

УДК 621.3.006.357

# АНАЛІЗ АЛГОРИТМУ РОЗПОДІЛУ ЧАСТОТНО-ЧАСОВОГО РЕСУРСУ У МЕРЕЖІ КОГНІТИВНОГО РАДІО



[Ю.Ю. Коляденко](#), [Б.П. Муляр](#)

Харківський національний  
університет радіоелектроніки

**Abstract** – The cognitive property implies the ability of a radio system to solve the following problems: transition from one standard to another; use of several standards; frequency tuning; the opportunity to participate in the dynamic distribution of the spectrum. One of the problems that arise when allocating a frequency resource may be the lack of clear decision rules. In such cases, as a rule, nonparametric algorithms and methods are used, such as, for example, algorithms based on the mathematical apparatus of neural networks, or algorithms built on the mathematical apparatus of fuzzy logic. An algorithm for the distribution of the time-frequency resource in the cognitive radio network is proposed. A distinctive feature of the developed algorithm is the use of both a parameter of the proportional fair distribution of physical resources PF and SINR. In addition, the decision in this algorithm is based on the mathematical apparatus of fuzzy logic. This algorithm can be used at the stage of network operation in the presence of a large number of speakers and centralized frequency management from the base station. A simulation model for managing the time-frequency resource is developed, with the help of which an analysis of the proposed algorithm is carried out. The analysis showed that the subscriber stations have a very high probability of providing a resource with fully accessible resources and requested resources, which range from 0.1 to 0.5. Subscriber stations are highly likely to provide a resource: with fully accessible resources and requested resources, which range from 0.56 to 0.69; or with the average available resources and requested resources, which are in the range from 0.1 to 0.19. Subscriber stations have an average probability of providing a resource: with fully accessible resources and requested resources that range from 0.69 to 1, or average available resources and requested resources that range from 0.19 to 0.8; or at low available resources and requested resources, which range from 0.1 to 0.32. The subscriber stations have a low probability of providing a resource: with average available resources and requested resources, which range from 0.8 to 1; and with low available resources and requested resources, which lie in the range from 0.32 to 1.

**Анотація** – Властивість когнітивності передбачає здатність радіосистеми вирішувати такі завдання: перехід від одного стандарту до іншого; використання декількох стандартів; перебудову частоти; можливість участі в динамічному розподілі спектру. В роботі запропоновано алгоритм розподілу частотно-часового ресурсу в мережі когнітивного радіо. Відмінною особливістю розробленого алгоритму є використання як параметра пропорційного справедливого розподілу фізичних ресурсів PF, так і ВСЗШ. Крім того, прийняття рішення в даному алгоритмі засноване на математичному апараті нечіткої логіки. Даний алгоритм може бути застосовано на етапі функціонування мережі при наявності великої кількості абонентських станцій і централізованому управлінні частотами від базової станції. Розроблено імітаційну модель управління частотно-часовим ресурсом, за допомогою якої проведено аналіз запропонованого алгоритму. Аналіз показав, що дуже високу ймовірність надання ресурсу мають абонентські станції при повністю доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,1 до 0,5. Високу ймовірність надання ресурсу мають абонентські станції: при повністю доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,56 до 0,69; або при середніх доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,1 до 0,19. Середню ймовірність надання ресурсу мають абонентські станції: при повністю доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,69 до 1; або середніх доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,19 до 0,8; або при низьких доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,1 до 0,32. Малу ймовірність надання ресурсу мають абонентські станції: при середніх доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,8 до 1; та при низьких доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,32 до 1.

## Вступ

З появою мереж мобільного зв'язку сигнально-завадова обстановка в діапазонах метрових і дециметрових хвиль стала різко ускладнюватися. Все зростаюча кількість радіоелектронних засобів різного призначення призводять до утворення множинного характеру електромагнітних взаємодій між ними. Одночасно з цим ще важливішим стає дефіцит частотного ресурсу, загострюється проблема електромагнітної

сумісності (ЕМС). Практично весь частотний діапазон до теперішнього часу розподілений і ліцензований, однак при цьому, як показали дослідження Федеральної комісії зв'язку США, спектр використовується не досить ефективно. Підвищити ефективність використання спектра дозволяє механізм когнітивного розподілу ресурсів, згідно з яким вторинним користувачам (які не закріплені за даним частотним діапазоном) надається можливість використовувати діапазони первинних користувачів (закріплених за даним діапазоном) на час, поки цей діапазон не використовується первинним користувачем [1-6].

Концепція когнітивного радіо може бути охарактеризована як радіо з вивченням можливостей. Властивість когнітивності передбачає здатність радіосистеми вирішувати такі завдання: перехід від одного стандарту до іншого; використання декількох стандартів; перебудову частоти; можливість участі в динамічному розподілі спектру; можливість вторинного використання спектра; динамічна оптимізація ємності; регулювання антен; реконфігурація транспортної мережі.

