

УДК 621.396

О.О. СЕМЕНОВА, М.О. ПРИТУЛА, А.В. ДЖУС, В. В. МАРТИНЮК

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ ДОСТУПУ У ОПТИЧНУ МЕРЕЖУ 5G

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Анотація. У статті досліджено актуальну проблему контролю доступу до ресурсів оптичної транспортної мережі п'ятого покоління (5G), яка є важливою складовою інфраструктури сучасних телекомунікаційних систем. В умовах стрімкого зростання кількості підключень, гетерогенності трафіку та динамічних змін навантаження традиційні алгоритми контролю доступу втрачають ефективність і не здатні забезпечити необхідний рівень точності. З метою підвищення гнучкості прийняття рішень у статті запропоновано використання нечіткої логіки для розробки інтелектуального контролера доступу, здатного працювати в умовах невизначеності та неповноти вхідних даних. Результати моделювання підтверджують переваги запропонованого підходу.

Ключові слова: нечіткий контролер, нечітка логіка, контроль доступу, мережі п'ятого покоління, оптична мережа, інтелектуальні технології.

Abstract. The article investigates the current problem of controlling access to resources of the fifth generation optical transport network (5G), which is an important component of the infrastructure of modern telecommunication systems. In conditions of rapid growth in the number of connections, traffic heterogeneity and dynamic load changes, traditional access control algorithms lose their effectiveness and are unable to provide the necessary level of accuracy. In order to increase the flexibility of decision-making, the article proposes the use of fuzzy logic to develop an intelligent access controller capable of operating in conditions of uncertainty and incompleteness of input data. The simulation results confirm the advantages of the proposed approach.

Keywords: fuzzy controller, fuzzy logic, access control, fifth generation networks, optical network, intelligent technologies.

DOI: 10.31649/1681-7893-2026-51-11-358-365

ВСТУП

Новітніми етапами еволюції мобільних мереж є технології 5G та 6G, що характеризуються високошвидкісним передаванням даних, низьким рівнем затримок та високою пропускну здатністю. Наразі одним із перспективних напрямків є інтеграція оптичних транспортних мереж з радіоінтерфейсами мереж п'ятого покоління [1]. Оптична мережа в архітектурі 5G є транспортним середовищем для високошвидкісної передачі даних між базовими станціями та ядром мережі. Її основною особливістю є надзвичайно висока пропускна здатність, що забезпечує можливість надання широкого спектра сервісів з різними вимогами до якості обслуговування. Завдяки низькому рівню затримок, оптична інфраструктура забезпечує ефективну підтримку важливих додатків, зокрема для сервісів URLLC. Архітектура оптичної мережі 5G зазвичай реалізується у вигляді розділеного фреймворку на fronthaul, midhaul та backhaul рівнях. Для оптимального використання спектру часто застосовуються технології мультиплексування, зокрема WDM. Високий ступінь масштабованості оптичної мережі забезпечує можливість її адаптації до зростаючих потреб трафіку та розширення зони покриття. Разом із впровадженням програмно-детермінованих мереж (SDN) оптична інфраструктура набуває здатності до інтелектуального управління ресурсами [2].

З розвитком телекомунікаційних технологій постійно зростає потреба у високошвидкісному та надійному контролі доступу до мережевих ресурсів. У мобільних мережах 5G, інтегрованих з оптичними технологіями, проблема ефективного керування доступом набуває особливої актуальності через високу щільність користувачів та різноманіття типів трафіку.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

У більшості випадків існуючі алгоритми доступу не здатні достатньо швидко підлаштовуватися до змін умов навантаження та варіативних вимог до якості обслуговування (QoS). Окрім того, особливої уваги заслуговує необхідність забезпечення диференційованого доступу для сервісів з різними затримками та надійністю, таких як URLLC, eMBB та mMTC. Обмеженість пропускну здатності в оптичних каналах, особливо на рівні fronthaul, вимагає пріоритетного розподілу ресурсів у режимі реального часу [3]. Централізовані механізми управління, незважаючи на свою ефективність, можуть бути вразливими до затримок та втрати точності. Значною проблемою залишається недостатня масштабованість існуючих протоколів доступу в умовах гетерогенності мережевих вузлів. Таким чином, виникає потреба у розробці інтелектуальних систем керування доступом, здатних функціонувати в умовах невизначеності та змінної мережевої топології.

