

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-67>

УДК 621.396

СЕМЕНОВА ОЛЕНА

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5312-9148>e-mail: semenova.o.o@vntu.edu.ua**ЛУЦИШИН АНДРІЙ**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0005-4612-5823>e-mail: lutsishin07@gmail.com**ДЖУС АНДРІЙ**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0005-3583-5766>e-mail: dzhus1988@gmail.com**МАРТИНЮК ВОЛОДИМИР**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0006-8421-0348>e-mail: vm4ukr@gmail.com

МАРШРУТИЗАЦІЯ В ІНТЕРНЕТІ РЕЧЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЙ ОБЧИСЛЮВАНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Інтернет речей (IoT) є однією з технологій сучасної цифрової трансформації, яка забезпечує взаємодію пристроїв, об'єктів і сенсорів, що вимагає ефективної та надійної маршрутизації даних у режимі реального часу. Традиційні алгоритми маршрутизації часто не враховують невизначеності, притаманні IoT-середовищу, такі як нестабільність з'єднання, обмеженість енергоресурсів та змінність мережевих параметрів, що обумовлює потребу в новітніх інтелектуальних підходах. У зв'язку з цим дедалі більшої актуальності набуває впровадження технологій обчислюваного інтелекту, зокрема нечітких контролерів, штучних нейронних мереж та еволюційних алгоритмів, які здатні забезпечити гнучке й ефективне керування потоками даних. У статті розглянуто застосування технологій обчислюваного інтелекту для розв'язання задачі маршрутизації в IoT. Особливу увагу приділено гібридним підходам, які поєднують переваги кількох інтелектуальних методів для підвищення ефективності процесів маршрутизації в ресурсно-обмеженому середовищі IoT. У межах дослідження розроблено нечіткий контролер у програмі MATLAB, що забезпечує прийняття рішень про вибір оптимального маршруту на основі основних параметрів мережі. Для підвищення точності системи нечіткий контролер було перетворено у нейро-нечітку систему, яка поєднує здатність нечіткої логіки до обробки невизначеності та навчальні можливості штучних нейронних мереж. Подальша оптимізація системи здійснена за допомогою генетичного алгоритму, що дозволило автоматично налаштувати параметри нечітких правил і функцій належності для досягнення найкращої продуктивності маршрутизації. Представлена система є прикладом ефективного застосування інтелектуальних методів у критично важливих задачах IoT і відкриває перспективи для подальших досліджень в напрямку мереж наступного покоління.

Ключові слова: нечіткий контролер, нейронна мережа, генетичний алгоритм, Інтернет речей, маршрутизація, інтелектуальні технології.

SEMENOVA OLENA, LUTSYSHYN ANDRII, DZHUS ANDRII, MARTYNIUK VOLODYMYR

Vinnytsia National Technical University

ROUTING IN THE INTERNET OF THINGS USING COMPUTATIONAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

The Internet of Things (IoT) is one of the technologies of modern digital transformation, which provides interaction of devices, objects and sensors, that requires efficient and reliable data routing in real time. Traditional routing algorithms often do not take into account the uncertainties inherent in the IoT environment, such as unstable connection, limited energy resources and variability of network parameters, which necessitates the need for new intelligent approaches. In this regard, the implementation of computational intelligence technologies, in particular fuzzy controllers, artificial neural networks and evolutionary algorithms, which are able to provide flexible and efficient management of data flows, is becoming increasingly relevant. The article discusses the application of computational intelligence technologies to solve the routing problem in IoT. Special attention is paid to hybrid approaches that combine the advantages of several intelligent methods to increase the efficiency of routing processes in a resource-constrained IoT environment. As part of the research, a fuzzy controller was developed in the MATLAB program, which provides decision-making on the selection of the optimal route based on the main network parameters. To increase the accuracy of the system, the fuzzy controller was transformed into a neuro-fuzzy system that combines the ability of fuzzy logic to handle uncertainty and the learning capabilities of artificial neural networks. Further optimization of the system was carried out using a genetic algorithm, which allowed automatically adjusting the parameters of fuzzy rules and membership functions to achieve the best routing performance. The presented system is an example of the effective application of intelligent methods in critical IoT tasks and opens up prospects for further research in the direction of next-generation networks.

