

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ СПЕКТРАЛЬНОЇ МОБІЛЬНОСТІ У КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ

© Кирик М. І., Янишин В. Б., Піцик М. В., 2016

Розглянуто методи спектральної мобільності для когнітивного радіо, що дають змогу когнітивним користувачам перемикатися в частотні канали, які простоюють у цей момент. Проаналізовано процес передавання обслуговування спектра для проактивного і реактивного методів спектральної мобільності. Запропоновано алгоритми початку нової передачі й проактивної передачі обслуговування спектра, на основі критерію прогнозування стану каналу із використанням статистичних параметрів та зібраної статистичної інформації використання каналу. Для проведення симуляції створено аналітичну модель системи когнітивного радіо і визначено залежність пропускну здатності та ймовірності виникнення колізії когнітивної мережі відносно завантаженості первинної мережі.

Ключові слова: когнітивне радіо, спектральна мобільність, проактивна передача обслуговування спектра, реактивна передача обслуговування спектра.

М. Kyryk, V. Yanyshyn, M. Pitsyk  
Lviv Polytechnic National University

## SPECTRUM MOBILITY TECHNIQUES PERFORMANCE EVALUATION FOR COGNITIVE RADIO

© Kyryk M., Yanyshyn V., Pitsyk M., 2016

In this paper considered spectrum mobility techniques for cognitive radio that based on spectrum sensing. The technology of cognitive radio allows the secondary unlicensed cognitive users to use the spectrum when it is not occupied by the primary users. Due to the randomness of the appearance of primary users, disruptions to both licensed and unlicensed communications are difficult to prevent, so may lead to a low capacity of both licensed and unlicensed communications. Whenever a primary user wants to use a channel which is occupied by a cognitive user, the cognitive user should start a proactive spectrum handoff to another channel and vacate the selected channel before the primary user utilizes it. In the proposed framework, channel switching policies and a proactive spectrum handoff protocol are proposed to let cognitive users use a channel before a primary user occupy it to avoid unwanted interference. Network coordination techniques for cognitive users are also included into the spectrum handoff protocol design to realize channel collision. Moreover, a distributed channel selection method to exclude collisions among cognitive users in a multi-user spectrum handoff scenario is proposed.

The simulation model works accordingly to the next scheme. First compared the capacity of proposed proactive spectrum handoff scheme with the reactive spectrum handoff approach. In the reactive spectrum handoff approach, secondary users transmit a packet without predicting the availability of the current channel at the moment when a frame ends. Capacity is not very obvious when both SU and PU traffic are light differences between the proactive spectrum handoff scheme and the reactive spectrum handoff scheme. However, when the cognitive user and primary user packets intensity are high, the proactive spectrum handoff scheme outperforms the reactive scheme in terms of 25 % higher capacity. Next

**compared collision rate of proposed proactive spectrum handoff scheme with the reactive spectrum handoff approach. Proactive spectrum handoff always shows better performance than reactive spectrum handoff in terms of highest capacity and lower collision rate.**

**Key words: cognitive radio, spectrum mobility, proactive spectrum handoff, reactive spectrum handoff.**

### **Вступ**

Швидке зростання кількості безпроводних пристроїв привело до різкого збільшення потреби доступу до спектра. Технологія когнітивного радіо дає змогу вторинним користувачам когнітивної мережі шукати і використовувати частини спектра, що в цей момент і в цьому місці не використовуються, не створюючи перешкод для первинних користувачів. Така можливість використання спектра призводить до нових невирішених завдань, адаптації мережевих протоколів до умов середовища із можливістю динамічної зміни доступного спектра [1]. Зокрема, однією з найважливіших функцій когнітивних мереж є мобільність спектра, що дає змогу когнітивним користувачам змінювати робочі частоти на основі доступності спектра. Порівняно з іншими функціональними можливостями мереж когнітивного радіо (сканування спектра, управління використанням спектра та спільне використання спектра) [2], мобільність спектра менш досліджена в науковому співтоваристві, оскільки через випадковий характер появи первинного користувача надзвичайно важко отримати швидкий і плавний перехід спектра, що веде до мінімального втручання у роботу первинної мережі та зниження продуктивності когнітивних користувачів, під час передавання обслуговування спектра.

### **Мобільність спектра в когнітивних радіомережах**

Мобільність спектра дає змогу когнітивним користувачам перемикатися в частотні канали, що простоюють у цей момент. Мобільність спектра потрібна, коли первинний користувач займає канал у групі, який в цей момент зайняв вторинний користувач. Оскільки вторинні користувачі не мають доступу до контролю над наявними ресурсами, когнітивна система повинна бути спроектована так, щоб знати, якому когнітивному користувачу потрібно залишити певний частотний канал якомога швидше і перейти до наступної вільної частини спектра, як тільки з'являється основний користувач [3].