1. АКТУАЛЬНІСТЬ

У більшості випадків, традиційні підходи вже не відповідають складності та 5G-мереж, особливо коли йдеться про оптичні транспортні мережі, які потребують швидкого та високоточного контролю доступу. Окрім того, зазвичай традиційні підходи передбачають прийняття рішення на основі заздалегідь визначених правил, які не враховують змінні умови мережі (наприклад, коливання трафіку або зміни у QoS-вимогах). Як наслідок, у пікові години ці методи можуть призвести до масових відмов у доступі, навіть якщо ресурси ще доступні, але розподілені нерівномірно. Окрім того, часто має місце неоптимальне використання ресурсів, адже фіксовані порогові значення можуть призвести або до перевантаження вузлів, або до простоювання ресурсів. В оптичних мережах це може означати неефективне використання каналів [4].

Також традиційні підходи не мають механізмів самонавчання або самопокращення. Навіть за повторення схожих ситуацій не враховується минулий досвід для вдосконалення рішень. Відсутність підтримки прогнозування приводить до того, що неможливо оцінити майбутнє навантаження чи зміну трафіку, тому традиційна система керування доступом реагує постфактум.

В той же час, забезпечити прогнозування, самонавчання та підлаштування до умов у реальному часі можливо за рахунок використання сучасних інтелектуальних підходів.

Таким чином, вирішення проблеми керування доступом в оптичній мережі 5G можливе шляхом впровадження інтелектуальних технологій, зокрема методів машинного навчання та обчислювального інтелекту [5]. Ці підходи дозволяють прогресивно оптимізувати розподіл ресурсів мережі, враховуючи до змін трафіку в режимі реального часу. Інтелектуальні алгоритми можуть прогнозувати навантаження на вузли мережі та мінімізувати затримки при доступі до сервісів. Крім того, інтелектуальне керування доступом підвищує ефективність використання оптичного спектра та знижує ймовірність перевантаження. Застосування таких технологій є важливим чинником для забезпечення продуктивності та надійності мереж 5G.

Так, алгоритми на основі машинного навчання здатні самонавчатися на телеметричних даних (наприклад, трафік, затримка, втрати) і можуть налаштовуватися відповідно до поточних умов. Це особливо важливо в оптичній частині мережі, де ресурси розподілені нерівномірно. Окрім того, такі алгоритми здатні передбачати, коли саме оптичний канал буде перевантажено, і заздалегідь обмежити або перенаправити доступ. Це дозволяє уникнути відмов обслуговування для важливих сервісів. Також, деякі алгоритми здатні навчатися на успішних попередніх рішеннях та автоматично вдосконалювати свою політику доступу.

Така технологія обчислювального інтелекту як нечітка логіка передбачає застосування для опису мережевих параметрів (навантаження, затримки тощо) лінгвістичних змінних замість чітких значень, що є особливо корисним у випадках, коли точних значень не існує або вони є приблизними [6].

Також нечіткі системи мають досить низьку обчислювальну складність, що дозволяє застосовувати їх без значних ресурсів навіть у розподілених вузлах оптичної мережі. Рішення приймаються на основі прозорих нечітких правил, які можна сформулювати на основі досвіду інженерів або операторів мереж, що робить систему інтуїтивно зрозумілою та контрольованою. Технологію нечіткої логіки можна поєднувати з машинним навчанням для отримання кращого з обох підходів: пластичність машинного навчання та прозорості нечітких систем.

