificial Intelligence Research*, 5(2). doi: 10.5430/air.v5n2p55.
9. Mendel, J.M., Liu, F. (2006). Interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14 (6) :808–821 p.
10. Li, M., Jin, T. (2007). An Adaptive Tracking Control for Robotic Manipulators based on RBFN. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 7 (2), 96–101. doi:10.5391/ijfis.2007.7.2.096.
11. Biglarbejan, M., Melik, V., Mendel J.M. Design of novel interval type-2 fuzzy controllers for modular and reconfigurable robots: theory and experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (4): 1371–1384, 2011.
12. Benetar B, Aikelin, U. (2013). Performance Measurement Under Increasing Environmental Uncertainty in the Context of Interval Type-2 Fuzzy Logic Based Robotic Sailing. *SSRN Electronic Journal*. 8 (4): 17–25 doi: 10.2139/ssrn.2828470.
13. Madhava, M, Meghana, N, Supriya, M. (2016). Automatic Train Control System Using Fuzzy Logic Controller. *Bonfring International Journal of Research in Communication Engineering*, 6(Special Issue), 56–61. doi: 10.9756/bijrce.8201.
14. Bakluti, N., Alimi, A.M. The geometric interval type-2 fuzzy logic approach in robotic mobile issue. P. 1971–1976, 2009.
15. Guarino, D., Safiotti, A. (2007). A Study on Intelligent System Design of U-Business Service by Using Ubiquitous Component Technologies. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9(1), 10. doi: 10.5772/45857.
16. Oich, J. (2011). Fuzzy Logic Deadzone Compensation for a Mobile Robot. *Fuzzy Controllers, Theory and Applications*. doi:10.5772/13676.
17. Lucian, T., Michaela, R. (2011). New Applications of Fuzzy Logic Methodologies in Aerospace Field. *Fuzzy Controllers, Theory and Applications*. doi:10.5772/14540.
18. Rusu-Angel, S., Herm, L. (2012). Embedded Fuzzy Logic Controllers in Electric Railway Transportation Systems. *Fuzzy Controllers- Recent Advances in Theory and Applications*. doi:10.5772/48588.
19. Koch, M., Schaefers, L., Kleinjohan, B. (2008). An efficient data flow oriented fuzzy library. P. 3159–3162, 2008.
20. Resnik, L. (1997). Fuzzy Sets, Logic and Control. *Fuzzy Controllers Handbook*, 3–18. doi:10.1016/b978-075063429-8/50006-3.
21. Patira, M.J. (1996). Design Considerations of Digital Fuzzy Logic Controllers. *Fuzzy Logic*, 143–175. doi:10.1007/978-3-322-88955-3_5.

22. Serrano, F.E., Flores, M.A. (2015). C++ library for fuzzy type-2 controller design with particle swarm optimization tuning. 1–7 p.
23. Mendel, J. Systems, controls, and control theory. Handbook of Fuzzy Computation. doi:10.1887/0750304278/b438c3.
24. Xiang, N. (2009). Cooperative Evolutionary Learning of Linguistic Fuzzy Rules and Parametric Aggregation Connectors for Mamdani Fuzzy Systems. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 15(6), 1162–1178. doi:10.1109/tfuzz.2007.904121.
25. Mamdani, E. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies, 7 (1): 1–13 p.
26. Granter, J.L., Fodor, J.A. (2010). Takagi-Sugeno type fuzzy automaton model. International Journal of Man-Machine Studies, 5 (2):. doi:10.1109/fuzzy.2010.5583982.
27. Valashek-Babichevska, A. (2010). Takagi-Sugeno Kang type fuzzy models with fuzzy equations in the consequence part. International Journal of Advanced Robotic Systems, 3 (2) doi:10.1109/mmar.2010.5587260.
28. Ma, Z., Zhang, F., Yang, L., Cheng, J. (2011). Representing and reasoning on fuzzy UML models: A description logic approach. Expert Systems with Applications, 38 (3), 2536-2549. doi:10.1016/j.eswa.2010.08.042.