Keywords: fuzzy controller, neural network, genetic algorithm, Internet of Things, routing, intelligent technologies.

Стаття надійшла до редакції / Received 03.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Постановка проблеми

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) – це глобальна система фізичних об'єктів, що оснащені

сенсорами, програмним забезпеченням та іншими технологіями, які дозволяють їм підключатися до мережі та обмінюватися даними з іншими пристроями і системами через мережу Інтернет. IoT відкриває нові можливості в різних сферах — від розумного дому, медицини та транспорту до промислової автоматизації та сільського господарства. Прогнозується, що кількість підключених до мережі пристроїв у найближчі роки досягне десятків мільярдів, що створює серйозні виклики для існуючих підходів до організації передачі даних у таких мережах [1].

Одним із найбільш критичних аспектів забезпечення ефективного функціонування IoT-середовища є маршрутизація — процес вибору оптимального шляху передачі даних між пристроями. У порівнянні з традиційними мережами, IoT має низку специфічних характеристик, які ускладнюють застосування класичних протоколів маршрутизації. До таких характеристик належать висока динамічність топології, велика кількість вузлів з обмеженими обчислювальними та енергетичними ресурсами, а також вимоги до низької затримки, високої надійності та енергоефективності [2].

Традиційні протоколи маршрутизації, такі як RIP та OSPF, часто не можуть забезпечити необхідну гнучкість та масштабованість для IoT-систем. Хоча у таких протоколах підтримання великих таблиць маршрутизації є звичною практикою, в середовищі IoT це важко реалізувати через обмеження ресурсів. Протокол LEACH розроблений для бездротових сенсорних мереж і використовує кластеризацію для мінімізації енергоспоживання. Однак LEACH не враховує зміни в топології та не адаптується до динаміки навантаження. У класичних протоколах, таких як AODV, маршрути встановлюються на вимогу, але перезавантаження маршруту при зміні топології супроводжується затримками та зростанням обміну службовими повідомленнями. Протокол RPL є стандартом для IoT, але має обмеження: він побудований на деревоподібній топології, що робить його вразливим до втрачених вузлів або несподіваних збоїв у каналах. Окрім того, цей протокол добре працює у малих і середніх мережах, однак масштабування до тисяч вузлів викликає зниження продуктивності та збільшення навантаження на контролери та маршрутизатори [3].

Все це обумовлює необхідність пошуку нових підходів, здатних адаптуватися до динамічних умов середовища та ефективно використовувати обмежені ресурси пристроїв.

Аналіз останніх джерел

Одним із перспективних напрямів у науці та техніці є використання технологій обчислювального інтелекту, таких як нечітка логіка, штучні нейронні мережі, а також еволюційні та росві алгоритми [4]. Зокрема, ці технології дозволяють реалізувати інтелектуальні маршрутизатори, що здатні самостійно навчатися, приймати оптимальні рішення в реальному часі та ефективно адаптуватися до змін у мережі. Обчислювальний інтелект надає можливість прогнозувати навантаження на мережу, виявляти збої, оптимізувати витрати енергії та забезпечувати більш ефективну маршрутизацію без жорстко визначених правил.

У ході дослідження були проаналізовані актуальні наукові роботи, присвячені застосуванню технологій обчислювального інтелекту для розв'язання задач маршрутизації в мережі Інтернету речей.

Проведений аналіз демонструє, що використання протоколів маршрутизації на базі нечіткої логіки дозволяє знизити енергоспоживання та підвищити тривалість життя мережі [5-7]. Ще однією перевагою такого підходу є низька обчислювальна складність, що робить її особливо корисною для пристроїв з обмеженими ресурсами.

Штучні нейронні мережі у процесі маршрутизації в IoT використовуються для класифікації маршрутів, передбачення перевантажень каналів та перенаправлення трафіку [8, 9], проте потребують потужних обчислюваних ресурсів та великого обсягу навчальних даних.

Еволюційні алгоритми, такі як генетичні алгоритми, оптимізація на основі рою частинок, мурашині алгоритми, добре підходять для пошуку оптимальних маршрутів у складних мережах IoT. Вони дозволяють швидко знаходити оптимальні розв'язки без необхідності точного моделювання мережі [10].

Гібридні методи, які поєднують технології нечіткої логіки та нейронних мереж [11, 12] демонструють здатність до самоорганізації, точність прийнятих рішень та стійкість до динамічних змін мережевих параметрів.

Генетично-нечіткі гібридні методи дозволяють ефективно поєднувати глобальні оптимізаційні можливості генетичних алгоритмів із гнучкістю нечіткої логіки для досягнення глобальної оптимізації маршрутів [13, 14].

В той же час, досить мало уваги приділяється гібридними методам, які поєднують всі три технології.

Такий підхід забезпечує підвищену ефективність маршрутизації в мережах Інтернету речей за рахунок оптимального вибору маршрутів з урахуванням динамічних змін у мережі [15]. Використання генетичних алгоритмів сприяє глобальному пошуку найкращих маршрутів, тоді як нейронні мережі забезпечують адаптацію до нових мережевих умов, а нечітка логіка дозволяє приймати рішення в умовах невизначеності.

Таким чином, інтеграція обчислювального інтелекту до процесів маршрутизації в IoT дозволяє адаптивно реагувати на зміну топології, знижувати енергоспоживання та підвищувати якість обслуговування мережі. У подальших дослідженнях доцільно зосередитися на гібридних моделях, що відповідають вимогам масштабованості IoT-систем.

Мета та завдання дослідження

Метою є даної роботи є розробка та дослідження контролера маршрутизації для використання у мережах Інтернету речей.

Для досягнення мети потрібно виконати такі завдання:

1. Розробити модель нечіткого контролера для прийняття рішень щодо вибору оптимального маршруту з урахуванням параметрів мережі.
2. Реалізувати нейро-нечітку систему на основі розробленого контролера для підвищення адаптивності та точності.
3. Застосувати генетичний алгоритм для оптимізації параметрів нечіткої системи.
4. Провести моделювання створеної моделі в середовищі MATLAB.

Виклад основного матеріалу

У рамках даного дослідження було розроблено нечіткий контролер маршрутизації, який працює таким чином. На вхід нечіткого контролера надходять три вхідні величини, за якими оцінюється якість маршруту до певного вузла. Ці вхідні дані обробляються у нечіткому контролері і на його виході з'являється вихідне значення, яке відповідає статусу цього маршруту.

Вхідними лінгвістичними змінними нечіткого контролера, що розробляється у даній роботі, є залишкова енергія вузла мережі, навантаження вузла, відстань від поточного вузла. Вони були обрані виходячи із наступних міркувань.

Залишкова енергія вузла мережі – це кількість енергії, яка залишилася в вузлі після виконання обчислювальних та комунікаційних операцій. У контексті маршрутизації цей показник є важливим для вибору оптимальних маршрутів передачі даних, оскільки дозволяє мінімізувати ризик втрати вузлів через енергетичне виснаження. Врахування залишкової енергії у процесі маршрутизації сприяє подовженню тривалості життя мережі IoT та забезпеченню її стійкості.

Навантаження (трафік) вузла мережі IoT визначається як обсяг даних, що передається через вузол або обробляється у ньому за певний проміжок часу. У контексті маршрутизації цей параметр слугує індикатором перевантаження, яке може призвести до затримок, втрати пакетів або зниження якості обслуговування. Врахування навантаження вузлів під час маршрутизації дозволяє балансувати трафік у мережі, забезпечуючи ефективне використання ресурсів і стабільну передачу даних.

Значення відстані відповідає фізичному розташуванню вузлів мережі IoT один відносно другого. У контексті маршрутизації цей параметр суттєво впливає на енергоспоживання та затримку передачі даних, оскільки чим більша відстань, тим вищі витрати енергії на комунікацію. Оптимізація маршрутів з урахуванням міжвузлової відстані дозволяє мінімізувати загальні витрати ресурсу мережі та підвищити її ефективність.

Вихідною змінною розробленого нечіткого контролера є статус маршруту. Це узагальнена характеристика обраного шляху передачі даних між вузлами, яка відображає поточну придатність певного маршруту для передачі даних. В даному випадку, це значення в інтервалі від 0 до 100, яке показує, наскільки доцільним буде обрати саме цей маршрут. Врахування статусу маршруту при здійсненні маршрутизації дозволяє забезпечити енергоефективність мережі, підвищити надійність та швидкість передачі даних і зменшити ризики втрати інформації.

Розроблений нечіткий контролер типу Сугено функціонує відповідно до 11 нечітких правил, які формалізують взаємозв'язки між вхідними даними та вихідним результатом. Таке число правил забезпечує достатній рівень деталізації для адекватного моделювання складних залежностей у межах задачі, що розв'язується.

Для розроблення та дослідження запропонованого нечіткого контролера маршрутизації було використано програмний пакет MATLAB, що надає широкі можливості для моделювання, аналізу та візуалізації функціонування інтелектуальних систем, зокрема нечітких контролерів, нейронних мереж та генетичних алгоритмів. Застосування даної програми дало можливість перевірити ефективність запропонованої моделі та оцінити її поведінку. Загальний вигляд розробленого нечіткого контролера маршрутизації в програмі MATLAB зображено на рис.1.

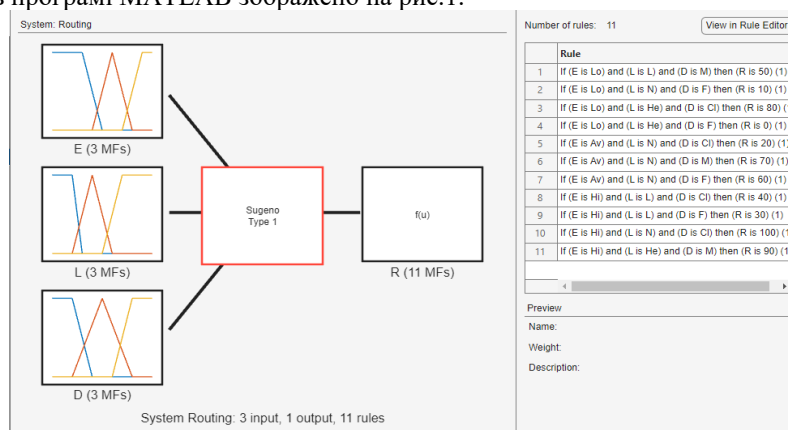


Рис. 1. Нечіткий контролер маршрутизації в програмі MATLAB

У процесі моделювання нечіткого контролера маршрутизації у програмі MATLAB спочатку були введені вхідні та вихідні змінні із відповідним визначенням діапазонів значень та функцій належності для кожної з них. Потім була сформована база нечітких правил, яка встановлює відповідності між вхідними даними та вихідною реакцією контролера. Далі було налаштовано методи агрегування, імплікації і дефазифікації відповідно до обраної моделі логічного висновку, у даному випадку це модель Сугено.

У програмному пакету MATLAB моделювання роботи нечіткого контролера здійснюється за допомогою вбудованих інструментів візуалізації та аналізу поведінки системи, що дає можливість перевірити коректність функцій належності та побудованої бази нечітких правил. Результат моделювання роботи нечіткого контролера маршрутизації подано на рис.2.

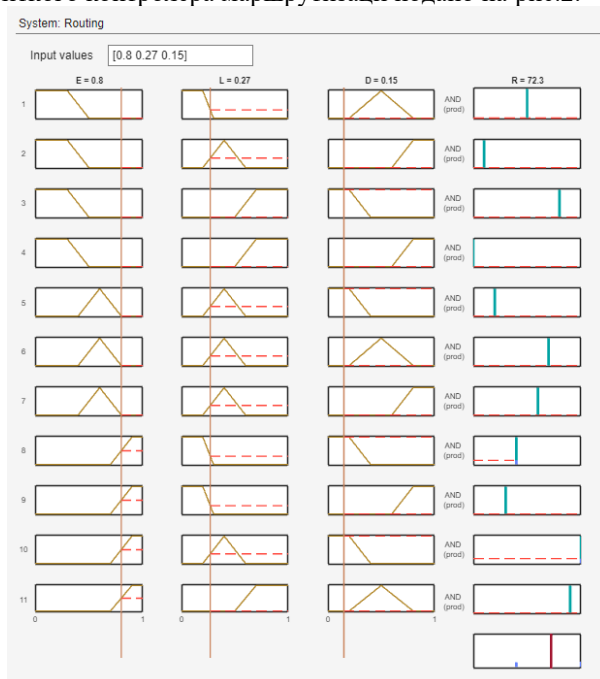


Рис. 2. Результати моделювання роботи нечіткого контролера

Перетворення нечіткого контролера в нейро-нечітку систему ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) здійснюється за допомогою інструменту ANFIS Editor GUI. Цей процес включає створення навчальної вибірки, на основі якої система ANFIS може адаптувати параметри нечіткого виводу, використовуючи нейромережеві методи. Після налаштування параметрів навчання відбувається процес тренування, в результаті якого ANFIS автоматично коригує параметри функцій належності для досягнення мінімальної похибки.

Отриману у результаті перетворення нейро-нечітку систему подано на рис.3.

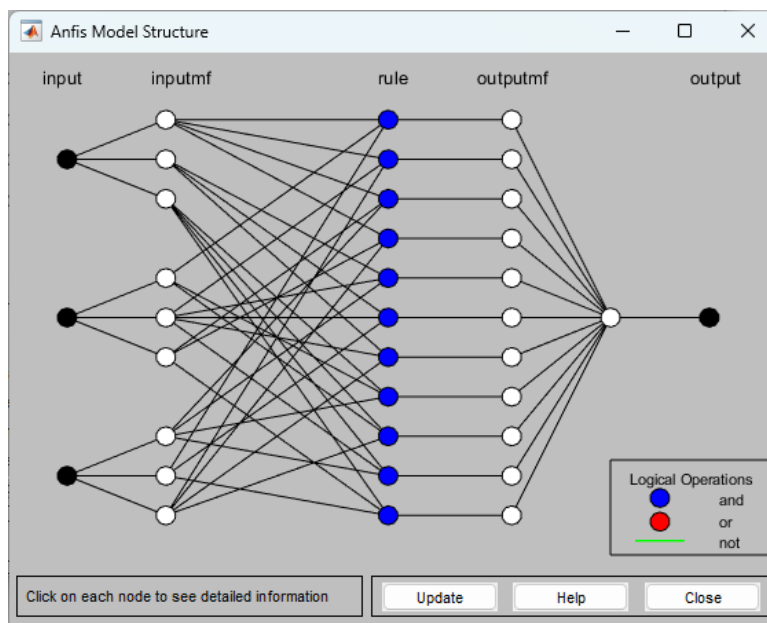


Рис.3. Нейро-нечітка система маршрутизації в програмі MATLAB

Результат оптимізації структури нечіткого контролера маршрутизації за допомогою генетичного алгоритму подано на рис.4. Така оптимізація полягає у налаштуванні параметрів нечіткого контролера – форм функцій належності та вагових коефіцієнтів правил.

З метою перевірки здатності розробленого нечіткого контролера маршрутизації адекватно оцінювати статус маршруту було здійснено його валідацію на основі тестових даних.

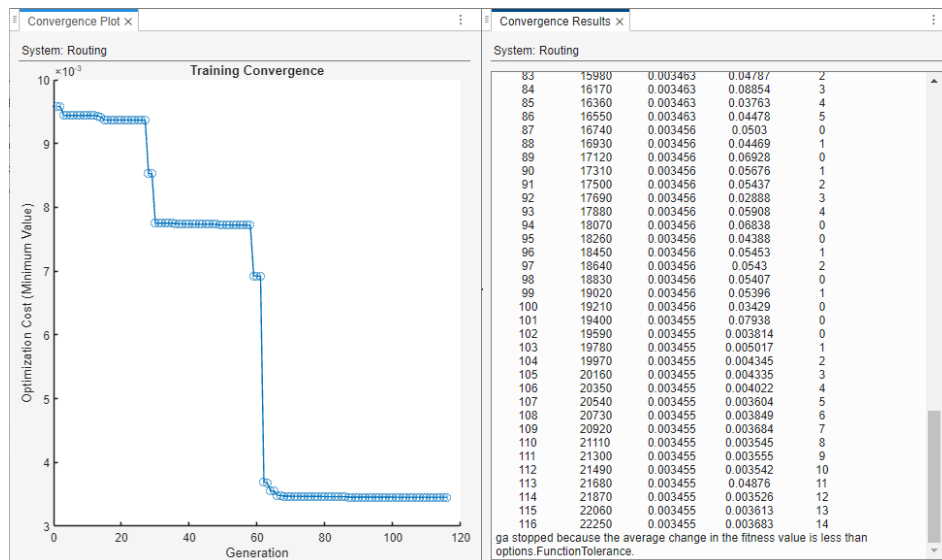


Рис.4. Результат оптимізації контролера

Результати проведеної валідації нечіткого контролера відображають відповідність між вихідними значеннями розробленої моделі та еталонними значеннями, які були отримані на основі тестових даних. У процесі валідації здійснюється обчислення вихідних значень, і порівняння їх з даними, що містяться у валідаційній вибірці. Результати валідації отримано у вигляді графіків, де фактичні та змодельовані значення візуально зіставляються (рис.5). Оскільки на одержаному графіку відсутні суттєві відхилення результатів, можна прийняти, що запропонований нечіткий контролер маршрутизації у мережі Інтернету речей функціонує із прийнятною точністю.

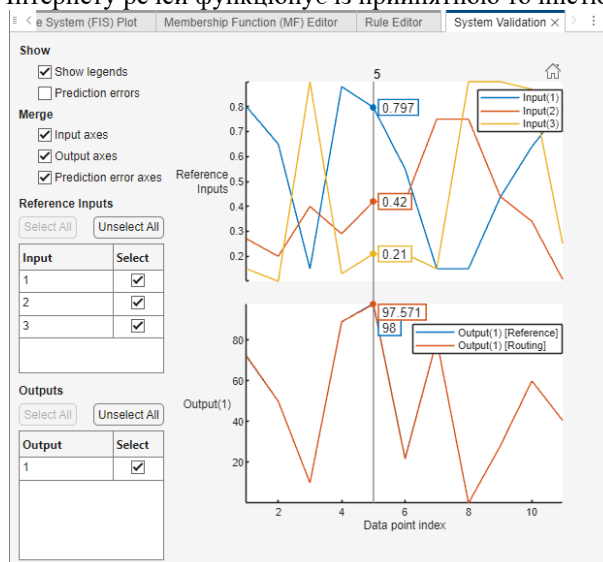


Рис. 5. Результати валідації роботи нечіткого контролера

Висновки

У статті досліджено підходи до маршрутизації в Інтернеті речей з використанням технологій обчислюваного інтелекту, зокрема нечіткої логіки, штучних нейронних мереж та еволюційних алгоритмів. Результати дослідження засвідчили, що традиційні методи маршрутизації не здатні повною мірою враховувати складну, динамічну та енергообмежену природу IoT-мережі. Розроблений у середовищі MATLAB нечіткий контролер продемонстрував ефективність у прийнятті рішень щодо вибору маршрутів з урахуванням енергетичних і топологічних параметрів мережі. Подальша інтеграція з нейромережею дозволила створити нейро-нечітку систему з можливістю навчання, а оптимізація за допомогою генетичного алгоритму значно покращила якість пристрою. Отримані результати

підтверджують доцільність використання гібридних методів обчислюваного інтелекту як ефективного інструменту для побудови маршрутизаційних протоколів у мережах Інтернету речей.