Ефективність використання нечітких систем у задачах керування мережами зв'язку демонструвалася у попередніх роботах [7, 8]. Проте мало уваги приділялося саме контролю доступу в гібридних оптико-радіомережах, де особливу роль відіграє пріоритетизація користувачів.

Таким чином, метою даної роботи є розроблення та дослідження нечіткої логічної системи для керування доступом до оптичної мережі 5G

2. РОЗРОБЛЕННЯ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ

Розроблена у рамках цього дослідження нечітка логічна система функціонує наступним чином. На її вхід надходять три параметри, які дозволяють оцінити доцільність прийняття або відкидання нового виклику на базову станцію. Вхідні дані обробляються нечіткою системою згідно наперед визначених нечітких правил, і на його виході з'являється значення, що відповідає прийнятому рішенню стосовно прийняття або відкидання нового виклику.

Для моделювання роботи розробленої нечіткої логічної системи контролю доступу було застосовано середовище MATLAB, яке надає широкі можливості для моделювання, аналізу та візуалізації результатів функціонування інтелектуальних систем. Застосування цього програмного забезпечення дало змогу перевірити ефективність запропонованої моделі та оцінити її поведінку. Загальний вигляд розробленої нечіткої логічної системи контролю доступу у програмі MATLAB представлено на рис.1.

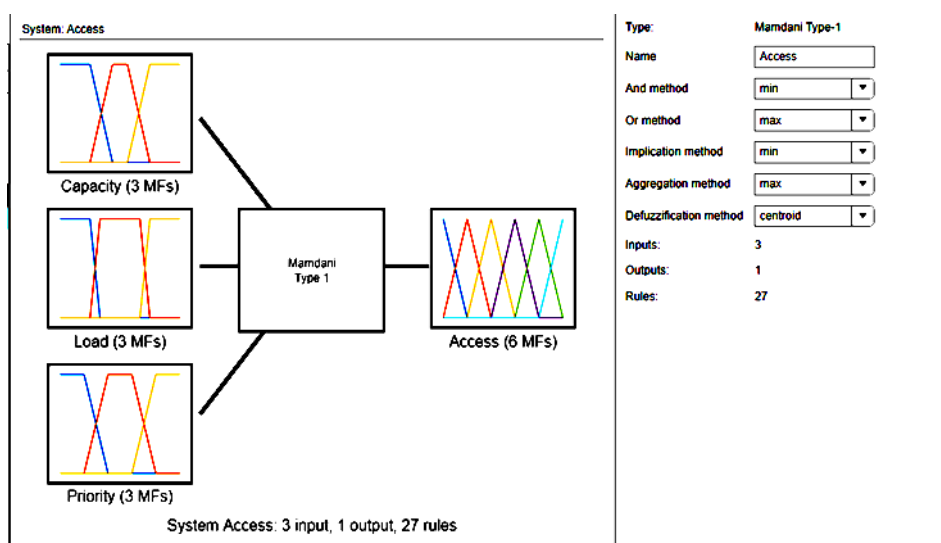


Рисунок 1 – Нечітка логічна система контролю доступу в програмі MATLAB

Вхідними лінгвістичними змінними нечіткого логічної системи, запропонованої в цьому дослідженні, є ефективна ємність, завантаженість комірки та пріоритет з'їзду. Вони були обрані виходячи із наступних міркувань.

Ефективна ємність комірки мережі 5G відображає максимальну кількість користувачів, що може бути одночасно обслугована однією базовою станцією без істотного погіршення якості обслуговування та продуктивності мережі. Цей параметр враховує не лише теоретичну пропускну здатність радіоінтерфейсу, але й реальні обмеження, зумовлені варіативністю трафіку, радіоумовами, характеристиками терміналів користувачів.

Для кожного вхідного параметру було використано три нечіткі множини (низьке, середнє, високе). На рис.2 подано функції належності для вхідної величини «ефективна ємність» в програмі MATLAB.