Однією з проблем, що виникають при розподілі частотного ресурсу може бути відсутність чітких правил прийняття рішення [7,8]. У таких випадках, як правило, використовують непараметричні алгоритми та методи, такі, наприклад як алгоритми, засновані на математичному апараті нейронних мереж, або алгоритми, побудовані на математичному апараті нечіткої логіки.

Таким чином, розробка та проведення аналізу алгоритму розподілу частотно-часового ресурсу в мережі когнітивного радіо, заснованого на математичному апараті нечіткої логіки, є актуальною науковою задачею.

Об'єктом дослідження є процес розподілу ресурсів в мережах когнітивного радіо. Предмет дослідження становлять моделі та метод розподілу частотно-часового ресурсу. Метою даної роботи є розробка та проведення аналізу алгоритму розподілу частотно-часового ресурсу.

## **I. Модель когнітивної мережі**

Первинні базові станції (БС) надають блоку управління інформацію про частотні ресурси, які в даний момент не зайняті. Блок управління збирає інформацію про вільні частотні діапазони для подальшого розподілу між вторинними БС. Вторинні БС, конкуруючи між собою (наприклад, в разі належності до різних операторів мобільного зв'язку), виступають як одержувачі частотного ресурсу. База даних зберігає інформацію про доступні частотні діапазони первинних і вторинних БС. Динамічний розподіл спектра в даній моделі здійснюється блоком управління на основі знання про вільні частотні діапазони. Тривалість використання частотного діапазону вказується первинною БС у момент передачі інформації блоку управління. Протягом даного проміжку часу первинна БС не має права використовувати даний частотний діапазон, що гарантує відсутність інтерференції між первинним і вторинним користувачами. Відповідно, права на використання спектра передаються вторинній

БС на заздалегідь визначений інтервал часу, після закінчення якого частотний діапазон повинен бути звільнений.

## II. Розподіл фізичних ресурсів системи зв'язку між абонентськими станціями

Призначення частотно-часових блоків для передачі сигналів абонентською станцією (АС) відбувається в результаті процедури планування (розподілу) фізичних ресурсів системи зв'язку МІМО-OFDMA [9]. Мета цієї процедури полягає у виділенні БС несних кожного доступного частотно-часового блоку АС, для яких досягається найбільше значення деякої метрики (цільової функції) на даній групі несних. В якості такої метрики може виступати, наприклад, значення відношення потужності сигналу до потужності завад і шуму (БСЗШ). Однак у цьому випадку доступ до фізичних ресурсів системи зв'язку будуть отримувати тільки АС з високими значеннями БСЗШ.

Тому для призначення частотно-часових блоків всім АС в багатокористувацьких системах зв'язку широке застосування отримав алгоритм пропорційного справедливого розподілу фізичних ресурсів (Proportional Fair, PF) [8,9]. Відповідно до цього алгоритму доступ до частотно-часового блоку отримує АС  $i$  з максимальним значенням метрики  $PF_i$ , яка визначається виразом:

$$PF_i = \frac{I_i'}{C_i}, \quad (1)$$

де  $I_i'$  – миттєва швидкість передачі даних  $i$ -ї АС,  $C_i$  – середня пропускна здатність  $i$ -ї АС, яка розрахована для деякого часового інтервалу.

Для підвищення спектральної ефективності МІМО-OFDMA мережі один і той же частотно-часовий блок може використовуватися для обслуговування декількох АС. У цьому випадку між сигналами АС з'являються взаємні завади. Для забезпечення ЕМС у передавачі БС необхідно додатково проводити просторову обробку сигналів. У результаті такої обробки формуються нові просторові підканали, в яких обслуговуються АС.

У даному випадку диспетчер контролює для кожного моменту часу, яким АС потрібно розподілити частини ресурсу, що спільно використовується. Диспетчер також визначає швидкість передачі даних, яка повинна застосовуватися для кожної АС. Диспетчер визначає продуктивність всієї системи, особливо в дуже завантаженій мережі. Як низхідний, так висхідний канал у когнітивній мережі піддаються щільному (компактному) плануванню [7]. Диспетчер для кожного моменту часу та частотної області вибирає АС з найкращим станом каналу, як показано на рис. 1.