Найбільш важливими і складними проблемами в мобільності спектра є співіснування вторинних користувачів з первинними [2], так, щоб уникнути інтерференції з первинними користувачами, без будь-якого зв'язку з первинною мережею, але досягти безперебійного зв'язку для вторинних користувачів. Для того, щоб вирішити проблему взаємних перешкод і уникнути інтерференції, управління здійснюється як на передавачі, так і на приймачі. У приймачі інтерференційне обмеження (або температуру інтерференції) розраховують на основі розташування приймача, загасання сигналу, формату модуляції, кодування і досягається, вона відповідно, обмеженням потужності передавача [4]. З іншого боку, в передавачі, за допомогою процесу сканування радіочастотного середовища, передусім відбувається класифікація стану частотного каналу, а потім визначається, коли, де і з якою потужністю продовжити передавання. Регулювання потужності в когнітивному радіо зменшує непотрібну інтерференцію.

### **Процес мобільності спектра**

Мобільність спектра або процес передавання обслуговування спектра здійснюється, коли передавання інформації по каналу, що зайняв вторинний користувач, переривається стартом або відновленням передавання первинним користувачем. Як тільки з'являється первинний користувач, вторинний повинен звільнити частотний канал, щоб уникнути інтерференції для основного користувача і перемкнутися на інший доступний канал та відновити і завершити свою поточну передачу [5]. На рис. 1 показано приклад з кроками, які входять у процес передавання обслуговування. На рис. 1 ПК позначає первинного користувача, аналогічно ВК позначає вторинного когнітивного користувача. Затримка передачі, одна з характеристик продуктивності, також показана на рис. 1.

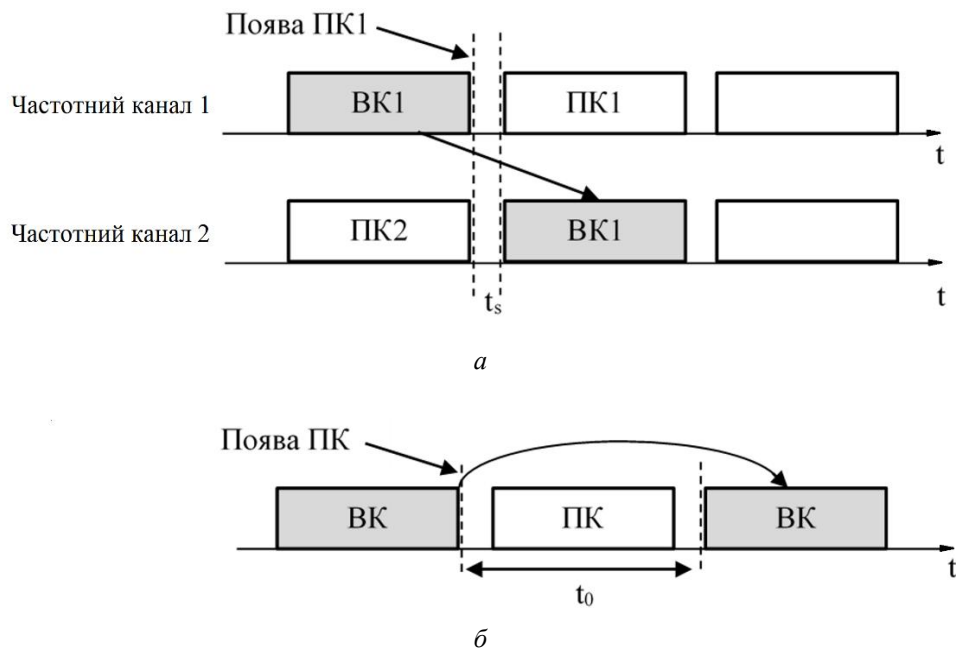


Рис. 1. Приклад вибору каналу під час процесу передавання обслуговування спектра

Спочатку вторинний користувач вибирає канал 1 і запускає передавання своїх пакетів. Стрілка показує переривання передачі через появу або відновлення передавання первинного користувача на каналі 1. Коли передачу когнітивного користувача перериває первинний користувач, є два можливих випадки. У першому випадку (а), коли відбувається переривання, то когнітивний користувач тимчасово припиняє свою передачу, змінює робочий канал на інший вільний частотний канал, наприклад, на канал 2, і відновлює передачу [6]. Затримка тут виникає через перемикавання, і таку затримку називають затримкою перемикавання каналу (позначимо  $t_s$ ). Під час переривання у другому випадку (б) когнітивний користувач залишається на поточному частотному каналі. Тому він повинен зачекати, поки високопріоритетний первинний користувач поточного каналу закінчить свою передачу [6]. Тут затримка передачі виникає на час, коли канал зайнятий первинним користувачем, і таку затримку позначимо  $t_0$ . Отже, процес перемикавання каналу може бути реалізований в два етапи: моніторинг або виявлення первинних користувачів і безрозривне перемикавання каналу [7].