Завантаженість комірки мережі 5G відображає рівень використання доступних радіоресурсів у межах конкретної комірки і є індикатором ефективності функціонування мережі та якості надання телекомунікаційних послуг абонентам. Завантаженість визначається як відношення фактично використаних радіоресурсів (наприклад, ресурсних блоків) до їх максимально доступної кількості у визначений момент часу. Цей показник є істотним для гарантування стійкого, високошвидкісного та надійного з'єднання. На рис.3 подано функції належності для вхідної величини «завантаженість комірки» в програмі MATLAB.

Завантаженість комірки мережі 5G відображає рівень використання доступних радіоресурсів у межах конкретної комірки і є індикатором ефективності функціонування мережі та якості надання телекомунікаційних послуг абонентам. Завантаженість визначається як відношення фактично використаних радіоресурсів (наприклад, ресурсних блоків) до їх максимально доступної кількості у визначений момент часу. Цей показник є істотним для гарантування стійкого, високошвидкісного та

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

надійного з'єднання. На рис.3 подано функції належності для вхідної величини «завантаженість комірки» в програмі MATLAB.

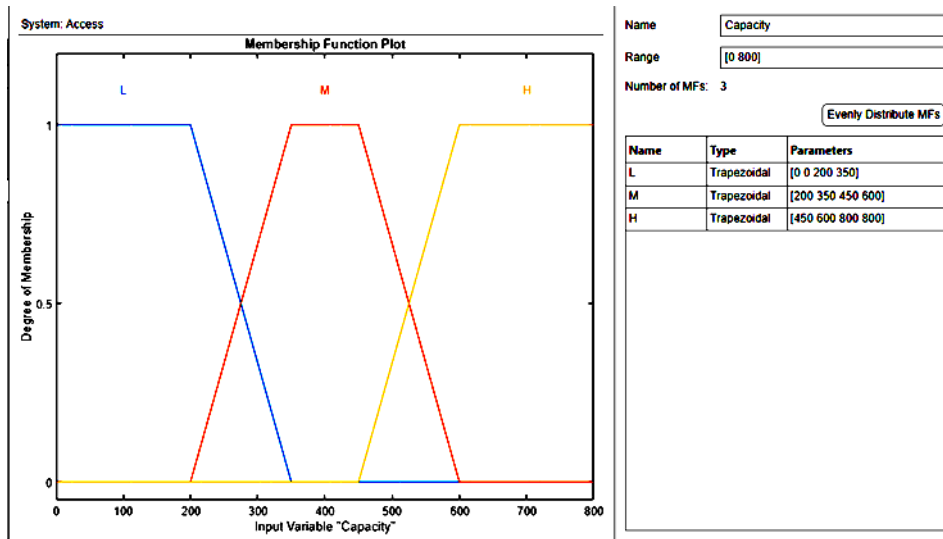


Рисунок 2 – Вхідна величина «ефективна ємність» в програмі MATLAB

Параметр пріоритету зрізу (slice priority) визначає пріоритет обслуговування мережевого зрізу (network slice) у межах конкретної базової станції. Кожен мережевий зріз створюється для задоволення специфічних вимог обслуговування, таких як низька затримка, висока надійність або велика пропускна здатність, і має свій власний рівень пріоритету, який впливає на доступ до радіоресурсів у разі перевантаження мережі. Пріоритет зрізу дозволяє мережі ефективно управляти ресурсами, забезпечуючи першочергове обслуговування важливих застосувань (наприклад, телемедицини або автономного транспорту), тоді як менш критичні сервіси можуть обслуговуватись із нижчим пріоритетом. Таким чином, пріоритет зрізу є важливим механізмом диференційованого обслуговування у середовищі, де одночасно функціонують кілька гетерогенних мереж, що властиво технології 5G. На рис.4 подано функції належності для вхідної величини «пріоритет зрізу» в програмі MATLAB.