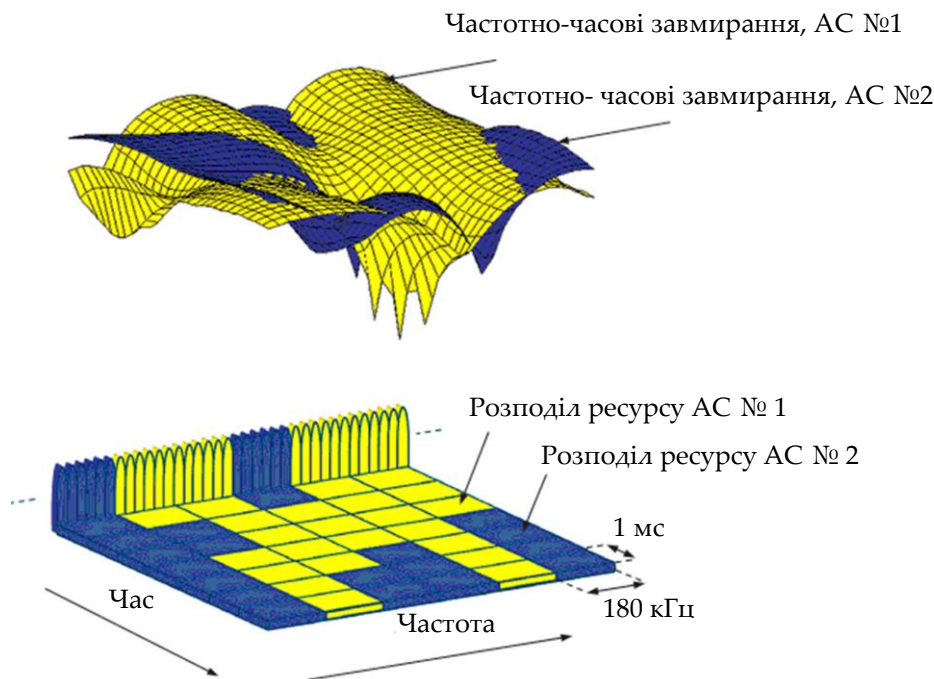


Рис. 1. Розподіл ресурсів між АС

### III. Алгоритм розподілу частотно-часового ресурсу, який засновано на математичному апараті нечіткої логіки

Застосування нечіткої логіки притаманне для ситуацій, коли відсутня не тільки детерміністська інтерпретація розв'язуваної задачі, а й коли не вдається застосувати можливі стохастичні способи через відсутність даних про будь-які розподіли.

В роботі [10] показано, що для проектування протоколу управління ресурсами перспективним є використання так званих "м'яких" обчислювальних методик, наприклад, заснованих на нечіткій логіці або генетичних алгоритмах. Це дозволяє задовольнити вимоги QoS для користувачів і в той же час максимально використовувати ресурси системи.

Загальна структура системи управління частотно-часовим ресурсом у мережах когнітивного радіо на основі математичного апарату нечіткої логіки представлена на рис. 2. Процес функціонування нечіткої системи управління частотно-часовим ресурсом виглядає наступним чином [11]. У разі встановлення зв'язку відповідна АС повідомляє на БС миттєву швидкість передачі даних  $I_i$  і середню пропускну здатність  $C_i$ , розраховану для деякого часового інтервалу. Потім БС вимірює середнє ВСЗШ нового з'єднання і розраховує значення  $PF_i$  з подальшим переведенням їх у значення лінгвістичних змінних. Ці точні значення вхідних змінних перетворюються на значення лінгвістичних змінних за допомогою певних функцій приналежності (ФП). Запитовані частотно-часові ресурси використовують цю інформацію, щоб отримати число підканалів, які будуть призначені. Число підканалів обмежується

величинами  $C_{\min}$  і  $C_{\max}$ , щоб гарантувати те, що при з'єднанні буде не дуже велика і не дуже мала кількість ресурсів передачі.