Отже, основне завдання для когнітивного користувача – мати можливість призупинити свою передачу, звільнити канал, виявивши появу первинного користувача. Крім того, когнітивний користувач повинен виконати безрозривне перемикавання для відновлення зв'язку.

### Реактивна і проактивна передача обслуговування на основі сканування спектра

Процес передачі обслуговування, в основному, зосереджений на виборі нового каналу. Відповідно до типу вибору цільового каналу, методи передачі обслуговування частотного каналу можна поділити на: реактивну передачу обслуговування і проактивну передачу обслуговування каналу (на основі сканування спектра) [8–9].

У разі реактивного передавання обслуговування, на основі сканування спектра, когнітивний користувач виконує пошук цільового каналу і перемикавання каналу після виявлення основного користувача. Хоча концепція цього підходу інтуїтивно зрозуміла, для реалізації такого підходу потрібно провести процедуру сканування та реконфігурації спектрі, що спричиняє достатню затримку і можливість збою як і для передачі когнітивного користувача, так і для передачі первинного користувача, що є серйозною проблемою [10]. Інший підхід – проактивна передача обслуговування – пропонує дозволити неліцензованим користувачам звільнити канал перед тим, як його займе основний користувач, щоб уникнути небажаних колізій. Для цього когнітивному

користувачеві потрібно передбачити майбутній стан доступності каналу, виконувати перемикання спектра і реконфігурацію, на основі спостережуваної статистики використання каналу [11–13]. Такий підхід дає змогу значно зменшити колізії первинним і когнітивним користувачам.

### Критерії та політика передавання обслуговування спектра

Використовуючи статистику щодо спостереження використання каналу, когнітивний користувач може робити прогнози про доступність каналу до кінця поточного пакета. На основі визначеного прогнозу когнітивний користувач вирішує, чи залишитися в цьому каналі, чи перемкнутися на новий канал або навіть зовсім зупинити поточну передачу [14]. Пропонується використати два критерії, щоб визначити, чи відбуватиметься передача обслуговування спектра: ймовірність прогнозування того, що теперішній канал і цільовий канал зайняті або простоюють, і прогнозування очікуваної тривалості періоду простоювання каналу [13].

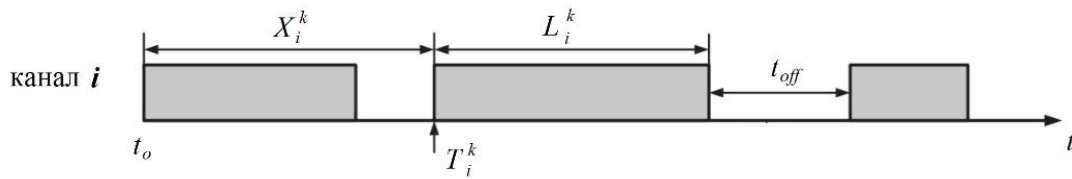


Рис. 2. Активність первинного користувача в  $i$ -му каналі

З урахуванням цих критеріїв розробляємо політику передавання обслуговування спектра. Рис. 2 показує активність первинного користувача в  $i$ -му каналі, де  $X_i^k$  – час між початками передачі пакета,  $T_i^k$  – час прибуття  $k$ -го пакета. Відповідно до припущення, що пакети первинного користувача з'являються випадково, згідно із законом розподілу Пуассона [15], час  $X_i^k$  розподілений за експоненціальним законом, із середньою швидкістю появи нового пакета  $\lambda_i$  пакетів за секунду, а довжина пакета первинного користувача – за розподілом Пуассона  $f_{L_i}(l)$ . Як видно з рис. 2, для будь-якого моменту часу  $t$  ймовірність того, що  $i$ -й канал зайнятий або простоє, можна записати в такий спосіб [11]:

$$\begin{aligned} \Pr(N_i(t)=1) & \text{ якщо } T_i^k < t \text{ і } T_i^k + L_i^k \geq t, & k \geq 1 \\ \Pr(N_i(t)=0) & \text{ якщо } T_i^k + L_i^k < t \text{ і } T_i^{k+1} \geq t, & k \geq 1 \\ & T_i^{k+1} \geq t, & k = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