Вихідною змінною розробленої нечіткої системи контролю доступу до мережі є рішення щодо доступу виклику. В даному випадку, це значення в інтервалі від 0 до 100, яке показує, наскільки доцільним було прийняти новий виклик для обслуговування даною базовою станцією, щоб це не погіршило якість обслуговування у межах даної комірки. Для цього параметру було використано шість нечітких множин (повністю відкинути, відкинути, частково відкинути, частково допустити, допустити, повністю допустити). На рис.5 подано функції належності для вихідної величини «рішення щодо доступу» в програмі MATLAB.

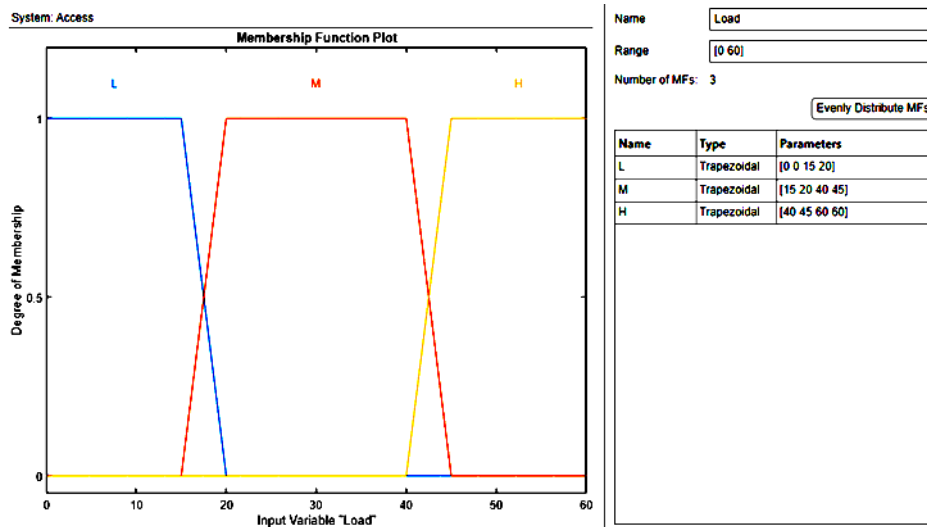


Рисунок 3 – Вхідна величина «завантаженість комірки» в програмі MATLAB

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

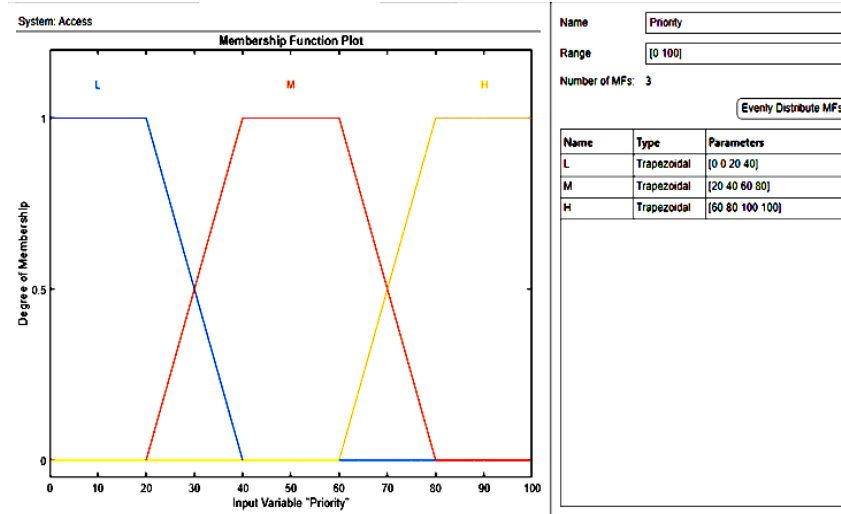


Рисунок 4 – Вхідна величина «пріоритет зрізу» в програмі MATLAB

Розроблений нечіткий контролер працює згідно з 27 нечіткими правилами, які формалізують зв'язки між вхідними параметрами та вихідним результатом. Ця кількість правил забезпечує достатній рівень деталізації для адекватного моделювання складних залежностей у межах досліджуваної задачі. На рис. 6 подано базу правил нечіткої системи доступу в програмі MATLAB.