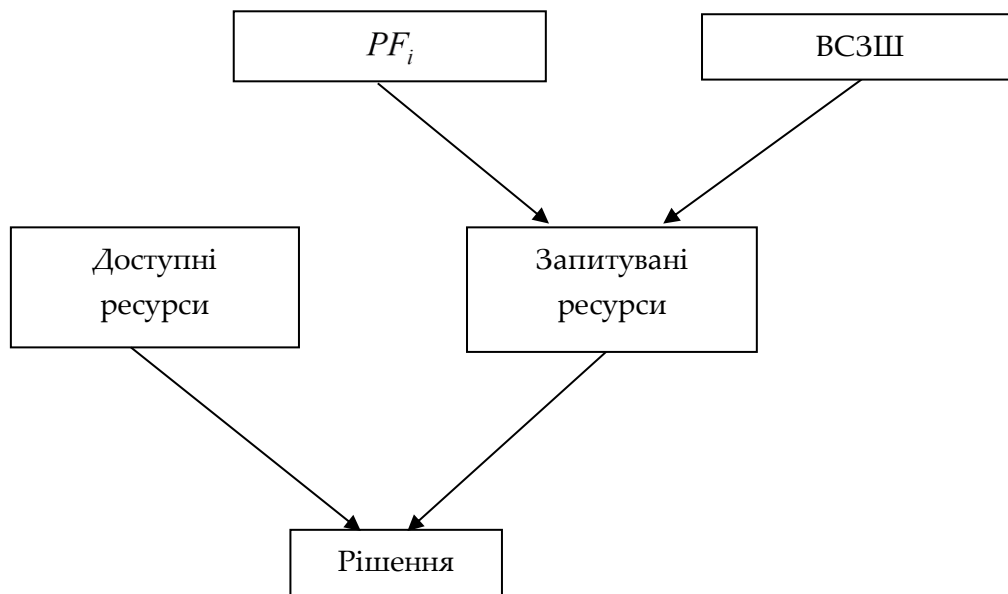


Рис. 2. Схема нечіткого управління частотно-часовим ресурсом

На цьому етапі здійснюється перехід від нечітких значень величин (тобто запитуваних ресурсів і доступних ресурсів) до ймовірності надання запитуваного частотно-часового ресурсу. На основі цієї ймовірності БС приймає або відкидає нове з'єднання.

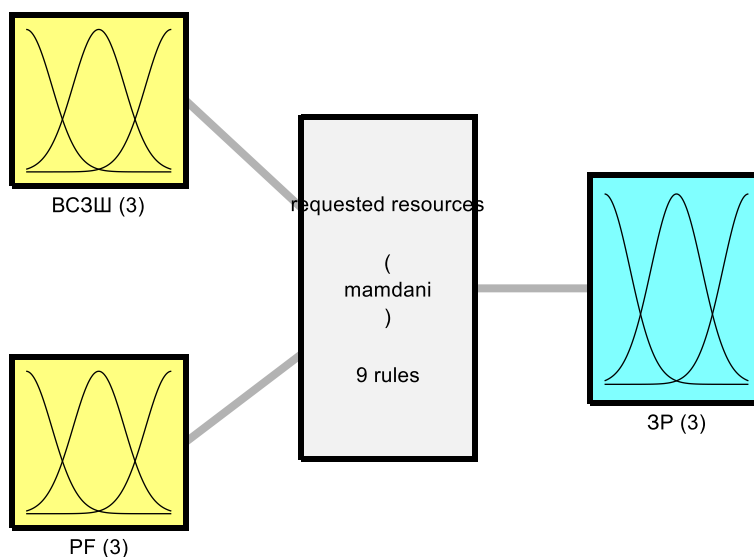
### III. Імітаційна модель управління частотно-часовим ресурсом, яка заснована на математичному апараті нечіткої логіки

Модуль Fuzzy Logic у середовищі Matlab дозволяє будувати нечіткі системи двох типів – Мамдані та Сугено. Основна відмінність між цими системами полягає в різних способах задавання значень вихідних змінних у правилах, що утворюють базу знань. Для вирішення цієї задачі використаємо алгоритм виведення Мамдані. На рис. 3 представлено систему нечіткого виведення для формування запитуваних ресурсів (ЗР).

Для входу ВСЗШ задані три ФП гаусового типу, кожна з яких характеризує вхід відповідно як «низьке», «середнє» і «високе» (рис. 3) в діапазоні від -10 до 40 дБ.

Для входу PF задані також три ФП гаусового типу, кожна з яких характеризує вхід відповідно як «низьке», «середнє» і «високе» (рис. 3) в діапазоні від 0 до 1. При цьому  $PF = 0$  при  $I_i' = 0$  і  $PF = 1$  при  $I_i' = C_i$ .

Вихідною змінною є запитувані ресурси (ЗР). Для виходу задаються три ФП гаусового типу, кожна з яких характеризує вихід, відповідно, як «низькі», «середні» і «високі», нормованих у діапазоні від 0 до 1.



System requested resources: 2 inputs, 1 outputs, 9 rules

Рис. 3. Система нечіткого виводу для формування запитуваних ресурсів

Наступним кроком у формуванні задачі є складання правил типу «Якщо ... То ...». Наприклад, якщо BC3Ш – високе і PF – низьке, то запитувані ресурси – низькі. Всього створено 9 правил нечіткого виводу (рис. 4).