де  $L^k$  – позначає довжину  $k$ -го пакета даних первинного користувача в  $i$ -му каналі. Отже, ймовірність того, що канал  $i$  вільний у будь-який момент часу  $t$ , можна отримати відповідно до виразу (2) [11].

$$\begin{aligned} \Pr(N_i(t)=1) &= \int_0^\infty \left[ \sum_{k=1}^\infty \Pr(T_i^k + L_i < t | k) \Pr(k) + \Pr(T_i^k \geq t) \Pr(k=0) \right] f_{L_i}(l) dl = \\ &= \int_0^\infty \left[ \sum_{k=1}^\infty \left[ \frac{(l_i(t-L_i))^k}{k!} e^{-l_i(t-L_i)} \right] \left[ \frac{(l_i t)^k}{k!} e^{-l_i t} \right] \frac{(l_i t)^k}{k!} e^{-l_i t} + e^{-2l_i t} \right] f_{L_i}(l) dl \end{aligned} \quad (2)$$

Нехай  $t_{off}$  представлятиме тривалість періоду вимкнення. Для  $i$ -го каналу функція розподілу ймовірності залежно від тривалості періоду вимкнення визначається [11]:

$$\begin{aligned} \Pr(t_{off} < x) &= \int_0^\infty \int_0^{1+x} l_i e^{-l_i t} f_{L_i}(l) dt dl = \\ &= \int_0^\infty (1 - e^{-l_i(1+x)}) f_{L_i}(l) dt dl \end{aligned} \quad (3)$$

Отже, на підставі наведеної вище ймовірності, політика, що когнітивний користувач повинен перемкнутися на новий канал, визначається як:

$$\Pr(N_i(t) = 0) < t_L, \quad (4)$$

де  $t_L$  – це порогове значення ймовірності, нижче від якого канал вважається зайнятим, і когнітивний користувач повинен здійснити передавання обслуговування спектра, тобто поточний канал більше не простоює у кінці передавання пакета. Крім того, така політика, що канал  $j$  стає каналом кандидатом у момент часу  $t$ , є

$$\begin{cases} \Pr(N_j(t) = 0) \geq t_H \\ \Pr(t_{j,off} > h) \geq q \end{cases}, \quad (5)$$

де  $t_H$  – це порогове значення ймовірності, що канал вважається таким, що простоює у кінці поточного пакета передавання,  $\eta$  – сума тривалості передавання пакета плюс тривалість тимчасового інтервалу (тобто,  $\eta = \xi + \beta$ ), а  $\theta$  – порогове значення ймовірності того, що канал вважатиметься таким, який простоює під час наступної передачі пакета. Другий критерій (5) означає: для підтримки хоча б одного пакета когнітивного користувача ймовірність тривалості простою  $j$ -го каналу є більшою, ніж тривалість передачі пакета, яка повинна бути вищою або дорівнювати  $\theta$ .

### Алгоритм роботи протоколу передачі обслуговування спектра

Пропонований протокол передачі обслуговування спектра побудований на основі вищевказаної політики. Він складається з двох частин. Перша частина (протокол 1) описує, як пара когнітивних користувачів ініціює нову передачу (алгоритм роботи протоколу подано на рис. 3) [12].