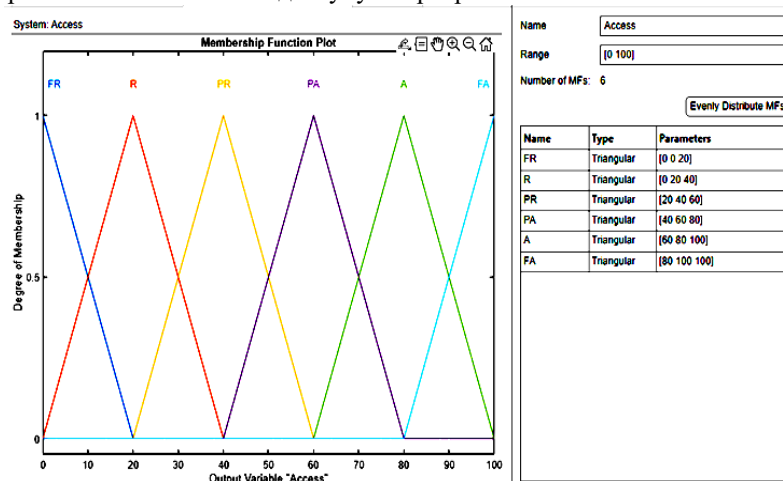


Рисунок 5 – Вихідна величина «рішення щодо доступу» в програмі MATLAB

Rule	Weight	Name
1 If Capacity is L and Load is L and Service is L then Access is R	1	rule1
2 If Capacity is M and Load is L and Service is L then Access is R	1	rule2
3 If Capacity is H and Load is L and Service is L then Access is R	1	rule3
4 If Capacity is L and Load is M and Service is L then Access is FR	1	rule4
5 If Capacity is M and Load is M and Service is L then Access is FR	1	rule5
6 If Capacity is H and Load is M and Service is L then Access is R	1	rule6
7 If Capacity is L and Load is H and Service is L then Access is FR	1	rule7
8 If Capacity is M and Load is H and Service is L then Access is FR	1	rule8
9 If Capacity is H and Load is H and Service is L then Access is FR	1	rule9
10 If Capacity is L and Load is L and Service is M then Access is PR	1	rule10
11 If Capacity is M and Load is L and Service is M then Access is PA	1	rule11
12 If Capacity is H and Load is L and Service is M then Access is PA	1	rule12
13 If Capacity is L and Load is M and Service is M then Access is PR	1	rule13
14 If Capacity is M and Load is M and Service is M then Access is PA	1	rule14
15 If Capacity is H and Load is M and Service is M then Access is PA	1	rule15
16 If Capacity is L and Load is H and Service is M then Access is PR	1	rule16
17 If Capacity is M and Load is H and Service is M then Access is PR	1	rule17
18 If Capacity is H and Load is H and Service is M then Access is PA	1	rule18
19 If Capacity is L and Load is L and Service is H then Access is FA	1	rule19

Рисунок 6 – База правил нечіткої системи доступу в програмі MATLAB

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

3. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ

Метою моделювання було дослідити здатність нечіткої системи контролю доступу приймати ефективні та точні рішення щодо допуску вхідних викликів до обслуговування базовою станцією оптичної мережі 5G з урахуванням параметрів комірки.

У результаті моделювання нечіткої системи контролю доступу в середовищі MATLAB було побудовано тривимірну поверхню керування (control surface), яка відображає залежність вихідного рішення системи від зміни вхідних параметрів – рівня завантаження комірки та пріоритету зрізу. Як видно з рис. 7, отримана поверхня керування демонструє плавну поведінку нечіткої системи контролю доступу. Вона враховує не лише поточний стан ресурсів, але й рівень пріоритетності трафіку, забезпечуючи якісно-орієнтоване та стійке до перевантаження керування доступом.

