

ШИМ-ПЕРЕТВОРЮВАЧ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИВЕДЕННЯ ТАКАГІ-СУГЕНО ДЛЯ СИСТЕМ INTERNET OF THINGS

Р. М. Пономаренко, кандидат фізико-математичних наук, асистент

E-mail: ponomarenko_roman@ukr.net

А. Б. Демчук, студентка

E-mail: anastasiia.dmchk@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Анотація. Мета дослідження полягає в тому, щоб застосувати нечітку логіку в системах Інтернету речей для оцінки різних факторів навколишнього середовища, такі як температура, вологість тощо, та перетворити їх за допомогою алгоритму Такагі-Сугено в сигнал широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) для контролю швидкості двигунів, теплової потужності нагрівачів та інших параметрів енергоефективним способом.

У роботі досліджуються застосування нечітких перетворювачів даних та основі інтелектуальних систем нечіткого логічного виведення в системах Internet of Things. Розроблено підхід перетворення фазифікованих вхідних параметрів, зчитаних з датчиків у ШИМ-сигнал на основі нечіткого алгоритму Такагі-Сугено. На основі запропонованого методу був розроблений Сمارт-вентилятор на базі IoT, що підтримує ШИМ сигнал. Отже, запропонований метод нечіткого ШИМ-перетворювача було використані для моделювання роботи нечіткої моделі з використанням трьох параметрів: температури, відносної вологості та концентрації діоксид вуглецю (CO₂) відносно до вихідного сигналу ШИМ. Запропонований метод демонструє простоту тренування розумної системи управління вентилятором та надає можливість ефективного споживання енергії.

Ключові слова: системи контролю, нечітке логічне виведення, Internet of Things, смарт-вентилятор

Актуальність. Нині інтелектуальні системи продовжують заповнювати світ. Хоча все ще існує думка, що IoT технології – це розумні будинки та теплиці, однак IoT – це будь-який об'єкт, що містить сенсори, програмне забезпечення або інші технології для підключення та обміну даними з іншими за допомогою мережі Інтернет. Отже, діапазон таких об'єктів величезний, від звичайних побутових предметів до складних промислових інструментів. За даними компанії Oracle, нині вже існує понад 7 млрд пристроїв, підключених до IoT, і ця цифра продовжує

зростати. А до 2025 року експерти прогнозують, що ця кількість перевищить позначку 22 мільярди [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Серед пристроїв, підключених до IoT, які є досить популярними в побутовому використанні, є розумні вентиляційні системи. Існує досить застаріле уявлення про те, що вентилятори можуть бути неефективними порівняно з кондиціонерами. Однак стельові вентилятори більш безпечні для здоров'я людини, а також енергоефективніші. Крім того, вони постійно вдосконалюються та стають розумнішими, надаючи можливість дистанційного керування з використанням вашого смартфона. Наприклад, Google та Amazon створили успішну лінійку розумних вентиляторів, які працюють з голосовими помічниками і якими можна дистанційно керувати зі смартфона через Інтернет. Вони дозволяють користувачам контролювати температуру і вологість повітря, перебуваючи далеко від дому, а також налаштовувати клімат-контроль на свій смак. Тому нині існує велика потреба у розробці та вдосконаленні ефективних методів інтелектуального керування вентиляційними системами IoT. Однією з методологій інтелектуалізації систем керування є розробка систем нечіткого логічного висновку (НЛВ), основу яких лежить нечітка логіка, основоположником якої є Л. Заде [2]. Саме до НЛВ-систем приділятиметься основна увага в цій роботі при розробці систем розумної вентиляції.

Слід також зазначити, що такі системи, окрім вищезазначених переваг, мають недоліки, одним з яких є енерговитратність [3, 4]. Системи опалення, вентиляції та кондиціонування споживають найбільшу кількість енергії в комерційних будівлях в порівнянні з іншими системами. Ці цифри коливаються від 40 до 70 відсотків загального споживання електроенергії у будівлях. Міжнародне енергетичне агентство прогнозує, що попит на приміщення з системами охолодження зросте в три рази між 2010 і 2050 роками. Тому розвиток платформ на базі IoT у галузі смарт-кондиціонування потребує покращення з боку витрачання ресурсів. Ми повинні розробити нові методи, що покращать енергоефективність систем кондиціонування для досягнення скорочення загального споживання енергії в будівлях і, як наслідок, зменшення експлуатаційних витрат на електроенергію.