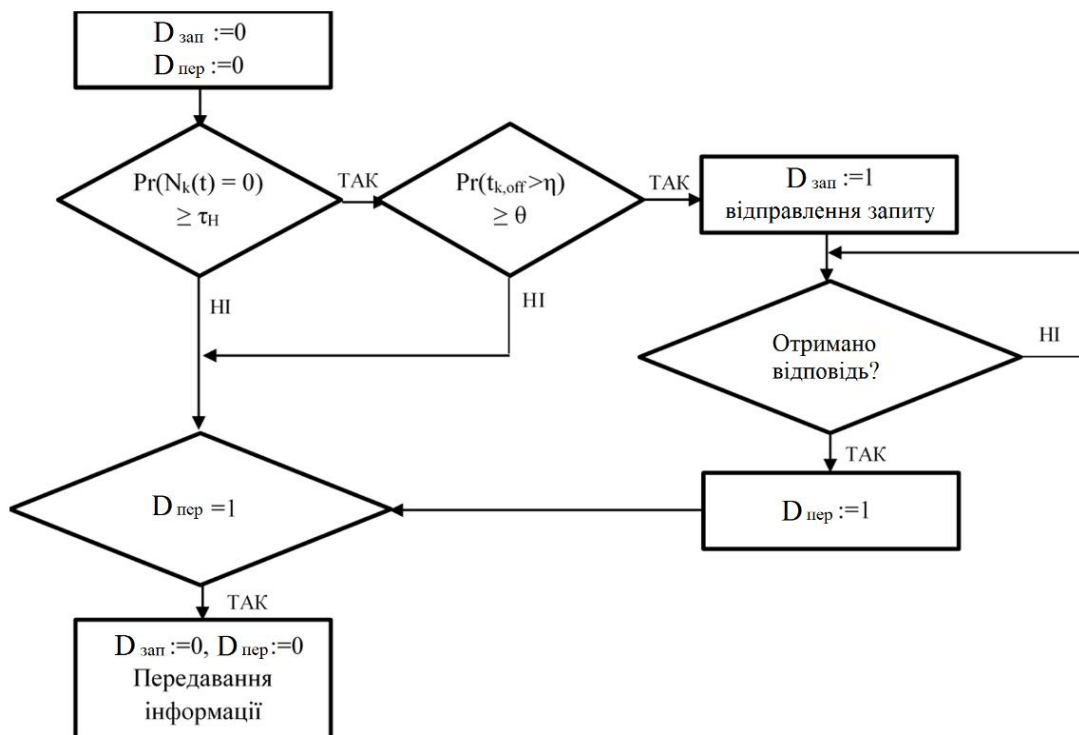


Рис. 3. Алгоритм початку нової передачі:

$D_{зап}$  – дозвіл для запиту на передавання даних,

$D_{пер}$  – дозвіл передачі самих даних,  $t$  – початок наступного часового слоту,

$k$  – наступний частотний канал для перемикання

Друга частина (протокол 2) описує проактивну передачу обслуговування спектра під час активної передачі когнітивного користувача (алгоритм роботи протоколу подано на рис. 4). Метою пропонованого протоколу є визначення необхідності проведення процесу передавання

обслуговування спектра та подальшого перемикавання на новий канал після закінчення передачі цього пакета для пари когнітивних користувачів, що здійснюють активну передачу пакета.

Використання запропонованого протоколу дає змогу когнітивним користувачам уникнути перебоїв, пов'язаних з появою первинного користувача.