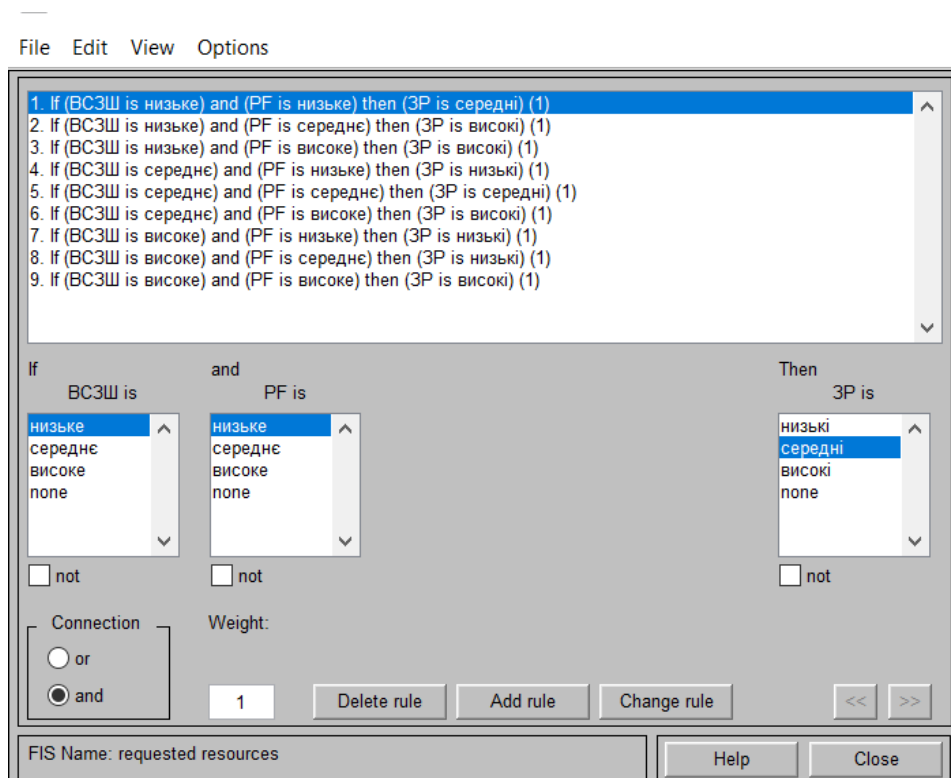
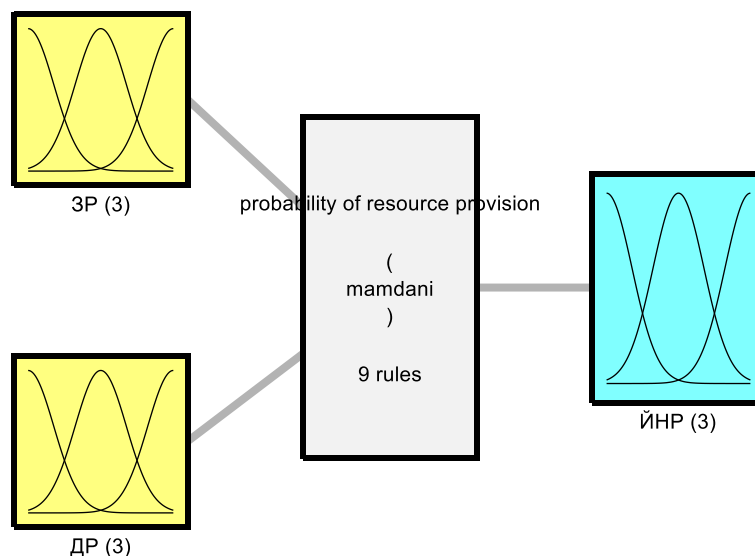


Рис. 4. Правила нечіткого виведення для запитуваних ресурсів





System probability of resource provision: 2 inputs, 1 outputs, 9 rules

Рис. 5. Система нечіткого логічного виведення для прийняття рішення на виділення частотно-часового ресурсу

Створено систему нечіткого логічного виведення для прийняття рішення на виділення частотно-часового ресурсу (рис. 5). Вхідними змінними в даному випадку є «запитувані ресурси» (ЗР) і «доступні ресурси» (ДР). Вихідною змінною є «ймовірність надання ресурсу» (ЙНР)  $P_{np}$ .

Для входу ЗР задані три ФП гаусового типу, кожна з яких характеризує вхід відповідно як «низькі», «середні» і «високі» (рис. 5), нормовані в діапазоні від 0 до 1.

Для входу ДР задані так само три ФП гаусового типу, кожна з яких характеризує вхід відповідно як «низькі», «середні» і «високі», нормовані в діапазоні від 0 до 1.

Вихідною змінною є ЙНР. Для виходу задаються три ФП гаусового типу, кожна з яких характеризує вихід відповідно як «низька», «середня» і «висока», в діапазоні від 0 до 1. Створено 9 правил нечіткого виведення (рис. 6) для ЙНР.

## V. Аналіз алгоритму розподілу частотно-часового ресурсу в мережі когнітивного радіо

За допомогою розробленої імітаційної моделі проведено аналіз алгоритму розподілу частотно-часового ресурсу в мережі когнітивного радіо.

Перший експеримент полягав у тому, що на вхід системи нечіткого виведення для формування запитуваних ресурсів подавалося значення ВСЗШ, яке змінювалося в межах від - 10 до 40 дБ. РР приймало значення 0,1 (низька миттєва швидкість передачі даних відносно до пропускної здатності), 0,5 (середня) та 0,9 (висока).

На рис. 7 представлені графіки залежності запитуваних ресурсів від ВСЗШ.

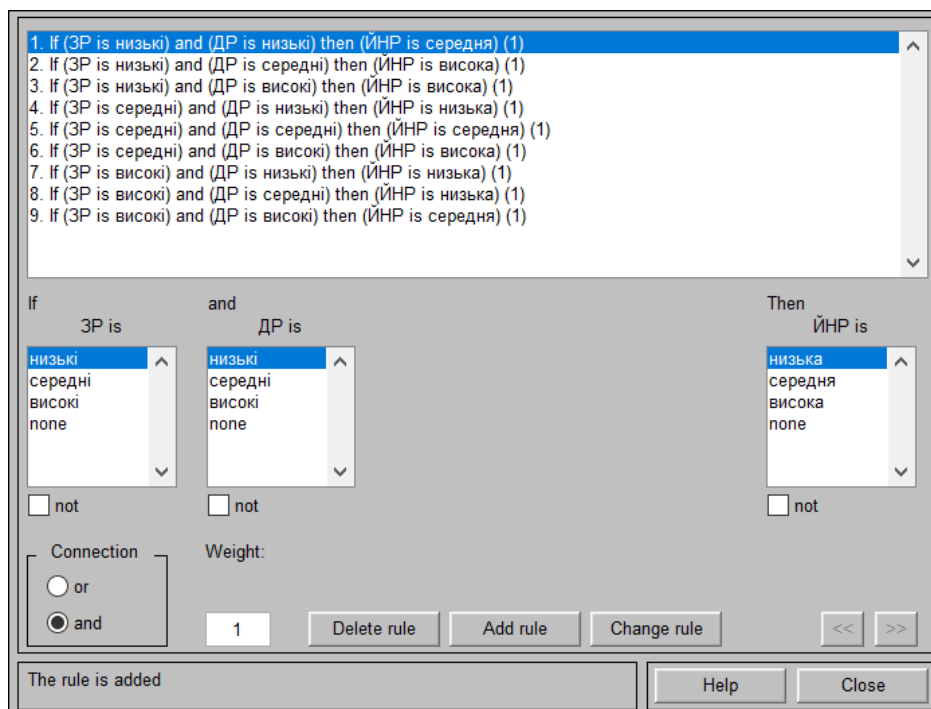


Рис. 6. Правила нечіткого виведення для ймовірності надання ресурсу

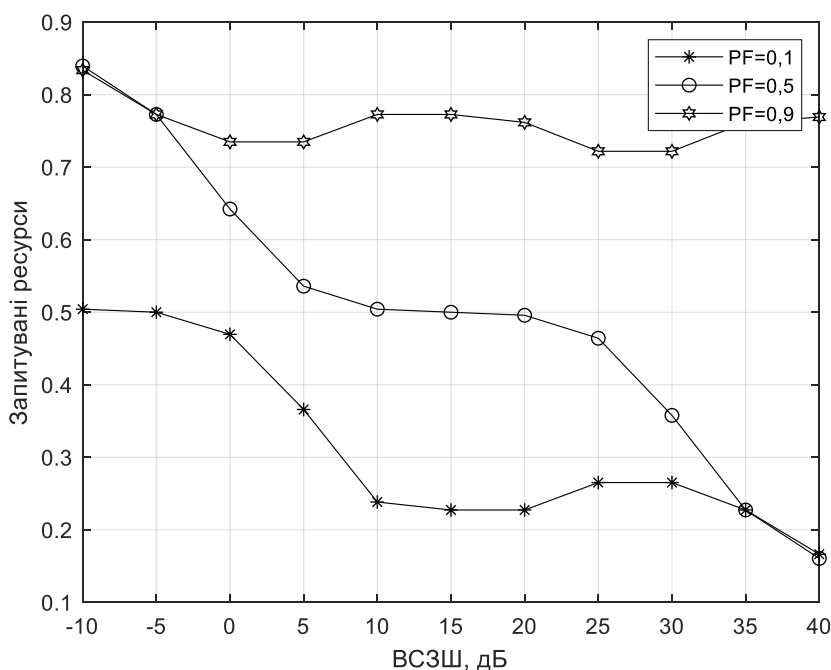


Рис. 7. Залежності запитуваних ресурсів від ВСЗШ

З графіків на рис. 7 видно, що при низькій миттєвій швидкості передачі даних та ВСЗШ, що змінюється від -10 дБ до 0 дБ, запитувані ресурси практично не змінюються і лежать в межах 0,5. Тобто АС з таким каналом будуть мати середні ЗР. З подальшим збільшенням ВСЗШ від 0 дБ до 10 дБ ЗР різко зменшуються до 0,23. При ВСЗШ, що лежить в межах від 10 дБ до 40 дБ, запитувані ресурси низькі і практично