Мета дослідження. Системи кондиціонування IoT все ще базуються на традиційних методах керування, таких як циклічне або керування ввімкненням / вимкненням, стабільне, модуляція або пропорційний контроль. Вони можуть бути досить застарілими, неточними та неефективними в споживанні енергії в розумних системах кондиціонування. Нова ідея полягає в тому, щоб застосувати нечітку логіку в системах Інтернету речей, для оцінки різних факторів навколишнього середовища, такі як температура, вологість тощо, та перетворити їх за допомогою алгоритму Такагі-Сугено в сигнал широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для контролю швидкості двигунів, теплової потужності нагрівачів та інших параметрів енергоефективним і тихим способом.

Матеріали та методи дослідження. Інтелектуальні нечіткі системи активно застосовуються для вирішення широкого класу завдань у багатьох сферах промисловості та життєдіяльності (медицина, виробництво, безпека, управління тощо). Належачи до класу інтелектуальних, нечіткі системи покликані вирішувати вузькоспеціалізовані завдання творчого спрямування. До таких завдань можуть належати системи прийняття рішень, експертні системи, системи штучного інтелекту, системи тестування, оцінювання, класифікації тощо.

Нечітке логічне виведення. Системи керування, засновані на нечітких перетворювачах вхідних даних у вихідні, використовуються у тих випадках, коли мають місце такі особливості:

- система оперує якісними величинами та характеристиками;
- присутня неповнота даних про об'єкт, що моделюється, та його оточення;
- об'єкт, що досліджується, є вкрай складним для моделювання та знаходження ідеальних рішень;
- є нелінійна залежність вхід-вихідних даних;
- прийняття рішень системою ґрунтується на знаннях та досвіді експертів у певній проблемній галузі.

На рис. 1 представлено загальну схему системи нечіткого логічного висновку, яка однаково підходить для всіх нечітких алгоритмів (Такагі-Сугено, Мамдані, Ларсена...). Як видно на рисунку, множина вхідних значень $X = \{x_i: i = \overline{1, n}\}$ перетворюється на множину вихідних заключень $Y = \{y^j: j = \overline{1, m}\}$, використовуючи алгоритм логічного виведення на нечіткій основі знань. База знань, притаманно будь-якого алгоритму нечіткого логічного висновку, складається з блоків нечітких правил $B = \{R_w, w = \overline{1, L}\}$ продукції IF-THEN (1).

$$R_w: \text{IF } x \text{ is } A \text{ THEN } y \text{ is } B, \quad (1)$$

де $x \subseteq X$, $y \subseteq Y$, A – вхідна лінгвістична змінна, B – вихідна лінгвістична змінна відповідно.

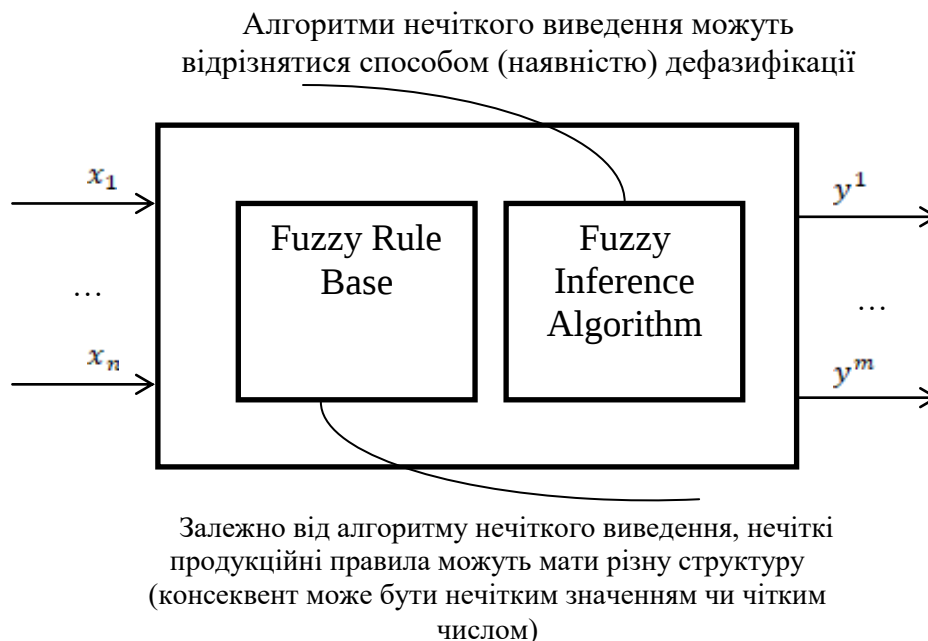


Рис. 1. Загальна схема нечіткого перетворювача даних

Загалом, функціонування нечітких систем складається з таких етапів:

1. фаззифікація вхідних змінних;
2. активація нечітких продукційних правил;
3. агрегація підзаключень правил (у консеквентах);
4. акумуляція підзаключень консеквентів нечітких правил (проводиться лише тих систем, консеквенти яких є нечіткими значеннями);

5. дефазифікація вихідних значень (або процедура, аналогічна дефазифікації, якщо консеквенти правил – чіткі числа).

Розглянемо докладніше нечітке логічне виведення Такагі-Сугено [5], оскільки для досліджень у цій роботі воно становить найбільший інтерес у нечітких перетворювачів даних в IoT-системах. Основною особливістю систем Такагі-Сугено є можливість перетворення якісних показників (фазифікованих значень) у кількісні, оскільки підзаклучення нечітких правил складаються з функціональних залежностей від набору вхідних даних (первинних, нефазифікованих) та виробляють завідомо чіткі числа.

Нечітке правило Такагі-Сугено першого порядку має вигляд [6]:

$$R_w^j: \text{ IF } x \text{ is } A_w^j \text{ THEN } y_w^j = k_{w0}^j + \sum_{i=1}^n k_{wi}^j x_i \quad (2)$$

де j – номер вихідного значення, що виробляється системою, w – номер нечіткого правила, n – кількість вхідних змінних, k_{w0}^j – вільний коефіцієнт. Консеквент правила по суті є виваженим сумуванням нефазифікованих вхідних передумов.

Вихідне закінчення для кожного y^j (рис. 1) за алгоритмом Такагі-Сугено є знаходження середньозваженого значення підзаклучень правил у нечіткій базі знань (3):

$$y^j = \frac{\sum_{w=1}^L [\wedge_{i=1}^n \mu_w^j(x_i)] (k_{w0}^j + \sum_{i=1}^n k_{wi}^j x_i)}{\sum_{w=1}^L [\wedge_{i=1}^n \mu_w^j(x_i)]} = \frac{\sum_{w=1}^L \mu_w^j(x) y_w^j}{\sum_{w=1}^L \mu_w^j(x)}, \quad (3)$$

де $\wedge$ – є операцією взяття мінімуму, $\mu(x)$ – функція належності вхідного значення нечіткому терму.

Керування вихідним ШІМ-сигналом в системах ІТ на основі інтелектуальних нечітких перетворювачів. ШІМ-сигнал [7, 8] (широтно-імпульсна модуляція) – один з різновидів цифрового сигналу і призначений для керування потужністю (швидкістю) на вихідних пристроях на основі періодичного вмикання/вимкнення напруги на порту (рис. 2). Одним із завдань, що ставиться в мікроконтроллерних IoT-системах, є керування ШІМ-сигналом, причому найчастіше його значення залежить від вхідних параметрів, лічених в інших датчиків (температури, датчика задимленості, наближення тощо).

Загальна споживана потужність на виході ШІМ розраховується як:

$$P_{out} = \frac{E_r + E_{dr} + E_f + E_{rc}}{T_{pwm}}, \quad (4)$$

де E_r – споживання енергії під час переходу з Low у High режим, E_{dr} – споживання енергії протягом поточного часу подачі для підтримки High режиму, E_f – споживання енергії під час переходу від High у Low режим, E_{rc} – споживання енергії протягом часу для відновлення струму для підтримки низького режиму, T_{pwm} – загальний час роботи сигналу ШІМ (0..255).

Таким чином, часто в таких системах є нелінійна залежність між вхідними параметрами і вихідним ШІМ-сигналом. Слід зазначити, що дані з датчиків дуже часто є якісними показниками і вимагають введення нечітких лінгвістичних значень для подальшого їх оперування і класифікації.

У роботі запропоновано використання систем Такагі-Сугено для перетворення вхідних даних із датчиків у вихідний ШІМ-сигнал. Характерною особливістю такого підходу є можливість перетворення вхідних даних з декількох датчиків, реалізуючи нелінійну залежність вхід-вихід (модель перетворювача якісних даних з датчиків ШІМ-сигнал представлена на рис. 3). Такий підхід дозволяє реалізовувати інтелектуальні IoT-системи з високою економією енергоспоживання за рахунок використання ШІМ як керуючого сигналу.

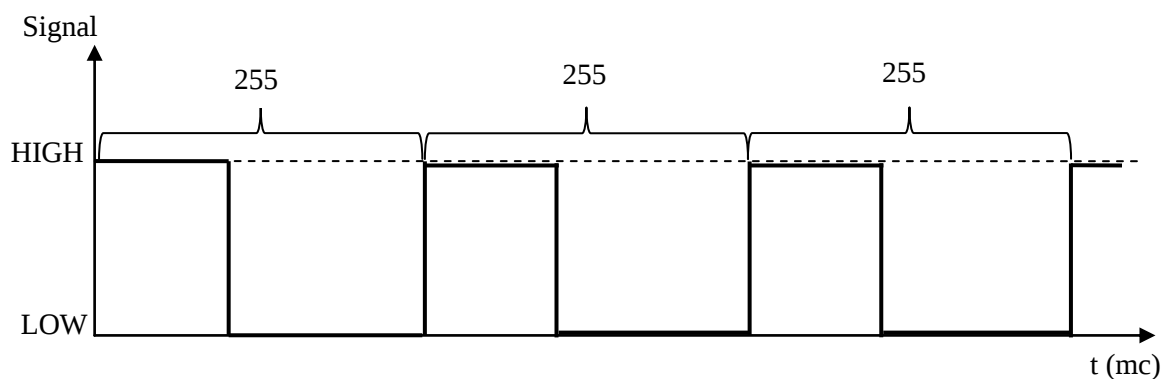


Рис. 2. Схема цифрового вихідного ШІМ-сигналу

На рис. 3 вхідні параметри представлені вектором нечітких (фазифікованих) значень, що є якісними характеристиками, зчитаних з датчиків:

$$\tilde{X} = \{\tilde{x}_i, i = \overline{1, n}\},$$

$$\tilde{x}_i = \left\{ \frac{x_i}{\mu_{term\ 1}(x_i)} + \frac{x_i}{\mu_{term\ 2}(x_i)} + \dots + \frac{x_i}{\mu_{term\ Q}(x_i)} \right\},$$

где $+$ є операцією об'єднання, $\tilde{X}$ – вектор нечітких вхідних значень.

Підзаключення нечітких правил (нечіткі правила Такагі-Сугено), формують зважені значення вихідного сигналу ШІМ від 0 до 255, які потім проходять процедуру знаходження середньозваженого значення, яке, відповідно, лежатиме в діапазоні [0..255].

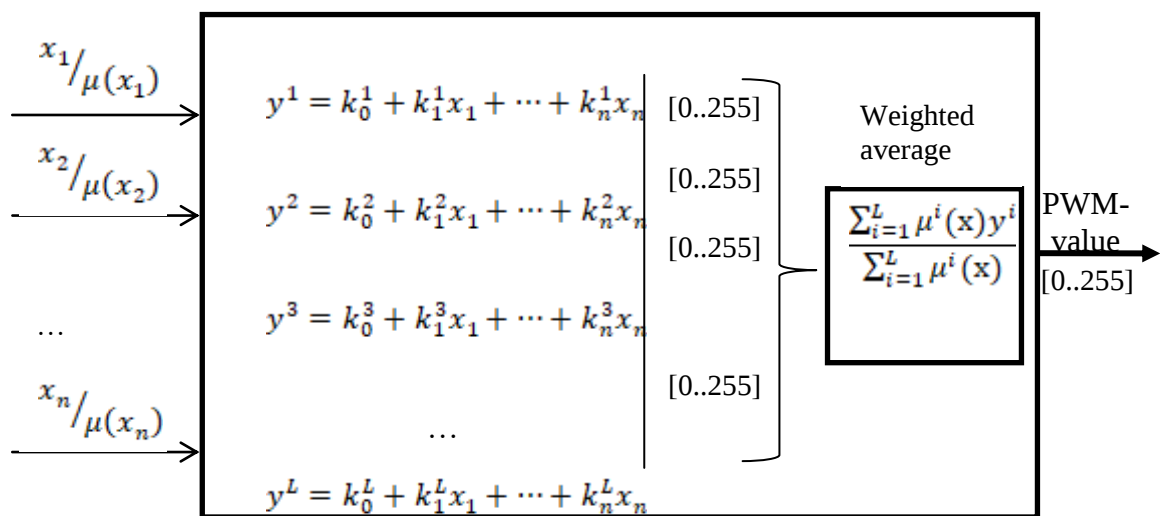


Рис. 3. Модель перетворювача нечітких (якісних) даних з датчиків у ШІМ-сигнал (діапазон значень [0..255])

Smart-вентилятор на основі нечіткого перетворювача якісних показників у ШІМ-сигнал. У цій роботі розроблена модель інтелектуального вентилятора на основі нечіткого керування з використанням запропонованого в роботі методу нечіткого перетворення якісних показників у ШІМ-сигнал. Використання нечіткого контролера дозволяє системі вентилявання працювати в різних режимах роботи, підлаштовуючись під зовнішнє середовище, а також враховувати індивідуальні вимоги замовника, клімат конкретного регіону, медичні протипоказання тощо. Експертного набору правил, дає можливість режими роботи зробити «плаваючими».

Також варто відзначити, що ефективне споживання енергії, стійкість, екологічність – умови, які слід враховувати в сучасному науковому світі. Системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря можуть бути найбільшими

споживачами енергії в будівлі. Різні підходи до моделювання цих систем та надання їм додаткових контролерів можуть змінити ситуацію на краще. Найпоширенішими методами, що дозволяють вирішити вищезазначені проблеми є класичне використання пропорційно-інтегрально-диференціальних контролерів та computational Intelligence techniques.

Перевагою використання інтелектуальних методів керування в системах вентиляції перед класичними є можливість регулювати кімнатну температуру при режимах часткового навантаження, мінімізувати помилки системи при стабільній роботі/роботі в стаціонарному стані (steady-state error). Також було відмічено, що швидкість потоку котушки охолодження з охолодженою водою виявляє незадовільну коливальну реакцію при операціях з частковим навантаженням із ШІМ-контролем. У недавніх дослідженнях була спроба використання нечіткої логіки для моделювання процесу охолодження вентилюваних систем.

Проте існуючі системи не враховують, що опір на транзисторах і резисторах також призводить до додаткової втрати енергії, оскільки її вони спалюють як тепло. Такі системи постійно працюють на повній швидкості, видаючи багато шуму та витрачаючи багато енергії. Рішенням може стати використання ШІМ, що варіює швидкість двигунів приладів, тому вони споживають стільки енергії, скільки їм потрібно.

Архітектурне проектування системи Smart кондиціонування. Базова архітектурна модель розумної системи кондиціонування на основі нечіткої бази складається з (рис 4):

1. Компоненти датчиків:

- 1.1. датчик температури;
- 1.2. датчик відносної вологості;
- 1.3. датчик газу.

2. Блок мікроконтролера – проміжний компонент, який приймає передану інформацію від датчиків для обробки зібраних даних.

3. Хмарний інтерфейс (API).

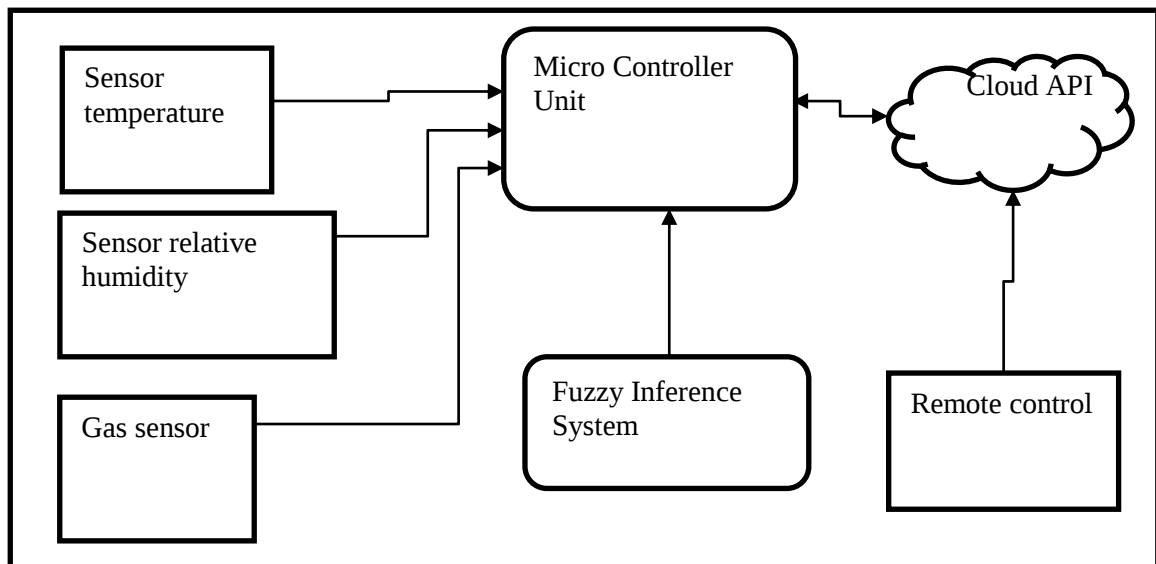


Рис. 4. Структурна схема розумної системи кондиціонування на основі нечіткої логіки

Висновки і перспективи. У роботі розроблено метод нечіткого керування вихідним ШІМ-сигналом на основі алгоритму нечіткого логічного виводу Такагі-Сугено. Розроблено IoT-систему інтелектуального вентилятора на основі підходу перетворення фазифікованих входних параметрів, отриманих з датчиків, у ШІМ-сигнал для керування швидкістю руху вентилятора. Розроблено підхід для керування інтелектуальним вентилятором на основі нечіткого керування, а також його апаратна архітектура.

Список використаних джерел

1. Oracle – What Is the Internet of Things (IoT)? 2021. URL: <https://www.oracle.com/internet-of-things/what-is-iot/>
2. Zadeh L. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. American Elsevier Publishing Company. 1973
3. Air Conditioning. URL: <https://www.energy.gov/energysaver/home-cooling-systems/air-conditioning>
4. Westphalen D., Koszalinski S. Energy Consumption Characteristics of Commercial Building HVAC Systems. Chillers, Refrigerant Compressors and Heating Systems. 2001. Vol. 1.
5. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control. IEEE Trans. of Systems, Man and Cybernetics. 1985. Vol. 15, No. 1. P. 116–132.
6. Brown N. Introduction To PWM: How Pulse Width Modulation Works. 2021. URL: <https://www.kompulsa.com/introduction-pwm-pulse-width-modulation-works/>
7. Ершов С. В., Пономаренко Р. М. Метод параллельного нечеткого вывода для систем Такаги–Сугено высшего порядка. Кибернетика и системный анализ. 2018. Том 54, № 6. С. 170–180.

8. Patel A., Patel A.R., Vyas D.R., Patel K.M. Use of PWM Techniques for Power Quality Improvement. International Journal of Recent Trends in Engineering. 2009. Vol. 1, No. 4. P. 99–102.

References

1. Oracle – What Is the Internet of Things (IoT)? (2021). Available at: <https://www.oracle.com/internet-of-things/what-is-iot/>

2. Zadeh, L. (1973). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. American Elsevier Publishing Company.

3. Air Conditioning. Available at: <https://www.energy.gov/energysaver/home-cooling-systems/air-conditioning>

4. Westphalen, D., Koszalinski, S. (2001). Energy Consumption Characteristics of Commercial Building HVAC Systems. Chillers, Refrigerant Compressors and Heating Systems 1.

5. Takagi, T., Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control. IEEE Trans. of Systems, Man and Cybernetics, 15(1), 116–132.

6. Brown, N. (2021). Introduction To PWM: How Pulse Width Modulation Works. Available at: <https://www.kompulsa.com/introduction-pwm-pulse-width-modulation-works/>

7. Yershov, S. V., Ponomarenko R. M. (2018). Parallel Fuzzy Inference Method for Higher Order Takagi–Sugeno Systems. Cybernetics and Systems Analysis, 54(6), 170–180.

8. Patel, A., Patel, A. R., Vyas, D. R., Patel, K. M. (2009). Use of PWM Techniques for Power Quality Improvement. International Journal of Recent Trends in Engineering, 1(4), 99–102.

ШИМ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ТАКАГИ-СУГЕНО ДЛЯ СИСТЕМ INTERNET OF THINGS

Р. М. Пономаренко, А. Б. Демчук

Аннотация. Цель исследования состоит в том, чтобы применить нечеткую логику в системах Интернета вещей для оценки различных факторов окружающей среды, таких как температура, влажность и т.д., тепловой мощности нагревателей и других параметров энергоэффективным способом.

В работе исследуются применение нечетких преобразователей данных на основе интеллектуальных систем нечеткого логического вывода в системах Internet of Things. Разработан подход преобразования фазифицированных входных параметров, считанных с датчиков в ШИМ-сигнале на основе нечеткого алгоритма Такаги-Сугено. На основе предложенного метода был разработан смарт-вентилятор на базе ИТ, поддерживающий ШИМ сигнал. Следовательно, предложенный метод нечеткого ШИМ-преобразователя был использован для моделирования работы нечеткой модели с использованием трех параметров: температуры, относительной влажности и концентрации диоксида углерода (CO₂) по отношению к сигналу ШИМ. Предлагаемый метод демонстрирует простоту тренировки разумной системы управления вентилятором и дает возможность эффективного потребления энергии.

Ключевые слова: *системы контроля, нечеткий логический вывод, Internet of Things, смарт-вентилятор*

PWM CONVERTER BASED ON TAKAGI-SUGENO FUZZY LOGIC INFERENCE FOR INTERNET OF THINGS SYSTEMS

R. Ponomarenko, A. Demchuk

Abstract. *The aim of the study is to apply fuzzy logic in IoT systems to estimate various environmental factors such as temperature, humidity, etc., and to convert them using the Takagi-Sugeno algorithm into a pulse-width modulation (PWM) signal to control motor speed, thermal power of heaters and other parameters in an energy efficient way.*

The paper explores the use of fuzzy data converters based on intelligent fuzzy inference systems in Internet of Things systems. An approach has been developed for converting fuzzified input parameters read from sensors in a PWM signal based on the Takagi-Sugeno fuzzy algorithm. Based on the proposed method, an IT-based smart fan was developed that supports a PWM signal. Therefore, the proposed fuzzy PWM converter method was used to simulate the operation of a fuzzy model using three parameters: temperature, relative humidity, and carbon dioxide (CO₂) concentration in relation to the PWM signal. The proposed method demonstrates the ease of training a reasonable fan control system and enables efficient energy consumption.

Key words: *control systems, Fuzzy inference, Internet of Things, Smart fan*