Симуляція роботи нечіткої системи контролю доступу у програмному середовищі MATLAB виконується за допомогою вбудованих інструментів візуалізації та аналізу поведінки системи. Ці засоби дозволяють швидко перевірити коректність побудованої бази правил і функцій належності.

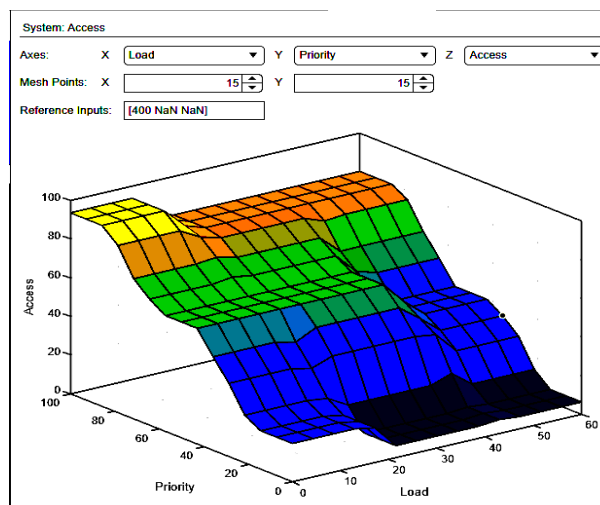


Рисунок 7 – Поверхня керування в програмі MATLAB

Нечітка система була апробована на множині тестових сценаріїв, які охоплювали широкий спектр ситуацій – від слабкого до сильного завантаження комірки, а також від низькопріоритетних до критичних сервісів. Результат моделювання роботи нечіткої системи контролю доступу для одного із випадків подано на рис.8. Система демонструє плавний характер прийняття рішень, на відміну від традиційних порогових алгоритмів, які характеризуються жорсткими переходами між станами дозволу/відмови.

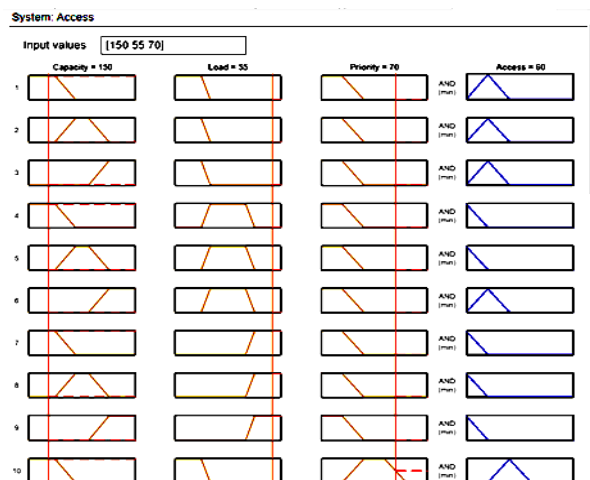


Рисунок 8 – Результати симуляції роботи нечіткої системи доступу

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Результати моделювання свідчать про здатність нечіткої системи контролю доступу ефективно адаптуватися до змінних умов оптичної мережі. Зокрема, при високому рівні завантаженості та низькому пріоритеті виклику система із високою точністю відхиляє запити, зберігаючи ресурси для більш критичних сервісів. У випадках, коли пріоритет зрізу високий, навіть за умов часткового перевантаження комірки, система схильна приймати виклик для забезпечення якості обслуговування.

ВИСНОВКИ

З метою підвищення ефективності управління радіоресурсами в оптичних мережах п'ятого покоління було розроблено нечітку систему контролю доступу викликів та промодельовано її у середовищі MATLAB із використанням інструменту FuzzyLogicDesigner. Система приймає рішення щодо доцільності обслуговування вхідного виклику на основі поточного стану мережі та характеристик запиту.

Отримані результати моделювання запропонованої нечіткої системи контролю доступу для оптичної мережі 5G підтверджують доцільність застосування методів нечіткої логіки для реалізації контролю доступу в умовах гетерогенного навантаження, характерного для оптичних мереж п'ятого покоління.