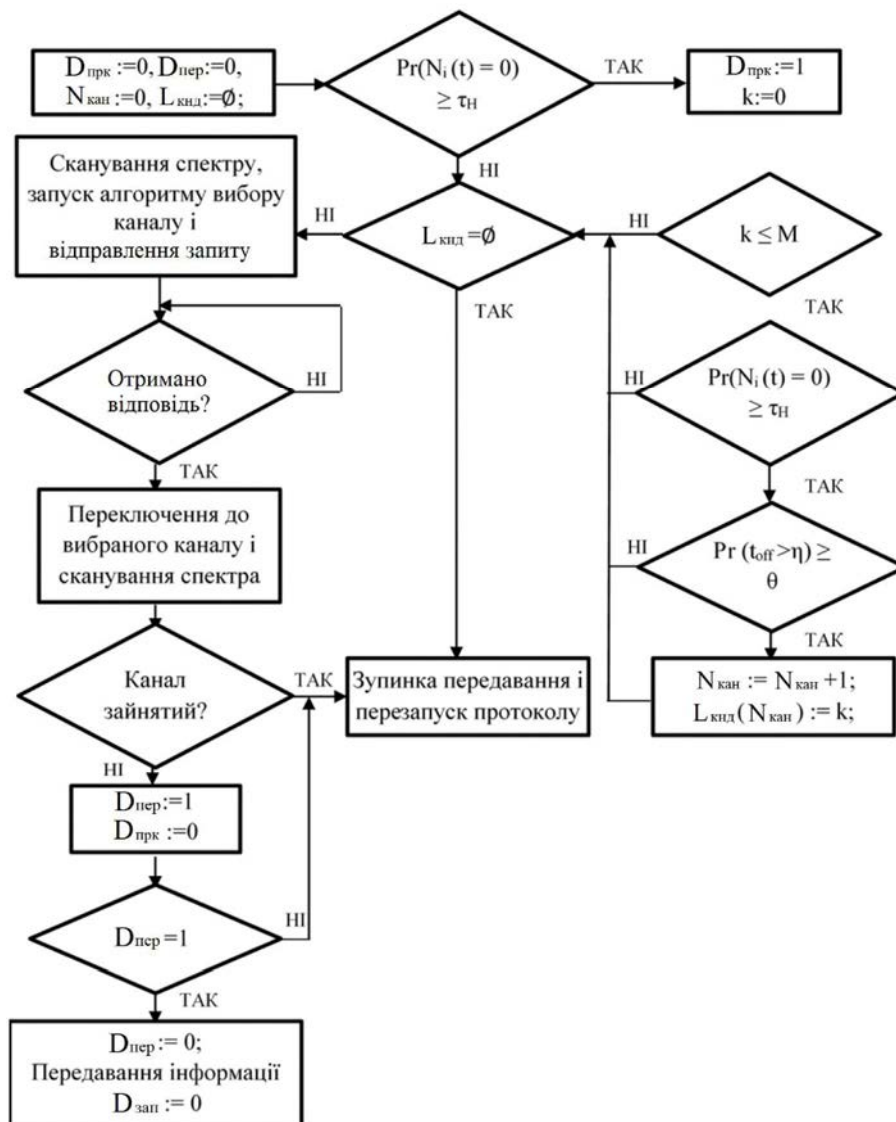


Рис. 4. Алгоритм проактивної передачі обслуговування спектра:

$D_{прк}$  – дозвіл для перемикавання каналів;  $N_{кан}$  – номер частотного каналу та  $L_{кнд}$  – список каналів кандидатів для передавання даних;  $i$  – поточний канал

### Оцінка ефективності проактивного методу передачі обслуговування спектра

Порівняємо запропонований проактивний метод передачі обслуговування спектра із реактивним методом. У реактивному підході передачі обслуговування спектра когнітивний користувач передає пакет, не прогнозуючи наявності поточного каналу в момент, коли передача пакета закінчується. Тобто когнітивний користувач не змінює поточного каналу до завершення передачі пакета, якщо попередній пакет успішно прийнятий. Передача обслуговування спектра виникає тоді, коли поточна передача фактично стикається з передачею первинного користувача і пакет, що створив колізію, повинен передатися повторно. Для оцінювання ефективності кожного методу використаємо аналітичну модель когнітивної мережі, яка унеможливує аналіз ефективності використання спектра когнітивної мережі та порівняння продуктивності роботи із застосуванням декількох критеріїв, описану в попередніх роботах [15, 16]. Спершу здійснюється

модельовання для визначення середнього значення пропускної спроможності когнітивного користувача залежно від завантаженості первинної мережі.

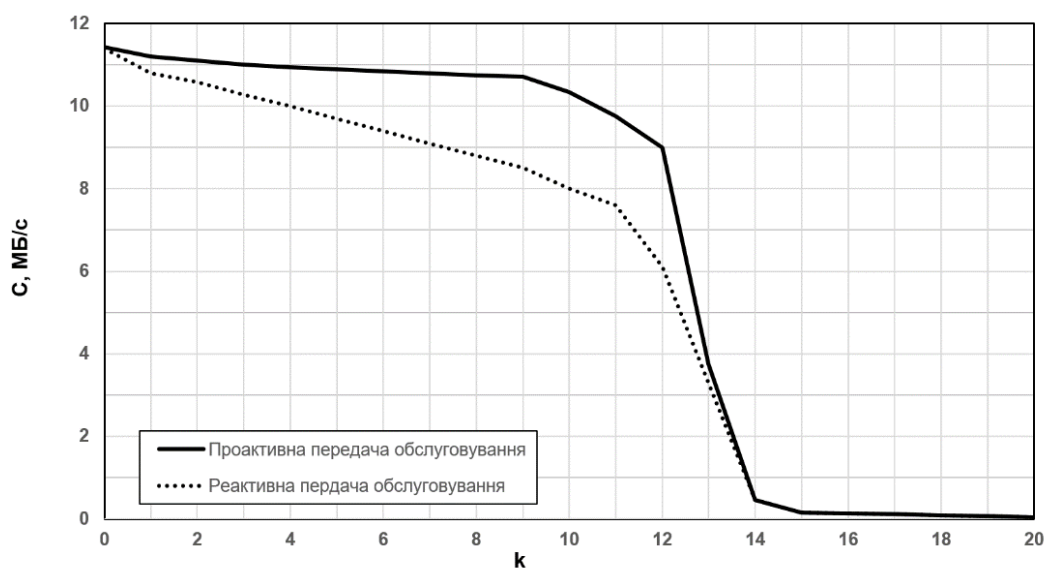


Рис. 5. Залежність середнього значення пропускної спроможності для когнітивного користувача від середньої кількості первинних користувачів

На рис. 5 подано результат модельовання для проактивного і реактивного методів передачі обслуговування спектра. Очевидно, що за середньої завантаженості первинної мережі середня пропускна здатність на одного когнітивного користувача для проактивного методу на 20–25 % вища, ніж з використанням реактивного методу.

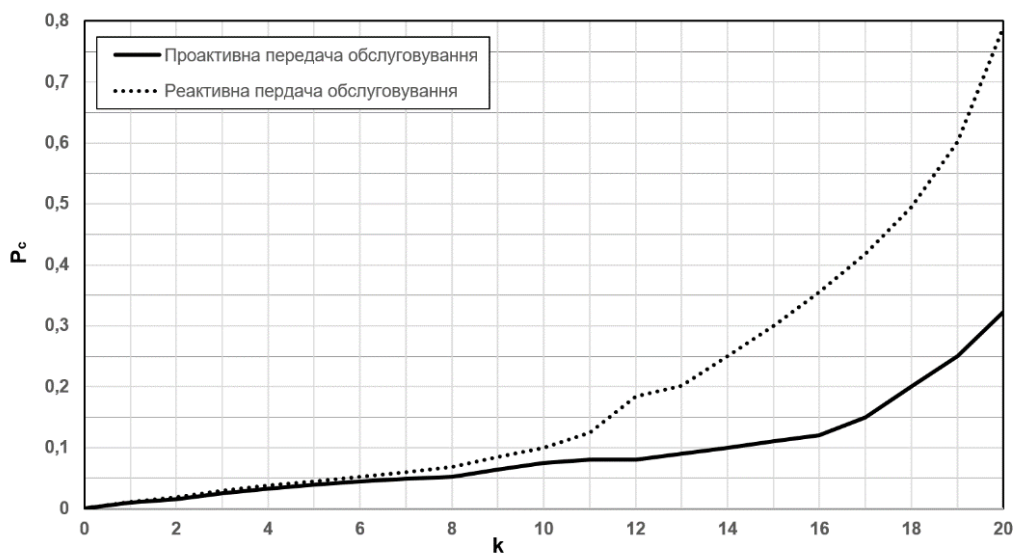


Рис. 6. Залежність ймовірності виникнення колізії від середньої кількості первинних користувачів

На рис. 6 подано результат модельовання ймовірності виникнення колізії, залежно від середньої кількості первинних користувачів, для проактивного і реактивного методів. З наведених залежностей очевидно, що використання проактивного методу передачі обслуговування спектра зменшує ймовірність виникнення колізії приблизно удвічі. Це свідчить про те, що кращим методом мобільності спектра є реактивний метод передачі обслуговування.

## Висновки

У роботі проаналізовано процес мобільності спектра і методи передавання обслуговування спектра в когнітивних мережах. Визначено два основні критерії перемикання частотного каналу: ймовірність прогнозування того, що теперішній і цільовий канали зайняті або простоюють, й очікувана тривалість періоду простою каналу. На основі цих критеріїв розроблено політику мобільності спектра – основним завданням для когнітивного користувача є можливість призупинити свою передачу і звільнити канал, коли з'явиться первинний користувач. Це можна реалізувати в два етапи: моніторинг або виявлення первинних користувачів і безрозривне перемикання каналу. Для цього запропоновано покращений алгоритм проактивного протоколу передачі обслуговування спектра, що складається з двох частин: протокол старту нової передачі, що описує ініціацію нового з'єднання, і протокол проактивного перемикання, що ґрунтується на попередньому прогнозуванні стану частотного каналу із використанням статистичних даних роботи частотного каналу. Пропонований протокол порівнюється із реактивним за допомогою використання аналітичної моделі роботи когнітивної мережі. Проведено моделювання для визначення залежності середнього значення пропускної спроможності когнітивного користувача та ймовірності виникнення колізії від завантаженості первинної мережі. Результати моделювання показують, що запропонований протокол має вищу продуктивність порівняно з реактивним методом. Стосовно середньої пропускної здатності для когнітивних користувачів продуктивність зростає в середньому на 25 % і майже вдвічі знижується ймовірність виникнення колізії із первинними користувачами.