не змінюються. При середній миттєвій швидкості передачі даних ЗР дуже залежать від ВСЗШ. Так при збільшенні ВСЗШ від -10 дБ до 10 дБ запитувані ресурси зменшуються від 0,84 до 0,5. При ВСЗШ у межах від 10 дБ до 20 дБ запитувані ресурси практично не змінюються і дорівнюють 0,5. З подальшим збільшенням ВСЗШ від 20 дБ до 40 дБ спостерігається різке зниження ЗР до 0,15. При високій миттєвій швидкості передачі даних ЗР практично не змінюються і лежать у межах від 0,84 до 0,72, тобто АС з таким каналом будуть мати високі ЗР.

Другий експеримент полягав у тому, що на вхід системи нечіткого виведення для формування ймовірності надання ресурсу подавалося значення ЗР, які змінювались у межах від 0,1 до 1. Доступні ресурси приймали значення 0,1 (низькі доступні ресурси), 0,5 (середні) та 1 (повністю всі ресурси, які є доступними).

На рис. 8 надано графіки залежності ймовірності надання ресурсу від запитуваних ресурсів. Для оцінки ймовірності надання ресурсу введено п'ятибальну шкалу ймовірності, відповідно до якої вважатимемо, що ймовірність надання ресурсу дуже мала при  $P_{nr} < 0,1$ , при  $0,1 < P_{nr} < 0,35$  – мала, при  $0,35 < P_{nr} < 0,65$  – середня, при  $0,65 < P_{nr} < 0,8$  – висока, при  $0,8 < P_{nr}$  – дуже висока.

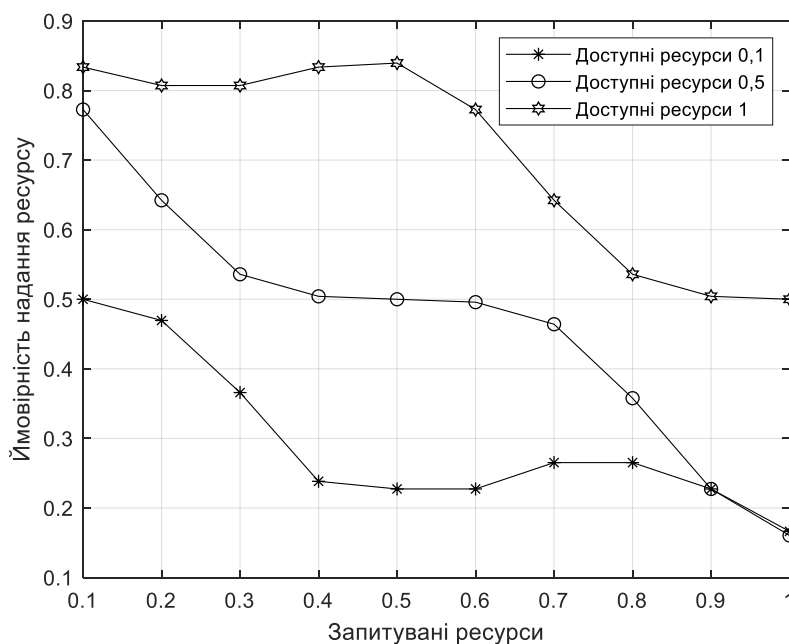


Рис. 8. Залежності ймовірності надання ресурсу від запитуваних ресурсів

Аналіз графіків, які представлені на рис. 8, показує, що дуже високу ймовірність надання ресурсу мають АС при повністю доступних ресурсах і запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,1 до 0,5. Високу ймовірність надання ресурсу мають АС: при повністю доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,56 до 0,69; або при середніх доступних ресурсах і запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,1 до 0,19. Середню ймовірність надання ресурсу мають АС: при повністю доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,69 до 1; або середніх доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,19 до 0,8; або

при низьких доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,1 до 0,32. Малу ймовірність надання ресурсу мають АС: при середніх доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,8 до 1; та при низьких доступних ресурсах та запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,32 до 1. Дуже малої ймовірності аналіз не виявив.