Таким чином, розроблена нечітка система демонструє високу ефективність у прийнятті рішень щодо допуску викликів у мережі 5G, забезпечуючи при цьому баланс між доступністю, пріоритетністю сервісів і продуктивністю мережі.

Розроблена модель на базі нечіткої логіки здатна функціонувати за умов швидких змін трафіку в реальному часі. У подальших дослідженнях планується дослідити застосування нейронної мережі для автоматичного налаштування правил та генетичного алгоритму для оптимізації форми функцій належності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Zakrzewski, Z., Głabowski, M., Zwierzykowski, P., Eramo, V., & Lavacca, F. G. (2024). Optical Technologies Supporting 5G/6G Mobile Networks. *Photonics*, 11(9), 833. <https://doi.org/10.3390/photonics11090833>
2. Chang, S.-H. (2019). Key Technologies and Development Trends of 5G Optical Networks. *Applied Sciences*, 9(22), 4835. <https://doi.org/10.3390/app9224835>
3. Shakthi Murugan, K. H., & Sumathi, M. (2019). Design and Analysis of 5G Optical Communication System for Various Filtering Operations using Wireless Optical Transmission. *Results in Physics*, 12, 460–468. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.10.064>
4. Mata, J., de Miguel, I., n, R. n J. D., Merayo, N., Singh, S. K., Jukan, A., & Chamania, M. (2018). Artificial Intelligence (AI) Methods in Optical Networks: A Comprehensive Survey. *Optical Switching and Networking*, 28, 43-57. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1801.01704>
5. Ampririt, P., Liu, Y., Ikeda, M., Matsuo, K., Barolli, L., & Takizawa, M. (2020). An Admission Control System for 5G Wireless Networks Considering Fuzzy Logic and Software-Defined Network Approaches. *In Advances in Intelligent Systems and Computing* (pp. 63–72). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50454-0_7
6. Ampririt, P., Qafzezi, E., Bylykbashi, K., Ikeda, M., Matsuo, K., & Barolli, L. (2021). Application of Fuzzy Logic for Slice QoS in 5G Networks. *International Journal of Mobile Computing and Multimedia Communications*, 12(2), 18–35. <https://doi.org/10.4018/ijmcmc.2021040102>
7. Semenova, O., Kryvinska, N., Semenov, A., Rudyk, A., & Dzhus, A. (2025). Intelligent Admission Control in Wireless Networks of IoT. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 23(4), 1262–1270. <https://doi.org/10.1007/s12555-024-0603-z>
8. Al-Maitah, M., Semenova, O. O., Semenov, A. O., Kulakov, P. I., & Kucheruk, V. Yu. (2018). A Hybrid Approach to Call Admission Control in 5G Networks. *Advances in Fuzzy Systems*, 2018, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2018/2535127>

Дата надходження: 6.02.2026

Дата прийняття до друку після рецензування: 10.04.2026

Дата публікації: 18.06.2026

Ця робота ліцензується відповідно до
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET,
INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

СЕМЕНОВА ОЛЕНА ОЛЕКСАНДРІВНА — к.т.н., доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, Україна,
e-mail: semenova.o.o@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5312-9148>

ПРИТУЛА МАКСИМ ОЛЕКСАНДРОВИЧ — к.т.н., доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Україна, *e-mail:* prytula@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1577-5215>

ДЖУС АНДРІЙ ВАСИЛЬОВИЧ — аспірант кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, Україна, *e-mail:* dzhuz1988@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-3583-5766>

МАРТИНЮК ВОЛОДИМИР В'ЯЧЕСЛАВОВИЧ — аспірант кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, Україна, *e-mail:* vm4ukr@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-8421-0348>

Olena SEMENOVA, Maksym PRYTULA, Andrii DZHUS, Volodymyr MARTYNIUK

INTELLIGENT ACCESS CONTROL FOR 5G OPTICAL NETWORK
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine