



КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ МЕРЕЖНИМИ РЕСУРСАМИ ЗА РЕАЛІЗАЦІЇ ПАРАДИГМИ SDN/NFV

Вступ. З розвитком і поширенням мережних технологій, проблема ефективного керування мережами зв'язку набуває все більшої актуальності. Одним із підходів для розв'язання цієї проблеми є використання віртуалізації мережних пристроїв, а саме концепції програмно-конфігурованих мереж (SDN) і віртуалізації мережних функцій (NFV), які дозволяють використовувати неспеціалізоване обладнання, включно з обладнанням на архітектурі процесорів x86, та роблять мережі ефективнішими за рахунок оптимального використання та розподілення ресурсів. Завдяки цьому з'являється можливість використання власних моделей і методів для керування мережами зв'язку. Метою роботи є пошук та розроблення концептуальної моделі інтелектуалізованого керування мережними ресурсами у програмно-конфігурованих мережах, яка на відміну від існуючих може динамічно виділяти ресурси, залежно від потреб мережі та бути пристосованою до можливих незначних розбіжностей між отриманими даними та реальними потребами в умовах дії зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів.

Методи. Використано нейромережні методи, методи нечіткої логіки й методи імітаційного моделювання.

Результати. У роботі запропоновано концептуальну модель керування мережними ресурсами, що базується на гібридній нейронній мережі з використанням нечіткої логіки та нечіткого продукційного виведення (ANFIS), що дозволяє динамічно реагувати на потреби мережі та менш чутлива до швидкого старіння одержаних даних щодо її потреб. Отримана модель була протестована на змодельованій мережі зв'язку у середовищі MATLAB у двох сценаріях, з низьким і високим навантаженням на мережу, та показала хороший результат, який дозволяє віртуальним пристроям обробляти запити без перевантажень і мати певний запас обчислювальних можливостей для ефективної роботи й можливого незначного зростання потреб мережі.

Висновки. Розроблена модель керування мережними ресурсами в середовищі MATLAB показала високу ефективність, що доводить необхідність та актуальність подальших досліджень із використання нечіткої логіки у керуванні мережами.

Ключові слова: телекомунікаційна мережа, керування мережними ресурсами, нечітка логіка, нейронні мережі, віртуалізація мережних функцій, програмно-конфігуровані мережі, ANFIS, MATLAB.

Вступ

З розвитком і поширенням інформаційно-комунікаційних технологій, обчислювальні пристрої та мережі передачі даних стали невід'ємною частиною будь-якої сфери. Інтернет є найважливішою інформаційною технологією сучасного життя, від функціонування якої залежать усі процеси й відносини в суспільстві (Глющ, Кравченко, & Труш, 2023). Чисельність та розміри центрів оброблення даних постійно зростають, а їхні мережі розширюються з урахуванням збільшення обсягів трафіка, профіль трафіка у цих мережах також постійно змінюється. Отже, конфігурація мережі повинна вмійти адаптуватись із відповідною швидкістю. Для досягнення цього використовують віртуалізацію мережних пристроїв. Виділяють дві моделі мережної віртуалізації – програмно-конфігуровані мережі (SDN) і віртуалізацію мережних функцій (NFV). SDN – це мережа зв'язку, в якій керування мережею відокремлено від апаратних пристроїв передачі даних і реалізується програмно. NFV – це концепція, в якій мережні функції відокремлено від апаратних пристроїв. Використання зазначених технологій дозволяє створювати та керувати мережами не тільки на основі спеціалізованого мережного обладнання, а й на обчислювальних пристроях з архітектурою процесорів x86. Крім цього, це дозволяє спростити та здешевити підтримку мереж зв'язку, оптимізувати та збільшити їхню енергоефективність, а також зменшити кількість службового трафіка в них (Палагін, Євтушенко, & Гожий, 2021). Актуальність цих підходів і технологій підтверджує велика кількість наукових робіт. У роботах (Палагін, Євтушенко, & Гожий, 2021; Carrascal et al., 2023) розглянуто їхню актуальність, проблеми та можливості. У дослідженні (Суліма, & Скулиш, 2017) наведено гібридну систему керування ресурсами у мережах, які використовують концепції SDN і NFV. У роботі (Srinivas et al., 2021) розглянуто балансування навантаження в SDN-мережі з використанням машинного навчання.

З огляду на зазначене вище, дослідження та розроблення з використанням машинної концепції SDN і NFV є актуальними як з наукового, так і з комерційного погляду. Метою роботи постає пошук і розроблення концептуальної моделі інтелектуалізованого керування мережними ресурсами у програмно-конфігурованих мережах, яка на відміну від існуючих може динамічно виділяти ресурси, залежно від потреб мережі, та бути пристосованою до можливих незначних розбіжностей між отриманими даними та реальними потребами в умовах дії зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів.

Постановка задачі. Відомо, що технології SDN і NFV дозволяють створювати оптимальні й енергоефективні мережі зв'язку. Це досягають правильним розподіленням обчислювальних можливостей між віртуальними вузлами зв'язку. Для досягнення цього, кожному віртуальному пристрою надають достатню кількість ресурсів, аби він міг обробити необхідну кількість запитів без перевантажень, але не занадто велику, аби не було простою. Отже, в основі оптимального керування мережними ресурсами лежить оптимізаційна задача з пошуку оптимальної кількості обчислювальних спроможностей, які необхідно виділити для кожного віртуального мережного пристрою. У деяких розглянутих роботах (Суліма, & Скулиш, 2017; Скулиш, & Суліма, 2019) як вхідні дані для керування такими мережами,



крім актуальних даних, подають також прогнозовані дані. Проте навіть такий підхід мав свої недоліки. Телекомунікаційні навантаження формують відповідні довготермінові зміни та короткотермінові коливання параметрів функціонування мережі. Але довготермінові коливання можуть бути передбачені з високою достовірністю, шляхом аналізу змін у минулому. Варто підкреслити те, що короткотермінові зміни менш передбачувані або зовсім не передбачувані (Скулиш, & Суліма, 2019). Крім цього, дані отримані у реальному часі, можуть швидко втрачати актуальність і тим самим не відображати реальні потреби мережі.

Отже, постає задача пошуку та розроблення концептуальної моделі інтелектуалізованого керування мережними ресурсами у програмно-конфігурованих мережах, яка на відміну від існуючих може динамічно виділяти ресурси, залежно від потреб мережі та бути пристосованою до можливих незначних розбіжностей між отриманими даними та реальними потребами в умовах дії зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів. Додатково, можна дослідити ефективність отриманих моделей на змодельованій мережі зв'язку.

Методи

Для розв'язання поставленої задачі в роботі пропонується використовувати нейромережні методи, методи нечіткої логіки й методи імітаційного моделювання. В основі концептуальної моделі керування мережними ресурсами лежатиме адаптивна система нейро-нечіткого виведення (adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS) (Jang, 1993), яка поєднує принципи нейронних мереж і принципи нечіткої логіки, що дозволяє поєднувати переваги обох підходів. Завдяки використанню принципу нейронної мережі система може навчатися на основі отриманих даних і реагувати на зміни потреб мережі, а за рахунок використання системи нечіткої логіки, вхідні дані розглядатимуться як нечітке значення, що теоретично дозволить знизити чутливість моделі до незначних розбіжностей між отриманими даними та потребами мережі. На вхід моделі подаватимуться дані щодо кількості запитів від кінцевих пристроїв, а на виході будемо отримувати оцінку, щодо необхідної кількості обчислювальних можливостей для віртуального маршрутизатора. Для перевірки моделі моделюватимемо мережу зв'язку та перевірятьимемо на ній отриману модель у середовищі MATLAB.

Результати

Для створення та тестування моделей використовуватимемо змодельовану мережу зв'язку, схему якої зображено на рис. 1. Для кожного віртуального маршрутизатора була створена модель, на основі ANFIS, на вхід якої подаватимуться дані X_n щодо кількості запитів, а на виході буде необхідна кількість обчислювальних можливостей Y_k , які потрібно виділити.

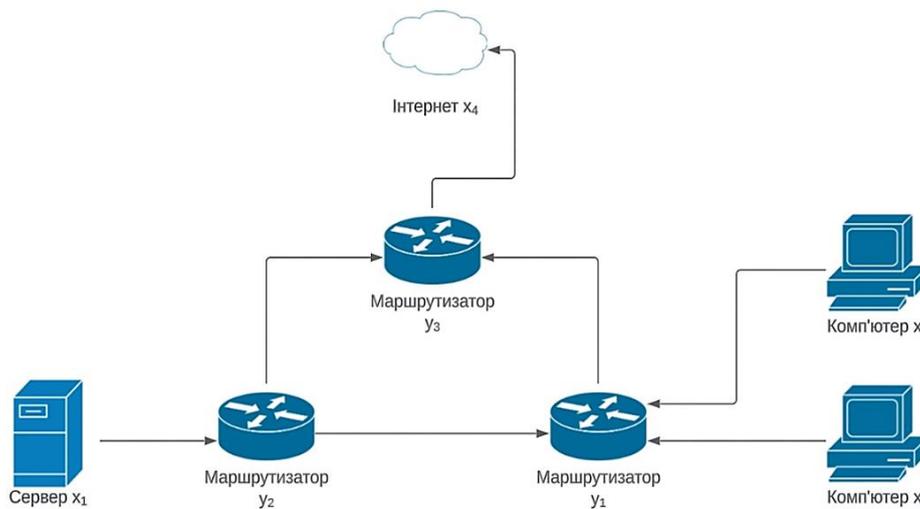


Рис. 1. Схема досліджуваної мережі зв'язку

У вказаній мережі, комп'ютери x_2 та x_3 можуть здійснювати запити до сервера x_1 і зовнішні запити в інтернеті x_4 , або відповідати на аналогічні запити. Сервер x_1 може відповідати на запити, або здійснювати їх до комп'ютерів x_2 , x_3 та інтернету x_4 . З інтернету x_4 можуть відповідати на запити, або здійснювати їх до комп'ютерів x_2 , x_3 та сервера x_1 , або здійснювати аналогічні запити. Для формалізації та спрощення наведених умов наведемо коротший запис із поясненнями у табл. 1.

У межах симуляції вважатимемо, що кожна умова має одиниці виміру запит/с та має свою область визначення, а саме $X_1, X_2, X_4, X_5, X_6, X_7, X_9, X_{10} = [10; 100]$ та $X_3, X_8 = [100; 5000]$. Як шуканий параметр, знаходитимемо необхідну кількість обчислювальних можливостей для маршрутизаторів y_1, y_2 та y_3 , які будуть також вимірюватися у запит/с та позначатися Y_1, Y_2 та Y_3 відповідно.

Як уже сказано, моделі керування мережними ресурсами базуватимуться на нейро-нечіткій мережі ANFIS. Функцією приналежності буде функція приналежності Гаусса, яка визначається таким рівнянням:

$$f(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}},$$

де x – вхідне значення, σ – середнє квадратичне відхилення, c – середнє значення. Приклад графічного зображення функції зображено на рис. 2.

Таблиця 1

Спрощений запис запитів у мережі зв'язку

Спрощений запис	Суть запису
X_1	Сервер x_1 відповідає на запит комп'ютера x_2 або здійснює запит до комп'ютера x_2
X_2	Сервер x_1 відповідає на запит комп'ютера x_3 або здійснює запит до комп'ютера x_3
X_3	Сервер x_1 відповідає на зовнішній запит з інтернету x_4 або здійснює зовнішній запит в інтернеті x_4
X_4	Комп'ютер x_2 здійснює запит у сервера x_1 або відповідає на запит від сервера x_1
X_5	Комп'ютер x_2 здійснює зовнішній запит в інтернеті x_4 або відповідає на зовнішній запит в інтернеті x_4
X_6	Комп'ютер x_3 здійснює запит у сервера x_1 або відповідає на запит від сервера x_1
X_7	Комп'ютер x_3 здійснює зовнішній запит в інтернеті x_4 або відповідає на зовнішній запит в інтернеті x_4
X_8	3 інтернету x_4 відповідають на запит сервера x_1 або здійснюють запит до сервера x_1
X_9	3 інтернету x_4 відповідають на запит комп'ютера x_2 або здійснюють запит до комп'ютера x_2
X_{10}	3 інтернету x_4 відповідають на запит комп'ютера x_3 або здійснюють запит до комп'ютера x_3

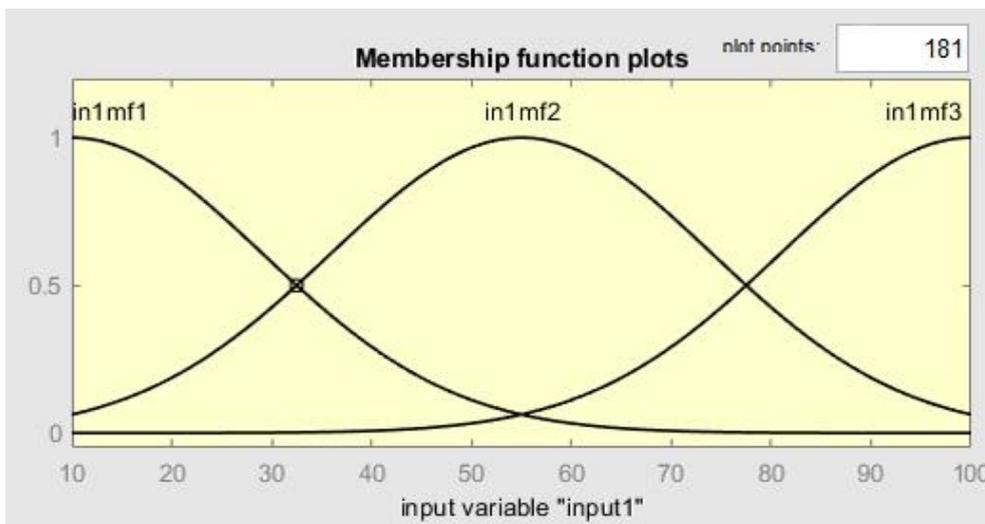


Рис. 2. Графічне зображення функцій приналежності Гаусса для X_1

Неважко помітити, що кожен маршрутизатор не оброблюватиме всі запити. Наприклад, маршрутизатор u_3 не буде оброблювати внутрішні запити, такі як X_1, X_2, X_4 та X_6 . Враховуючи це, можна оптимізувати вхідні дані для кожної моделі, відкинувши непотрібні вхідні дані, тим самим знизивши їхню розмірність і кількість нечітких правил. Для Y_1 вхідні дані будуть мати такий вигляд: $[X_1, X_2, X_4, X_5, X_6, X_7, X_9, X_{10}]$, для Y_2 $[X_1, X_2, X_3, X_4, X_6, X_8]$, а для Y_3 $[X_3, X_5, X_7, X_8, X_9, X_{10}]$.

Продукційні правила у ANFIS доцільно задавати, використовуючи кон'юнкцію. Наприклад, покажемо одне з нечітких правил для визначення Y_2 , яке виглядатиме так:

$$\begin{aligned}
 < \text{ЯКЩО } (X_1 \in In_1Mf_1) \wedge (X_2 \in In_2Mf_1) \wedge (X_3 \in In_3Mf_1) \wedge (X_4 \in In_4Mf_1) \wedge \\
 & \wedge (X_6 \in In_6Mf_1) \wedge (X_8 \in In_8Mf_1), \quad \text{ТО } Y_2 \in OutMf_1 >,
 \end{aligned}$$

де In_iMf_j – функція приналежності j для входу i , $OutMf_k$ – нечіткий вивід k .

Для дослідження ефективності отриманих моделей протестуємо їх у змодельованій моделі зв'язку в декількох сценаріях. Як критерії використовуватимемо такі правила: якщо модель виділила недостатню кількість обчислювальних ресурсів – то її роботу оцінюємо незадовільно; якщо модель виділила достатню кількість ресурсів, але не більше 15 % необхідного – то модель добре впоралась із поставленою задачею; якщо модель виділила більше 15 % необхідної кількості ресурсів, але менше 25 % – то модель оцінюємо задовільно; якщо ж модель виділила більше 25 % необхідного – модель виконала роботу незадовільно.



Для початку розглянемо варіант із незначним навантаженням на мережу, вхідні дані будуть виглядати так: $X_1 = 25$, $X_2 = 15$, $X_3 = 500$, $X_4 = 30$, $X_5 = 10$, $X_6 = 10$, $X_7 = 20$, $X_8 = 700$, $X_9 = 15$, $X_{10} = 35$. У цьому випадку комп'ютер x_2 робить невелику кількість запитів до сервера, та майже не здійснює зовнішніх запитів у інтернет, комп'ютер x_3 навпаки майже не робить запитів до сервера, але здійснює невелику кількість зовнішніх запитів до інтернету, сервер x_1 та інтернет x_4 здійснюють певну кількість взаємних запитів і відповідей один одному, та відносно пропорційну кількість до комп'ютерів x_2 та x_3 . Беручи до уваги ці дані, можна вирахувати, що мінімальна кількість необхідних обчислювальних можливостей для віртуального маршрутизатора y_1 становить 160 запитів/с, для y_2 – 1280 запитів/с, а для y_3 також 1280 запитів/с. Результат моделі для цього сценарію зображено на рис. 3.

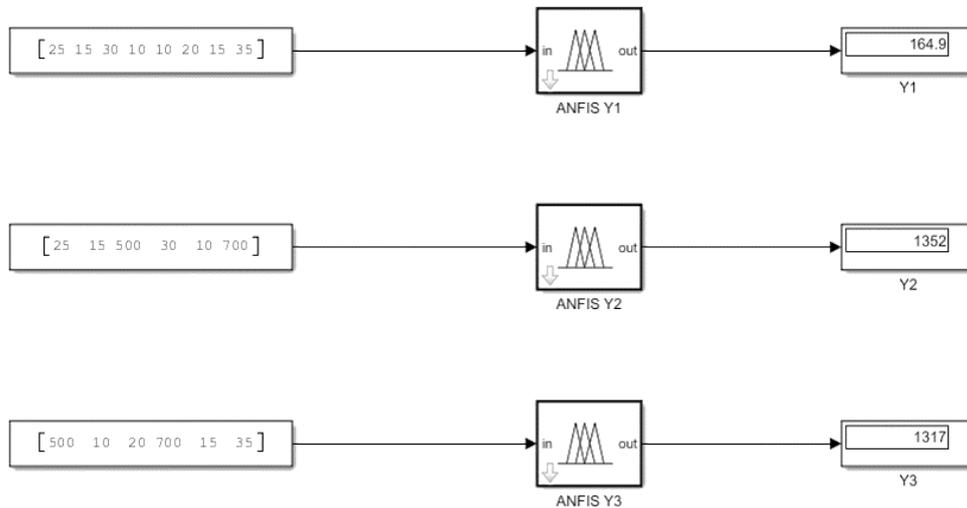


Рис. 3. Результат роботи моделі для сценарію з незначним навантаженням

Отже, моделі розрахували такі параметри: $Y_1 = 165$, $Y_2 = 1352$, $Y_3 = 1317$. У всіх випадках віртуальні маршрутизатори зможуть обробити запити без перевантажень і затримок, а також мають деяку кількість додаткової обчислювальної можливості у межах від 2,9 % до 5,6 % необхідної, що можна вважати хорошим результатом.

Розглянемо сценарій зі значним навантаженням на мережу, вхідні дані виглядатимуть як $X_1 = 100$, $X_2 = 50$, $X_3 = 4500$, $X_4 = 80$, $X_5 = 30$, $X_6 = 45$, $X_7 = 100$, $X_8 = 3000$, $X_9 = 75$, $X_{10} = 100$. У цьому випадку комп'ютер x_2 робить велику кількість запитів до сервера та певну кількість зовнішніх запитів у інтернет, комп'ютер x_3 робить певну кількість запитів до сервера та здійснює велику кількість зовнішніх запитів до інтернету, сервер x_1 та інтернет x_4 здійснюють велику кількість взаємних запитів і відповідей один одному, та відносно пропорційну кількість до комп'ютерів x_2 та x_3 . З огляду на ці дані, можна вирахувати, що мінімальна кількість необхідних обчислювальних можливостей для віртуального маршрутизатора y_1 становить 580 запитів/с, для y_2 – 7775, а для y_3 також 7805 запитів/с. Результат моделі для такого сценарію представлено на рис. 4.

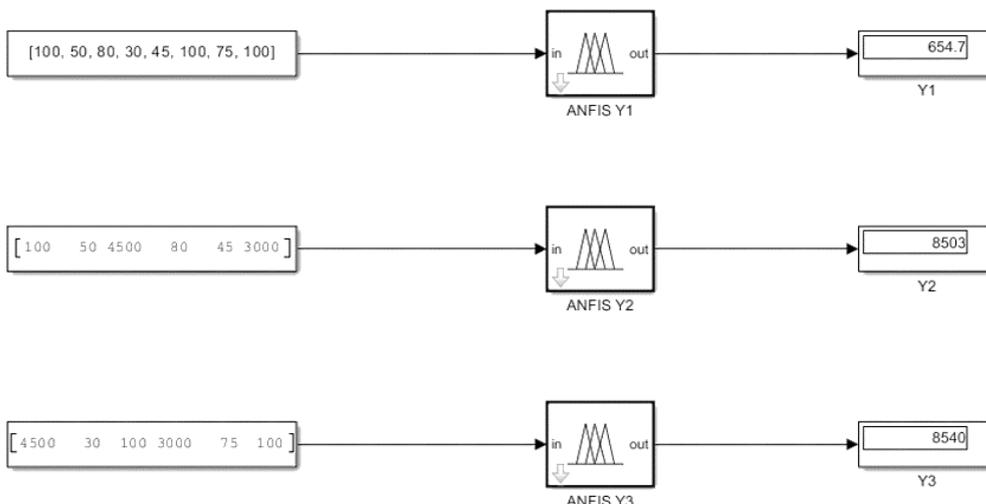


Рис. 4. Результат роботи моделі для сценарію зі значним навантаженням



За результатами моделювання отримано такі параметри: $Y_1 = 655$, $Y_2 = 8503$, $Y_3 = 8540$. Отже, в усіх випадках віртуальні маршрутизатори зможуть обробити запити без перевантажень і затримок, а також мають деяку кількість додаткової обчислювальної можливості, а саме на 9,4 % більше необхідної для маршрутизаторів u_2 та u_3 , на які припадають значно більші навантаження, та 12,9 % для маршрутизатора u_1 із меншим навантаженням.

Дискусія і висновки

Створено концептуальну модель інтелектуалізованого керування мережними ресурсами, яка на відміну від існуючих ґрунтується на нечіткому продукційному виведенні за реалізації технологій віртуалізації мережних функцій для програмно-конфігурованих мереж. Запропонована модель реалізує стратегію незалежного масштабування ресурсів керування та передачі даних для забезпечення мережі переваги парадигми SDN / NFV. Додатково перевірено ефективність отриманих моделей, яка відбувалася на змодельованій мережі зв'язку у двох сценаріях. Отримані результати свідчать, що створені моделі добре впорались зі змодельованими сценаріями, із чого випливає, що моделі, які базуються на нечіткій логіці, мають потенціал для подальшого дослідження.

Внесок авторів: Юрій Кравченко – розроблення концептуальної моделі; Денис Бородай – огляд літературних джерел, збір емпіричних даних, проведення комп'ютерного моделювання, опис результатів і написання висновків.

Список використаних джерел

- Палагін, В., Євтушенко, І., & Гожий, О. (2021). Віртуалізація як середовище реалізації мережних функцій. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, 2, 31–38. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.234703>
- Плющ, О., Кравченко, Ю., & Труш, О. (2023). Рекурентний алгоритм проектування телекомунікаційних систем і мереж. *Сучасні інформаційні технології*, 1(2), 64–72. <https://doi.org/10.17721/AIT.2023.1.10>
- Скулиш, М., & Суліма, С. (2019). Керування ресурсами для віртуалізованих мережних функцій. У В. М. Безрука, Л.С. Глоби, О.С. Стрижак (Ред.). *Наукоємні технології оптимізації та керування в інфокомунікаційних мережах* (с. 97–126). Інститут обдарованої дитини НАПН України. <https://ela.kpi.ua/items/35333990e-c8c9-464e-84c2-1c77516f7292>
- Суліма, С., & Скулиш, М. (2017). Гібридна система управління ресурсами для віртуалізованих мережних функцій. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, 1, 16–23. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-1-2>
- Carrascal, D., Rojas, E., Arco, J., Lopez-Pajares D., Alvarez-Horcajo, J., & Carral J. (2023). A Comprehensive Survey of In-Band Control in SDN: Challenges and Opportunities. *Electronics*, 12(6), 1265. <https://doi.org/10.3390/electronics12061265>
- Jang, J. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(3), 665–685. <https://doi.org/10.1109/21.256541>
- Srinivas, J., Sakthivel, S., Sudha, R., Rohit, K., Ranjan, W., & Lokesh, M. (2021). SDN network load balancing using environmental congenital ACO methodology. *International Journal of Biology, Pharmacy and Allied Sciences (IJBPAS)*, 10(11), 913–923. <http://dx.doi.org/10.31032/IJBPAS/2021/10.11.1079>

References

- Carrascal, D., Rojas, E., Arco, J., Lopez-Pajares D., Alvarez-Horcajo, J., & Carral J. (2023). A Comprehensive Survey of In-Band Control in SDN: Challenges and Opportunities. *Electronics*, 12(6), 1265; <https://doi.org/10.3390/electronics12061265>
- Jang, J. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(3), 665–685. <https://doi.org/10.1109/21.256541>
- Palahin, V., Yevtushenko, I., & Hozhyi, O. (2021). Virtualization as an environment of realization of network functions. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, (2), 31–38 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.234703>
- Pliushch, O., Kravchenko, Y., & Trush, O. (2023). Recurrent algorithm of telecommunication systems and networks design. *Advanced Information Technology*, 1(2), 64–72 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.17721/AIT.2023.1.10>
- Skulysh, M., & Sulima, S. (2019). Resource management for virtualized network functions. In V. Bezruka, L. Globa, O. Strizhak (Eds). *Science-intensive optimization and control technologies in information communication networks* (pp. 97–126). Institute of the gifted child of the National Academy of educational sciences of Ukraine [in Ukrainian]. <https://ela.kpi.ua/items/35333990e-c8c9-464e-84c2-1c77516f7292>
- Srinivas, J., Sakthivel, S., Sudha, R., Rohit, K., Ranjan, W., & Lokesh, M. (2021). SDN network load balancing using environmental congenital ACO methodology. *International Journal of Biology, Pharmacy and Allied Sciences (IJBPAS)*, 10(11), 913–923. <http://dx.doi.org/10.31032/IJBPAS/2021/10.11.1079>
- Sulima, S., & Skulysh, M. (2017). Hybrid resource provisioning system for virtual network functions. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 1, 16–23 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-1-2>

Отримано редакцією журналу / Received: 15.08.24

Прорецензовано / Revised: 20.10.24

Схвалено до друку / Accepted: 27.10.24



Denys BORODAI, PhD Student
ORCID ID: 0009-0009-2531-056X
e-mail: agved2@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Yurii KRAVCHENKO, DSc (Engin.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-0281-4396
e-mail: yurii.kravchenko@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

THE CONCEPTUAL MODEL OF INTELLIGENT MANAGEMENT OF NETWORK RESOURCES IN THE IMPLEMENTATION OF THE SDN/NFV PARADIGM

Background. *With the development and spread of network technologies, the problem of effective management of networks is becoming increasingly relevant. One approach to solving this problem is to use network virtualization, such as software-defined networking (SDN) and network functions virtualization (NFV), which allows to use of non-specialized hardware, including hardware on the x86 architecture, and makes networks more efficient due to the optimal use and distribution of resources. Due to this, it becomes possible to use own models and methods for managing networks. The purpose of the work is to find and develop a conceptual model of intelligent management of network resources in software-defined networks, which, unlike the existing ones, can dynamically allocate resources depending on the needs of the network and can adapt to possible minor discrepancies between the received data and real needs under the conditions of external and internal destabilizing factors.*

Methods. *In this paper methods of neural networks, fuzzy logic methods as well as methods of computer simulation are used.*

Results. *In this study, it is proposed the conceptual model of network resource management based on a hybrid neural network using fuzzy logic and fuzzy output inference (ANFIS), which allows for dynamic response to network needs and is less sensitive to the rapid obsolescence of received data regarding its needs. The model was tested on a simulated communication network in the MATLAB environment in two scenarios with low and high network load. It showed a good result that allowed the virtual devices to handle requests without overloads and have a certain margin of computing resources for efficient work and possible minor growth of network needs.*

Conclusions. *The developed model of network resource management in the MATLAB environment showed high efficiency, which proves the necessity and relevance of further research on using fuzzy logic in network management.*

Keywords: *communication network, network resource management, fuzzy logic, neural networks, network functions virtualization, software-defined networking, ANFIS, MATLAB.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.