1. Akyildiz I. F., Lee W.-Y., Vuran M. C., Shantidev M., A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks // *IEEE Communications Magazine*. vol. 46. April 2008. 2. Höyhtyä M., Mustonen M., Sarvanko H., Hekkala A. Cognitive radio: An intelligent wireless communication system // *Research report NO VTT-R-02219-08*. 2008. 3. Mitola J. Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio. Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology. 2000. 4. Akyildiz I. F., Lee W.-Y., Vuran M. C., and Mohanty S. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey // *Computer Networks (Elsevier)*. Vol. 50. September 2006. P. 2127–2159. 5. Mishra S., Sahai A. and Brodersen R. Cooperative sensing among cognitive radios, in *Proc. IEEE ICC, June 2006*. P. 1658–1663. 6. Chung-Wei Wang, Li-Chun Wang, F. Adachi. Modeling and Analysis for Reactive decision // *Global Telecommunications Conference. IEEE*. Dec. 2010. P. 1–6. 7. Yi Song, Jiang Xie. ProSpect: A Proactive Spectrum Handoff Framework for Cognitive Radio Ad Hoc Networks without Common Control Channel // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. Vol. 11. 2012. P. 1127–1139. 8. Brandon F. Lo. A survey of common control channel design in cognitive radio networks. *Physical Communication*. 2011. P. 26–39. 9. Wang L.-C., Wang C.-W. Spectrum handoff for cognitive radio networks: Reactive sensing or proactive-sensing? // in *Proc. IEEE International in Performance, Computing and Communications Conference (IPCCC)*. December 2008. P. 343–348. 10. Song Y., Xie J. Cognitive Radio Mobile Ad Hoc Networks. DOI C “Springer Science+Business Media”. LLC. 2011. 11. Wang W., Wang L.-C. Modeling and analysis for proactive-decision spectrum handoff in cognitive radio networks // in *Proc. IEEE ICC*. June 2009. P. 1–6. 12. Yang L., Cao L., and Zheng H. Proactive channel access in dynamic spectrum networks // *Physical Communication (Elsevier)*. Vol. 1. June 2008. P. 103–111. 13. Stoica P., Moses R. L., *Introduction to Spectral Analysis*. New Jersey, Prentice Hall. 1997. 14. Tzamaloukas A., Garcia-Luna-Aceves J. J. Channel-hopping multiple access // in *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, June 2000. 15. Kyryk M., Yanyshyn V. Cooperative Spectrum Sensing Performance Analysis // in *Cognitive Radio Networks, AICT 2015*. 16. Kyryk M., Yanyshyn V., Matiishyn L., Havronskyy V. Performance Comparison of Cognitive Radio Networks Spectrum Sensing Methods, *TCSET'2016*.



## References

1. I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, M. Shantidev, "A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks" // *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, April 2008.
2. M. Höyhty, M. Mustonen, H. Sarvanko, A. Hekkala "Cognitive radio: An intelligent wireless communication system" *Research report NO VTT-R-02219-08*, 2008.
3. J. Mitola, "Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio", *Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology*, 2000.
4. I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, S. Mohanty, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey," *Computer Networks (Elsevier)*, vol. 50, pp. 2127–2159, September 2006.
5. S. Mishra, A. Sahai, and R. Brodersen, "Cooperative sensing among cognitive radios," in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1658–1663, June 2006.
6. Chung-Wei Wang, Li-Chun Wang and F. Adachi, "Modeling and Analysis for Reactivedecision", *Global Telecommunications Conference, IEEE*, pp. 1–6, Dec. 2010.
7. Yi Song, Jiang Xie, "ProSpect: A Proactive Spectrum Handoff Framework for Cognitive Radio Ad Hoc Networks without Common Control Channel", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, pp. 1127–139, 2012.
8. Brandon F. Lo, "A survey of common control channel design in cognitive radio networks," *Physical Communication*, pp. 26–39, 2011.
9. L.-C. Wang, C.-W. Wang, "Spectrum handoff for cognitive radio networks: Reactivesensing or proactive-sensing?" in *Proc. IEEE International in Performance, Computing and Communications Conference (IPCCC)*, pp. 343–348, December 2008.
10. Y. Song, J. Xie, "Cognitive Radio Mobile Ad Hoc Networks", *DOI C Springer Science+Business Media, LLC*, 2011.
11. W. Wang and L.-C. Wang, "Modeling and analysis for proactive-decision spectrum handoff in cognitive radio networks," in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1–6, June 2009.
12. L. Yang, L. Cao, and H. Zheng, "Proactive channel access in dynamic spectrum networks", *Physical Communication (Elsevier)*, vol. 1, pp. 103–111, June 2008.
13. P. Stoica and R. L. Moses, *Introduction to Spectral Analysis*, New Jersey, Prentice Hall, 1997.
14. A. Tzamaloukas and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Channel-hopping multiple access", in *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, June 2000.
15. M. Kyryk, V. Yanyshyn, "Cooperative Spectrum Sensing Performance Analysis in Cognitive Radio Networks", *AICT 2015*.
16. M. Kyryk, V. Yanyshyn, L. Matiishyn, V. Havronskyy "Performance Comparison of Cognitive Radio Networks Spectrum Sensing Methods", *TCSET'2016*