Література

1. Tamrakar, A. K., Shukla, A., Kalifullah, A. H., Reegu, F. A., & Shukla, K. (2022). Extended review on internet of things (IoT) and its characterisation. *International Journal of Health Sciences*, 8490–8500. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6ns2.7177>
2. Marietta, J., & Chandra Mohan, B. (2019). A Review on Routing in Internet of Things. *Wireless Personal Communications*, 111(1), 209–233. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06853-6>
3. Shende, D. K., S.S, S., & Angal, Y. (2020). A Comprehensive Survey of the Routing Schemes for IoT applications. *Scalable Computing: Practice and Experience*, 21(2), 203–216. <https://doi.org/10.12694/scpe.v21i2.1667>
4. Kruse, R., Mostaghim, S., Borgelt, C., Braune, C., & Steinbrecher, M. (2022). Computational Intelligence. In *Texts in Computer Science*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-42227-1>
5. Sankar, S., & Srinivasan, P. (2018). Fuzzy logic based energy aware routing protocol for Internet of Things. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 10(10), 12–19. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2018.10.02>
6. P. Pingale, R., & Shinde, S. N. (2021). Fuzzy Logic Approach for Routing in Internet of Things Network. *Tehnički Glasnik*, 15(1), 18–24. <https://doi.org/10.31803/tg-20210204155601>
7. Shah, B. (2018). Fuzzy Energy Efficient Routing for Internet of Things (IoT). In 2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN) (pp. 320–325). 2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icufn.2018.8437033>
8. Murugan, L. (2024). Analysis of ANN routing method on integrated IoT with WSN. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, 18(16), 64–76. <https://doi.org/10.3991/ijim.v18i16.48983>
9. Kuwelkar, S., & Virani, H. (2023). Enhancing the RPL Protocol Using an Artificial Neural Network for Sustainable IoT Infrastructure. In *Transitioning to Sustainable Industry, Innovation and Infrastructure*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03897-869-5-6>
10. Albalas, F., Alrabee, E., Mardini, W., & Sawafta, A. (2022). Energy-Aware Routing Approach in Internet of Things Using Genetic Algorithms. In 2022 9th International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS) (pp. 1–6). 2022 9th International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iotsms58070.2022.10062037>
11. Akbari, Y., & Tabatabaei, S. (2020). A New Method to Find a High Reliable Route in IoT by Using Reinforcement Learning and Fuzzy Logic. *Wireless Personal Communications*, 112(2), 967–983. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07086-8>
12. Thangaramya, K., Kulothungan, K., Logambigai, R., Selvi, M., Ganapathy, S., & Kannan, A. (2019). Energy aware cluster and neuro-fuzzy based routing algorithm for wireless sensor networks in IoT. *Computer Networks*, 151, 211–223. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.01.024>
13. Zulaikha Beevi, S., & Alabdulatif, A. (2022). Optimal Routing Protocol for Wireless Sensor Network Using Genetic Fuzzy Logic System. *Computers, Materials and Continua*, 70(2), 4107–4122. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.020292>
14. Shahbaz, A. N., Barati, H., & Barati, A. (2020). Multipath routing through the firefly algorithm and fuzzy logic in wireless sensor networks. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 14(2), 541–558. <https://doi.org/10.1007/s12083-020-01004-2>
15. Semenova, O., Kryvinska, N., Semenov, A., Martyniuk, V., & Voitsekhovska, O. (2024). Genetic Neuro-Fuzzy Approach towards Routing in Industrial IoT. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 935–941. <https://doi.org/10.24425/ijet.2024.152080>