## Висновки

Властивість когнітивності передбачає здатність радіосистеми вирішувати такі завдання: перехід від одного стандарту до іншого; використання декількох стандартів; перебудову частоти; можливість участі в динамічному розподілі спектру.

Однією з проблем, що виникають при розподілі частотного ресурсу, може бути відсутність чітких правил прийняття рішення. У таких випадках, як правило, використовують непараметричні алгоритми та методи, такі, наприклад, як алгоритми, засновані на математичному апараті нейронних мереж, або алгоритми, побудовані на математичному апараті нечіткої логіки.

У роботі запропоновано алгоритм розподілу частотно-часового ресурсу в мережі когнітивного радіо. Відмінною особливістю розробленого алгоритму є використання як параметра пропорційного справедливого розподілу фізичних ресурсів РР, так і ВСЗШ. Крім того, прийняття рішення в даному алгоритмі, засноване на математичному апараті нечіткої логіки. Даний алгоритм може бути застосовано на етапі функціонування мережі при наявності великої кількості АС і централізованому управлінні частотами з боку БС.

Розроблено імітаційну модель управління частотно-часовим ресурсом, за допомогою якої проведено аналіз запропонованого алгоритму.

Аналіз показав, що дуже високу ймовірність надання ресурсу мають АС при повністю доступних ресурсах і запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,1 до 0,5. Високу ймовірність надання ресурсу мають АС: при повністю доступних ресурсах і запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,56 до 0,69; або при середніх доступних ресурсах і запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,1 до 0,19. Середню ймовірність надання ресурсу мають АС: при повністю доступних ресурсах і запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,69 до 1; або середніх доступних ресурсах і запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,19 до 0,8; або при низьких доступних ресурсах і запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,1 до 0,32. Малу ймовірність надання ресурсу мають АС: при середніх доступних ресурсах і запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,8 до 1; та при низьких доступних ресурсах і запитуваних ресурсах, які лежать у межах від 0,32 до 1.

## Список літератури:

1. *Tafazolli R.* Technologies for the Wireless Future: Wireless World Research Forum (WWRF). John Wiley & Sons. 2006. 520 p.
2. *Burns P.* Software defined radio for 3G. Artech house. 2003. 304 p.

3. *Haykin S.* Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. IEEE journal on selected areas in communications. 2005. №23(2). P. 201-220.
4. ETSI TR 102 682 V1.1.1 (2009-07). Reconfigurable Radio Systems (RRS); Functional Architecture (FA) for the Management and Control of Reconfigurable Radio Systems. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/102600\\_102699/102682/01.01.01\\_60/tr\\_102682v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102600_102699/102682/01.01.01_60/tr_102682v010101p.pdf)
5. ETSI TR 102 683 V1.1.1 (2009-09). Reconfigurable Radio Systems (RRS); Cognitive Pilot Channel (CPC). URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/102600\\_102699/102683/01.01.01\\_60/tr\\_102683v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102600_102699/102683/01.01.01_60/tr_102683v010101p.pdf)
6. ETSI TR 102 745 V1.1.1 (2009-10). Reconfigurable Radio Systems (RRS); User Requirements for Public Safety. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/102700\\_102799/102745/01.01.01\\_60/tr\\_102745v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102700_102799/102745/01.01.01_60/tr_102745v010101p.pdf)
7. ETSI TR 102 838 V1.1.1 (2009-10). Reconfigurable Radio Systems (RRS); Summary of feasibility studies and potential standardization topics. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/102800\\_102899/102838/01.01.01\\_60/tr\\_102838v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102800_102899/102838/01.01.01_60/tr_102838v010101p.pdf)
8. *Mitola J., Maguire G.Q.* Cognitive radio: making software radios more personal. IEEE personal communications. 1999. № 6(4). P. 13-18. DOI: <https://doi.org/10.1109/98.788210>
9. *Mitola J.* Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications. In 1999 IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC'99)(Cat. No. 99EX384). 1999, November. IEEE, 1999. P. 3-10. DOI: <https://doi.org/10.1109/MOMUC.1999.819467>
10. *Гельгор А.Л., Попов Е.А.* Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. Пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 204 с.
11. *Tse D., Viswanath P.* Fundamentals of Wireless Communication. New York: Cambridge University Press, 2005. 583 p.
12. *Liu L., Nam Y.H., Zhang J.* Proportional fair scheduling for multi-cell multi-user MIMO systems. In 2010 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). IEEE, 2010. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CISS.2010.5464834>
13. *Крылов В.В., Дли М.И., Голуков Р.Ю.* Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматиз, 2001. 224 с.
14. *Аунг М.М.* Исследование и разработка алгоритмов планирования и приоритетного управления доступом в сетях WiMAX. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Московский государственный институт электронной техники. 2010. 148 с.