

УДК 621.391

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВЗАЄМОДІЙ В УГРУПОВАННІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G-NewRadio



[К.О. СЕЛІВАНОВ](#), [Б.П. МУЛЯР](#), [Ю.Ю. КОЛЯДЕНКО](#), [М.В. МОСКАЛЕЦЬ](#),
[О.С. БОНДАРЕНКО](#)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Abstract – The paper proposes a dynamic model of multiple nonlinear electromagnetic interactions when using the radio resource of a group of radio-electronic means of the 5G-NewRadio mobile communication network. The model describes the electromagnetic environment of multiple nonlinear interactions of a group of electronic means in the state space based on n -elements of a complex system, which considers the nature of interelement connections and phase states, taking into account the intensity of its elements. The analysis of phase states of a grouping of 5G-NewRadio electronic means depending on the intensity of nonlinear interactions of its elements at which the network will function without deterioration of qualitative indicators in the conditions of optimum distribution of a radio resource is carried out. The dynamics of nonequilibrium states of groups of 5G-NewRadio mobile networks at different values of the intensity of interactions of electronic means, the cumulative nature of which is displayed by the normalized value of the signal/(interference+noise) ratio, is demonstrated. It is shown that the nonequilibrium state of the 5G-NewRadio mobile communication system occurs at a normalized value of the interaction intensity greater than 1.4. The article results show that with the help of the proposed mathematical model, which demonstrates the dynamics of multiple electromagnetic nonlinear interactions of electronic means of grouping at different parameters and the nature of the intensity of their interactions, it is possible to analyze the state of 5G-NewRadio network in the future.

Анотація – У роботі запропоновано динамічну модель множинних нелінійних електромагнітних взаємодій у разі спільного використання радіоресурсу в угрупованні радіоелектронних засобів мережі мобільного зв'язку 5G-NewRadio. Модель описує електромагнітну обстановку множинних нелінійних взаємодій угруповання радіоелектронних засобів у просторі станів на основі n -елементної складної системи, в якій враховано характер зв'язків і фазових станів з урахуванням інтенсивності взаємодії її елементів. Проведено аналіз фазових станів угруповання радіоелектронних засобів 5G-NewRadio залежно від інтенсивності нелінійних взаємодій її елементів, за яких мережа зможе функціонувати без погіршення якісних показників, в умовах оптимального розподілу радіоресурсу. Продемонстровано динаміку нерівноважних станів угруповань мобільних мереж 5G-NewRadio при різних значеннях інтенсивності взаємодій радіоелектронних засобів, сукупний характер яких відображається нормованим значенням відношення сигнал/(завада+шум). Показано, що нерівноважний стан системи мобільного зв'язку 5G-NewRadio настає при нормованому значенні інтенсивності взаємодій більше ніж 1,4. Результати статті показали, що за допомогою запропонованої математичної моделі, що демонструє динаміку множинних електромагнітних нелінійних взаємодій радіоелектронних засобів угруповання при різних їх параметрах та характеру інтенсивності їх взаємодій, є можливим проводити аналіз стану мережі 5G-NewRadio в майбутньому при чинному розподілі радіоресурсу.

Вступ

Сучасний розвиток засобів телекомунікацій йде шляхом інтенсивного створення нових радіозасобів, систем наземного та супутникового базування, що призводить до глобалізації та персоналізації зв'язку, і так само, його широкої інтеграції в усі сфери людського життя. За даними Міжнародного Союзу Електрозв'язку (International Telecommunication Union, ITU) вже в 2012 році Інтернетом користувався кожен третій житель Землі, а в 2019 році кількість підключених до інтернету людей зросла на 5,3 відсотка порівняно з 2018 роком. Згідно з дослідженням кількість користувачів інтернету зросла з 25,8% населення Землі у 2009 році до 53,6% у 2019-му [1]. За даними Організації Об'єднаних Націй у світі підключені до інтернету 4,1 мільярда

людей, та число користувачів неухильно зростає [2]. Для впровадження стандарту 5G Кабінет Міністрів України затвердив план використання радіочастотного ресурсу до 2025 року. Ці зміни дозволять користувачам отримувати більш стабільні та високі швидкості передачі інформації. Мережі мобільного зв'язку 5G покликані забезпечити зростаючі потреби в отриманні сучасних інформаційних послуг мобільними користувачами [1-9]. Стандарт мобільного зв'язку 5G відіграє ключову роль у перетворенні міст у розвинуті інфраструктурні центри, наповнені інтелектуальними властивостями, що дозволить громадянам і суспільству загалом отримати соціально-економічні вигоди, що надає передова цифрова економіка з інтенсивним використанням цифрових даних [10].

Технологія нового покоління 5G/IMT-2020, як і будь-яка нова технологія, привносить свої специфічні особливості в усі аспекти, що стосуються практики її застосування. Одним з таких особливо важливих аспектів є проблема забезпечення внутрішньосистемної та міжсистемної електромагнітної сумісності (ЕМС). На етапі підготовки до впровадження радіомереж технології 5G, названої NewRadio (NR), необхідно завчасно подбати про вжиття заходів щодо виконання умов ЕМС. Це можливо завдяки ретельному аналізу особливостей технології 5G та ефективній, точній і кількісній оцінці цих умов, що є запорукою успішного забезпечення електромагнітної сумісності радіозасобів нових мереж.

Створивши Регламент радіозв'язку, ІТУ з 1995 року став міжнародним координатором робіт з електровз'язку, спрямованих на створення глобального інформаційного суспільства, розділивши поверхню Землі на три регіони [11]. ІТУ організував певний порядок у частотному користуванні. Однак частотний ресурс належить всьому людству і активно використовується. Так, на цей час частотні діапазони нижче 5 ГГц є практично перевантаженими. Присвоєння радіочастот і радіочастотних каналів для радіоелектронних засобів у цих діапазонах здійснюється за технологіями частотно-територіального планування (ЧТП) радіозасобів [12-14]. Забезпечення їх радіочастотним ресурсом в умовах його дефіциту призводить до необхідності розробки та застосування нових методів призначення радіочастот, що зі свого боку вимагає якісного вирішення задачі ЕМС.

В умовах складної електромагнітної обстановки (ЕМО) в частотних діапазонах роботи сучасних систем мобільного зв'язку для якісного аналізу ЕМС необхідні апріорні данні про кількісні характеристики завад, що діють в радіоканалах мереж мобільного зв'язку, та необхідно володіти інформацією про їхні енергетичні, спектральні і статистичні характеристики. ЕМО також ускладнюється багатоприменовістю сигналів, неточністю характеристик діаграм спрямованості антен, випадковим переміщенням мобільних користувачів, а також різних об'єктів і людей.

Вибір конкретної моделі оцінки електромагнітних взаємодій в угрупованні радіоелектронних засобів (РЕЗ) визначається методом аналізу стану ЕМО, вимогами до його точності, властивостями і достовірністю апріорних даних. З метою вирішення питання про забезпечення електромагнітної сумісності в угрупованні РЕЗ необхідно

встановити характер взаємних завад і здійснити оцінку результатів цього впливу на якість функціонування досліджуваного РЕЗ у даному угрупованні.

Так, при множинному завадовому впливі в угрупованні РЕЗ систем мобільного зв'язку та при їх інтенсивній взаємодії настає нерівноважний стан системи, що призводить до втрати її стійкості. Такий стан може настати і за умов неоптимального розподілу частотного ресурсу. Тому є доцільним визначення граничних показників рівнів множинних впливів, за яких настає нерівноважний стан угруповання РЕЗ, у разі чого функціонування системи мобільного зв'язку стає неможливим за показниками якості.

Таким чином, з огляду на перспективу впровадження в недалекому майбутньому мереж мобільного зв'язку 5G актуальною науковою задачею, яка постає на даний час, є розробка аналітичної моделі взаємодій в угрупованні радіоелектронних засобів 5G під час спільного використання частотного ресурсу, що заснована на динамічній моделі складної n -елементної системи множинних взаємодій, в якій враховано характер міжелементних зв'язків і фазових станів. Використання такої моделі надасть можливості для ґрунтовного аналізу стану угруповання РЕЗ мобільних систем зв'язку 5G-NewRadio та в умовах нелінійних електромагнітних впливів розв'язувати завдання з оптимального розподілу частотного ресурсу угруповання.

I. Передумови створення динамічної моделі нелінійних електромагнітних взаємодій РЕЗ системи 5G-NewRadio

На Всесвітній конференції радіозв'язку WCR-15 для 5G-NewRadio були визначені нові діапазони радіочастот у ділянках сантиметрових і міліметрових хвиль [12]. Дані смуги частот розміщені в трьох ділянках радіочастотного спектру: нижче 1 ГГц, від 1 ГГц до 6 ГГц і вище 6 ГГц (до 100 ГГц) [6, 9, 12].

Головними особливостями цього спектру з точки зору ЕМС можна виділити такі:

- можливість використання широкої безперервної смуги каналу (загалом до 1-2 ГГц);
- малі зони обслуговування (дальність випромінювання) в малих (Small) і ультра-малих (UltraSmall) стільниках;
- можливість використання малогабаритних багатоеlementних антен (Massive MIMO) з вузькими променями (3D MIMO) як в базових станціях, так і в абонентських пристроях;
- різний характер втрат при поширенні сигналу, зокрема значний вплив на рівень втрат додаткових, раніше невідомих у мобільному зв'язку факторів [15-18].

У 5G-NewRadio використовуються OFDM-піднесівні з різною шириною спектру: 15 кГц, 30 кГц, 60 кГц, 120 кГц і 240 кГц, як показано у табл. 1 [19]. Використання різних нумерологій відкриває широкі можливості для гнучкого налаштування поведінки мережі 5G-NewRadio під час надання тих чи інших послуг. Так, наприклад, для додатків, критичних до рівня затримок, доречно

використовувати піднесівні з широким спектром при меншій тривалості символу, і навпаки, при передачі трафіку широкосмугового доступу в Інтернет і трафіку Інтернету речей – використовувати "вузькі" піднесівні [20].

Таблиця 1. Нумерологія стандарту 5G

u (нумерологія)	Ширина спектру OFDM каналу $\Delta F=2^u \cdot 15$ [кГц]	Циклічний префікс
0	15 (відповідає LTE)	Normal
1	30	Normal
2	60	Normal, Extended
3	120	Normal
4	240	Normal

У 5G-NewRadio передача даних у висхідному (Uplink, UL) і низхідному (Downlink, DL) напрямках організовується на основі фреймів тривалістю $T_f = 10$ мс. Кожен фрейм ділиться на 10 субфреймів, тривалістю $T_{sf} = 1$ мс кожен. Також кожен субфрейм ділиться на два напівфрейма (half-frame 0 і half-frame 1). Кожен субфрейм ділиться на слоти, кількість яких визначається шириною спектра і становить 1, 2, 4, 8 або 16 (на відміну від мереж LTE-FDD, де використовується єдина структура з двома слотами на кожен субфрейм) [21].

У 5G-NewRadio кількість OFDM-символів, що припадають на один слот, не залежить від нумерології і за аналогією з мережами 4G-LTE визначається тільки типом циклічного префіксу: 14 символів для нормального і 12 для розширеного префіксу. На рис. 1 приведено діаграму OFDM-символів на сітці координат "частота" – "час" [22, 23].

За аналогією з 4G-LTE одиницею частотно-часового ресурсу в мережах 5G-NewRadio є ресурсний блок (Resource Block, RB). Кожному абонентському терміналу на певний період часу для прийому/передачі даних виділяється планувальником системи певна кількість ресурсних блоків. Кожен ресурсний блок у частотній області містить 12 суміжних піднесівних частот. Ширина смуги частот одного ресурсного блоку залежить від використовуваної нумерології, і в межах одного радіоканалу може використовуватися кілька нумерологій [22].

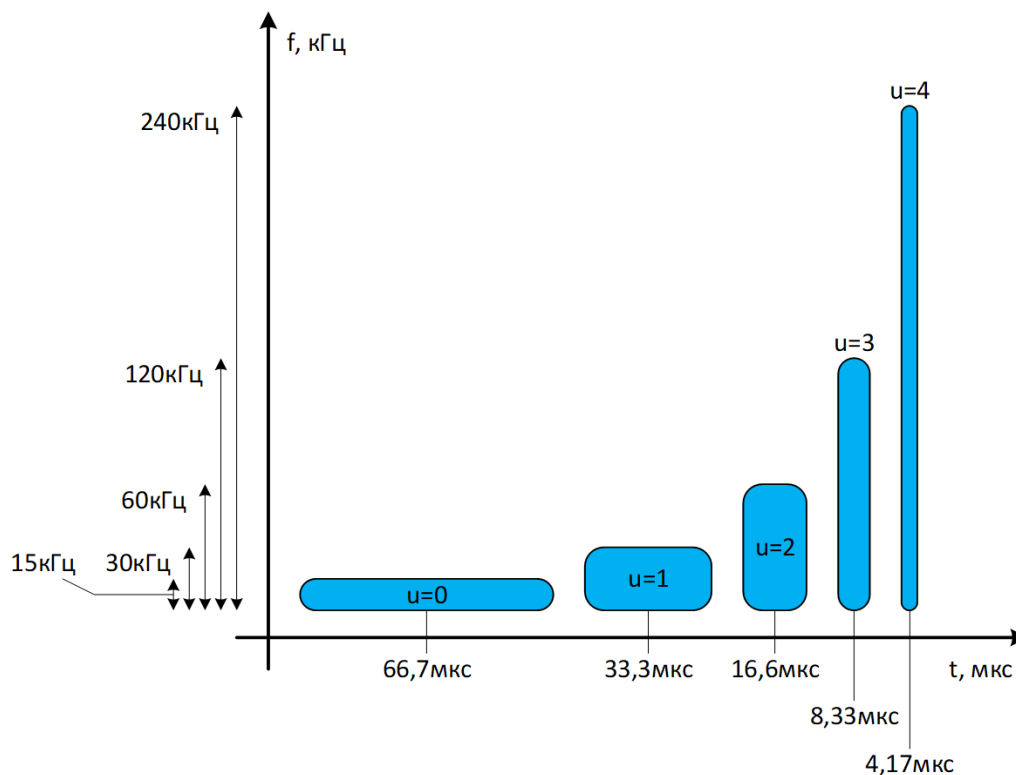


Рис. 1. Діаграма OFDM-символів на сітці координат "частота" – "час"

Призначення частотно-часових блоків для передачі сигналів абонентської станції (АС) відбувається в результаті процедури планування (розподілу) фізичних ресурсів, яка полягає у виділенні базовою станцією (БС) піднесівних кожного доступного частотно-часового блоку абонентській станції, для яких досягається найбільше значення деякої метрики (цільової функції) в даній групі піднесівних. Такою метрикою може виступати значення відношення потужності сигналу до потужності завад і шуму (ВСЗШ) у каналі для i -ї АС, відношення миттєвої швидкості передачі даних i -ї АС до середньої пропускну здатності, що розраховане для деякого часового інтервалу.

Для підвищення спектральної ефективності системи зв'язку 5G-NewRadio з MIMO-OFDMA один і той самий частотно-часовий блок може використовуватися для обслуговування декількох АС. У цьому разі між сигналами АС з'являються взаємні завади.

В даному випадку диспетчер контролює для кожного моменту часу, яким саме АС потрібно виділити частини спільно використовуваного ресурсу, і визначає швидкість передачі даних, яка повинна застосовуватися для кожної АС. Диспетчер визначає продуктивність всієї мережі, особливо в умовах перевантажень. Як низхідна, так і висхідна лінії зв'язку 5G-NewRadio піддаються щільному (компактному) плануванню [24]. Диспетчер для кожного часового моменту і частотної області вибирає АС з найкращими параметрами стану каналу.

Аналіз електромагнітних взаємодій РЕЗ угруповання 5G-NewRadio і умов ЕМС можна представити у вигляді теоретико-ігрової моделі. Гра – математична модель колективної поведінки, в якій кілька учасників впливають на ситуацію, причому їх інтереси (виграші або втрати при різних можливих ситуаціях) відрізняються. У разі такої постановки завдання у динамічній взаємодії РЕЗ можливі три характерні стратегії поведінки. У застосуванні до процесу електромагнітних взаємодій між РЕЗ 5G-NewRadio ці стратегії можуть бути класифіковані в такий спосіб:

1. Антагоністична стратегія – учасники мають протилежні інтереси. Вона може бути застосована у разі навмисного створення завад. Ця стратегія не характерна для проблематики ЕМС.

2. Кооперативна стратегія, коли у всіх гравців є спільна мета, а їхні стратегії узгоджені. Дана стратегія найбільш сприятлива в складній сигнально-завадовій обстановці, оскільки вона передбачає наявність керованих елементів, що формують ЕМО, тобто управління всією системою загалом.

3. Стратегія байдужості або гра з природою, коли стратегія i -го гравця не залежить від стратегії j -го гравця. Дана стратегія – пошук вільного ресурсу, вона характерна при децентралізованих методах управління елементами зв'язку.

Відомі й інші типи стратегій, які використовуються в задачах ЕМС: прозорі або комбіновані. Гра в прозорих стратегіях припускає детерміністський підхід, і, як випливає з теорії ігор, рідко коли приводить до рівноважних рішень. На противагу цьому, для ігор у комбінованих стратегіях у разі стохастичного підходу коло рівноважних рішень значно розширюється.

Розв'язання задачі колективом гравців зводиться до вибору стратегії і до задачі багатокритеріальної оптимізації. За умови невеликих відхилень в інформації щодо апріорних даних про поведінку системи можна представити модель взаємодій і фазових станів угруповання елементів, які випромінюють.

II. Аналітична модель електромагнітних взаємодій угруповання РЕЗ 5G-NewRadio

В угрупованні радіоелектронних засобів основні параметри самих засобів $\vec{x}(t)$ зазвичай відомі, детерміновані. Макростан всього угруповання випадковий. Це пояснюється впливом множини невизначених, випадкових умов, сформованих характеристиками поширення радіохвиль (ПРХ). У результаті випадкових взаємодій $x_{ij}(t)$, $i, j = 1, n, i \neq j$, де n – число РЕЗ, у самих параметрах РЕЗ відбуваються зміни. В угрупованні РЕЗ є відповідні динамічні взаємодії, які проявляються в результаті вимірів і спостережень і характеризуються вектором $\vec{y}(t)$.

Спостережливість угруповання забезпечується можливістю отримання статистики кожної з компонент вектору стану $\vec{x}(t) = [x_1, x_2, \dots, x_n]$. Якщо спостереження або вимір виконується достатньо точно, без помилок, то детермінованою моделлю спостереження є рівняння:

$$y(t) = Hx(t), \quad (1)$$

де H – коефіцієнт підсилення (послаблення) при вимірі $x(t)$.

За наявності шумів або похибок вимірювання $v(t)$ у каналі спостереження рівняння стає стохастичним

$$y(t) = Hx(t) + v(t). \quad (2)$$

Рівняння спостереження при $H = 1$ представляє собою значення вимірюваного виявленого сигналу $x(t)$ на тлі шуму $v(t)$:

$$y(t) = x(t) + v(t). \quad (3)$$

В реальних умовах спостереження $\bar{y}(t)$ – вибірка з результатів вимірювань:

$$\bar{y}(t) = [y_1, y_2, \dots, y_n]. \quad (4)$$

Значення $\bar{y}(t)$ у рівнянні не можуть бути безпосередньо використані для управління. При стохастичному рівнянні спостереження $\bar{y}(t)$ носить випадковий характер, а для його використання в алгоритмі управління необхідна оцінка стану $\hat{x}(t)$.

У загальному випадку динаміка цих змін описується рівнянням

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = f[\bar{x}(t), \bar{y}(t)]. \quad (5)$$

Модель власного стану угруповання РЕЗ (системи), коли потрібна корекція параметрів, режимів окремих її елементів або структури, може описуватись лінійним диференціальним рівнянням:

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = F(t)\bar{x}(t) + B(t)\bar{u}(t) + G(t)\bar{\xi}(t), \quad (6)$$

де $\bar{x}(t)$ – вектор станів, $F(t)$ – матриця станів, $\bar{u}(t)$ – вектор управління, $B(t)$ – матриця управління, $\bar{\xi}(t)$ – випадкові впливи, $G(t)$ – матриця випадкових вхідних впливів.

Очевидно, що модель спостереження (2) не залежить від моделі динаміки системи (5). Тому процедури адаптації стану системи і спостереження можуть функціонувати незалежно.

Успішність вирішення завдання електромагнітної сумісності даного угруповання залежить від наявних ресурсів $g_m = g_m(\bar{x}(t), t)$, $m \in \overline{1, M}$, а також від апріорних імовірностей розподілу $p_i, i \in \overline{1, n}$ і параметрів c_{ijm} , що визначають характеристики електромагнітних взаємодій між i -м та j -м РЕЗ і m -м ресурсом.

Наявні ресурси g_m визначаються сумою частотно-територіальних, часових, поляризаційних, енергетичних та інших параметрів РЕЗ і лінії зв'язку. Їх можна представити у вигляді:

$$g_m(\vec{x}(t), t) = \sum_{i,j=1}^n c_{ijm} s_{ij}, \quad (7)$$

де $s_{ij}(t)$ – коефіцієнт електромагнітних взаємодій.

У системі угруповання РЕЗ в процесі її функціонування реалізується відповідний перерозподіл ресурсів $\vec{y}(t)$, який визначається моделями стаціонарних станів, що описуються задачами максимізації ентропії системи [25]:

$$H(y) = \sum_{i=1}^n p_i \ln \frac{y_i}{p_i} \rightarrow \max \quad (8)$$

при відповідних обмеженнях на ресурси.

Динаміка стану розподільного процесу визначається рішенням $\vec{y}(t)$ задачі (2), яке, як впливає з (7) і (8), залежить від її параметрів p_i , c_{ijm} і g_m .

Таким чином, модель динаміки нерівноважних станів системи 5G-NewRadio набуває такого вигляду:

$$\vec{y}(\vec{x}(t), t) = \arg \max [H(y) | g_m(\vec{x}(t), t)]. \quad (9)$$

Розглянемо структурну схему макросистеми, утворену угрупованням РЕЗ. Електромагнітні взаємодії $s_{ij}(t)$ відбуваються між елементами антенної решітки $x_i(t)$ і $x_j(t)$, відповідно: джерелами і рецепторами. Зв'язки взаємодій між елементами мережі визначаються матрицями $C_m = [c_{ijm}; i, j \in \overline{1, n}]$, які складаються з нулів та одиниць, що визначають наявність або відсутність такого зв'язку.

Очевидно, в такій нерівноважній системі визначаються два основних процеси (потіку): відновлення та розподілу. Такий процес спостерігається в системах мобільного зв'язку, коли абонентські станції споживають і звільняють ресурс базових станцій, тобто відбувається розподіл і відновлення ресурсу 5G-NewRadio.

Позначимо через $\Phi[\vec{x}(t), Y(t)]$ потік відновлення і через $Q[\vec{x}(t), Y(t)]$ потік розподілу. Ці потоки залежать від стану процесу відновлення $\vec{x}(t)$ і стану процесу розподілу $Y(t)$. У межах припущень про те, що час відновлення набагато більше часу розподілу [20], можна записати наступну, в загальному випадку нелінійну систему рівнянь:

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \Phi[\vec{x}(t), Y(\vec{x}(t), t)], \quad (10)$$

$$\varepsilon \frac{dY(t)}{dt} = Q[\vec{x}(t), Y(\vec{x}(t), t)], \quad (11)$$

де ε – матриця малих параметрів, що визначає інтенсивність радіоелектронних взаємодій у даній системі.

З цих рівнянь видно, що координати $\vec{x}(t)$ змінюються значно повільніше, ніж $Y(t)$. Формування моделі виду (2) для розподільчого процесу з обмеженнями та різнотипними ресурсами поки залишається невирішеною задачею [9-11]. Таку модель вдалося побудувати лише для тих випадків, коли динаміка розподільного процесу є марківською. Можна припустити, що динаміка розподільного процесу дійсно є марківською [9-11], оскільки немає значення, коли і як макросистема перейшла до поточного стану, а істотно лише те, яку частку ресурсу система 5G-NewRadio (частотного, поляризаційного, часового або просторового) використовує на даний момент часу.

Для проведення аналізу динаміки стану угруповання РЕЗ 5G-NewRadio необхідно описати структуру ресурсів та їхній розподіл між елементами мережі. Будемо розглядати угруповання мереж, які складаються з множини передавачів і приймачів. Всі вони є споживачами ресурсу.

Якщо споживачі ресурсу складаються з n типів з чисельністю Y_i , то кількість ресурсу B є функцією чисельності типів $B = B(Y_1, \dots, Y_n)$. За відсутності споживачів ($Y_1 = \dots = Y_n = 0$) маємо максимальний ресурс $B(0)$. За умови дуже великої кількості РЕЗ ($Y_1 \rightarrow \infty, \dots, Y_n \rightarrow \infty$) доступний ресурс прагне до нуля $B(\infty) = 0$.

Для цього розподільчого процесу можна вказати деяку апріорну характеристику. Наприклад, для кожного типу РЕЗ зазвичай відома нормативна кількість ресурсу a_i . Тоді

$$p_i = \frac{a_i Y_i}{\sum_{i=1}^n a_i Y_i}; \quad 0 \leq p_i \leq 1; \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (12)$$

Отже, процес випадкового розподілу ресурсу за типами РЕЗ еквівалентний випадковому та незалежному розподілу m каналів по n РЕЗ з апріорною ймовірністю розподілу $P = \{p_1, \dots, p_n\}$.

Тоді вираз (11) можна представити у вигляді

$$\frac{dY}{dt} = \varepsilon_i Y_i + a_i p_i, \quad i \in \overline{1, n}. \quad (13)$$

Підставивши вираз (12) у (13), отримаємо нелінійну систему Вольтерра розподілу частотного ресурсу в угрупованні РЕЗ:

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = p_i y_i(t) \left(\varepsilon_i - \sum_{s=1}^n p_s y_s - \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^n p_s y_s p_j y_j \right). \quad (14)$$

Перетворимо даний диференціальний вираз до вигляду:

$$\frac{dy_i(t_{k+1}) - dy_i(t_k)}{t_{k+1} - t_k} = p_i y_i(t_k) \left(\varepsilon_i - \sum_{s=1}^n p_s y_s(t_k) - \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^n p_s y_s(t_k) p_j y_j(t_k) \right), \quad (15)$$

де t_k – дискретний час; $t_{k+1} - t_k = T_d$ – інтервал дискретизації (час надання частотного ресурсу щодо часу спостереження). В дискретному часі з (15) отримуємо різницеве рівняння:

$$y_i(k+1) = T_d y_i(k) + T_d [p_i y_i(k) (\varepsilon_i - \sum_{s=1}^n p_s y_s(k) - \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^n p_s y_s(k) p_j y_j(k))]. \quad (16)$$

Дана модель дозволяє виконувати аналіз з різними параметрами елементів мережі та їх електромагнітними взаємодіями.

III. Результати експерименту та обговорення результатів дослідження

Як приклад розглянемо динаміку нерівноважних станів угруповань РЕЗ двох мереж 5G-NewRadio ($n = 2$) при різних значеннях ε , що враховують інтенсивність взаємодій РЕЗ. У показник інтенсивності взаємодії може входити відношення допустимого ВСЗШ до реального, ступінь споживання радіоресурсу одним типом РЕЗ, зростання чисельності РЕЗ, адаптованість мережі до сигнально-завадової обстановки тощо, а визначення даного показника є завданням багатокритеріальної оптимізації.

Як інтенсивність взаємодій виберемо такий параметр оцінки ЕМС мереж, як відношення допустимого ВСЗШ до реального ВСЗШ на РЕЗ мереж $\varepsilon = h_{\text{дон}}^2 / h^2$. ВСЗШ визначається відношенням потужності корисного сигналу до суми потужностей завад. Під сумою потужностей завад мається на увазі загальний шумовий фон, що надходить від РЕЗ сторонніх мереж, які заважають.

На рис. 2 представлені залежності взаємодії (взаємного впливу) Y_i двох мереж при низьких інтенсивностях взаємодій ($\varepsilon \ll 1$), тобто передбачається, що реальне ВСЗШ набагато більше допустимого. Номери кривих відповідають номеру мережі.

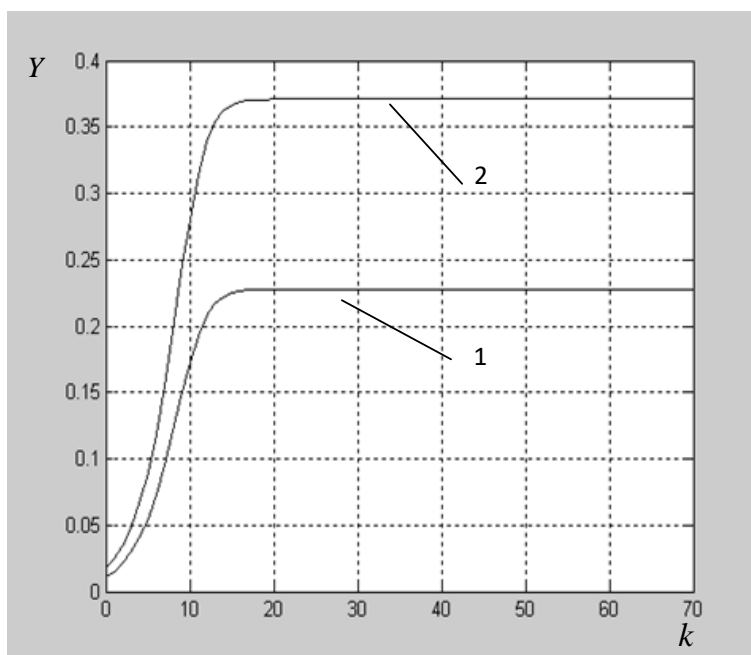


Рис. 2. Залежність споживаної частки частотного ресурсу Y двох мереж 5G-NewRadio при слабкій інтенсивності взаємодій РЕЗ ($\varepsilon \ll 1$)

Як видно з рис. 2 при малих, але різних значеннях ε ($\varepsilon_1 < \varepsilon_2$) залежність впливу між РЕЗ двох мереж практично лінійно зростає в часі, та при подальшому збільшенні кроку моделювання k зростання припиняється. Фізичний сенс даної нерівності полягає в тому, що друга мережа створює більший за потужністю загальний шумовий фон у порівнянні з першою мережею. Тому вплив $Y_1 < Y_2$.

При середніх значеннях $\varepsilon \approx 1$ (рис. 3) спостерігаються дві характерні області. Початкова область, де відзначається різке збільшення взаємодій і стаціонарна – нерівноважна частина з подальшими помітними коливаннями в часі, що пов'язано з перерозподілом і обмеженням наявного ресурсу.

Проаналізовано також випадок роботи мережі 5G-NewRadio при значній інтенсивності взаємодій: $\varepsilon = 1 \div 3$ (рис. 4), за яких система набуває позамежний насичений стан.

Отримані результати свідчать про те, що при значеннях інтенсивності ($\varepsilon = 1 \div 3$) динаміка взаємодій РЕЗ стає непередбачуваною: може відбуватися як різке збільшення взаємодій, так і різке зниження, характерне для тих ситуацій, які виникають у мережі. Наприклад, при різкому збільшенні щільності розміщення користувачів у зоні обслуговування базової станції мобільної мережі.

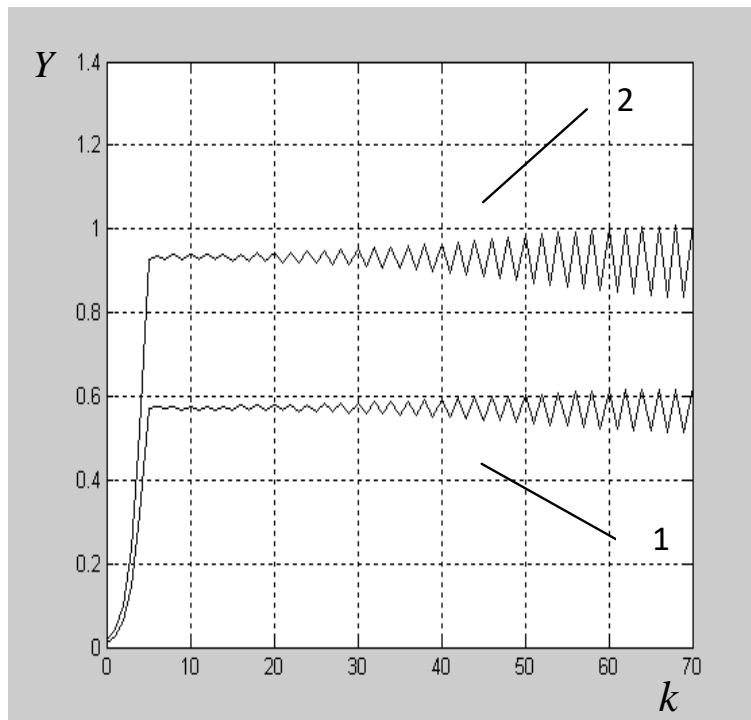


Рис. 3. Залежність споживаної частки частотного ресурсу Y двох мереж 5G-NewRadio при середній інтенсивності взаємодій РЕЗ ($\varepsilon \approx 1$)

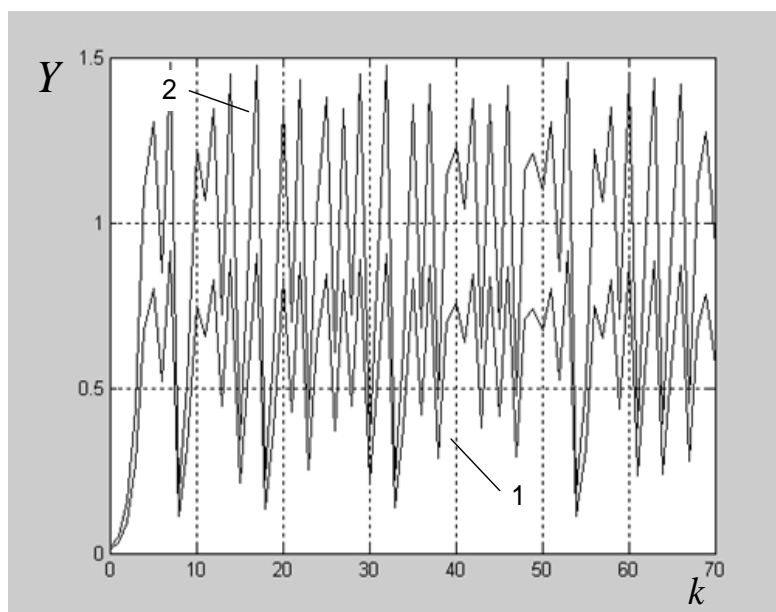


Рис. 4. Залежність споживаної частки частотного ресурсу Y при значній інтенсивності взаємодій РЕЗ ($\varepsilon = 1 \div 3$)

На рис. 5 представлено фазовий портрет взаємодії угруповань мереж, побудований в координатах $\{\bar{Y}, \bar{\varepsilon}\}$. З даного графіка випливає, що в області $\varepsilon \geq 1,4$ спостерігаються зміни стану системи, які можуть виявитися значними та неоднозначними у разі незначних змін інтенсивностей взаємодії, і настає роздвоєння траєкторій (біфуркація стану).

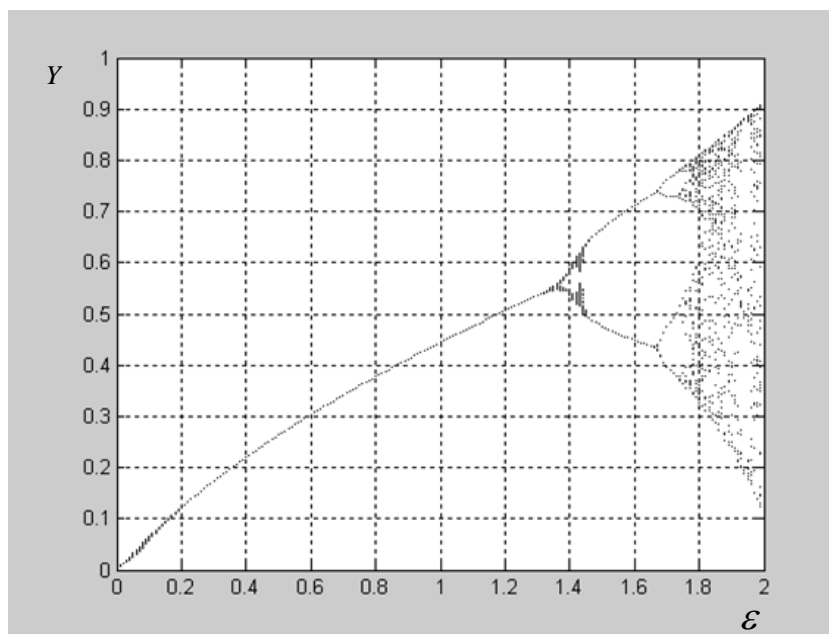


Рис. 5. Фазовий портрет залежності споживаної частки частотного ресурсу Y від інтенсивності взаємодій РЕЗ ($\varepsilon = 1 \div 3$)

Такий стан у теорії управління трактується як нестійкий [25]. Аналогічна нестійка поведінка може наступити і в системі (1), коли при додаванні незначної кількості РЕЗ в угруповання мереж рівноважний стан порушується.

Близькі умови за нерівноважним станом можуть виникати і в інших системах зв'язку, з якими взаємодіють мобільні системи зв'язку. Наприклад, у системах абонентського радіодоступу сімейства стандартів IEEE 802.11 виникають «вибухи фрагментів» через нераціональний вибір параметрів, що призводить до перевантаження мережі повторними передачами фрагментів.

Висновки

1. Побудована аналітична модель електромагнітної обстановки угруповання радіоелектронних засобів мережі 5G-NewRadio на основі математичної моделі Вольтерра (14), що відображає нелінійний характер взаємодій елементів мережі під час спільного використання частотного ресурсу. В роботі отримано рекурентний вираз для моделювання оцінки сукупного характеру електромагнітних взаємодій в угрупованні радіоелектронних засобів (16).

2. Проведено моделювання динаміки взаємодії та фазових станів угруповання радіоелектронних засобів під час спільного використання радіоресурсу мережі 5G-NewRadio і показано, що за допомогою рекурентного виразу (16) можна аналізувати її стан в майбутньому при різних параметрах і типах РЕЗ, характері та інтенсивності їх взаємодій в угрупованні.

3. Розглянута динаміка нерівноважних станів угруповань РЕЗ двох мереж 5G-NewRadio при різних значеннях інтенсивності взаємодій їх елементів. Аналіз показав, що угруповання РЕЗ мобільних систем зв'язку зможуть функціонувати без погіршення якісних показників при значеннях показника інтенсивності взаємодій $\varepsilon \leq 1,4$.

4. Результати дослідження дозволяють сформулювати рекомендації в процесі проектування, частотно-територіального планування та експлуатації мереж 5G-NewRadio. З'являється можливість визначення рівноважних станів і стійкості динамічних взаємодіючих угруповань мереж 5G-NewRadio за умови тих чи інших значень інтенсивності взаємодій.

Список літератури

1. Федоров, М., "Мінцифри ініціювало вивільнення частот для впровадження 5G", Урядовий портал, С.1. Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/news/mincifri-iniciyuvolo-vivilnennya-chastot-dlya-vprovadzhennya-5g-mihajlo-fedorov> (ост. відв. 19.11.2020)
2. Сотовая (мобильная) связь (мировой рынок) (2017). Режим доступу: <https://www.tadviser.ru/a/113994> (ост. відв. 20.12.2020)
3. 3GPP TS 28.554. Management and orchestration; 5G end to end Key Performance Indicators (KPI). Ver. 2.0.0, release 15, Sep 2018, available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/128500_128599/128554/15.02.00_60/ts_128554v150200p.pdf (ост. відв. 20.11.2020)
4. 5G PPP Architecture Working Group white paper, "View on 5G Architecture," Version 3.0, February 2020, available at: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2020/02/5G-PPP-5G-Architecture-White-Paper_final.pdf (ост. відв. 25.02.2020)
5. *Abuarqoub, A. Abuarqoub, A., Hammoudeh, M. H.* (2016), "Behaviour Profiling in Healthcare Applications Using the Internet of Things Technology", Proceedings of the Fourth International Conference on Advances in Information Processing and Communication Technology, Rome, Italy, 18-19 August 2016, P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-099-6-25>
6. *Agiwal, M., Roy, A., Saxena, N.* (2016), "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey", IEEE Communications Surveys & Tutorials, No. 18(3), P. 1617-1655. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>
7. *Aijaz, A., Dohler, M., Aghvami, A. H., Friderikos, V., Frodigh, M.* (2017), "Realizing the Tactile Internet: Haptic Communications over Next Generation 5G Cellular Networks", IEEE Wireless Comm, No. 24(2), P.82-89. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500157RP>
8. *Aijaz, A., Simsek, M., Dohler, M., Fettweis, G.* (2017), "Shaping 5G for the Tactile Internet", 5G Mobile Communications, Springer International Publishing, P. 677-691. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5_25

9. Aijaz, A. (2016), "Towards 5G-enabled tactile internet: Radio resource allocation for haptic communications", Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Doha, Qatar, 3-6 April 2016, P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7564661>
10. Raza, U., Kulkarni, P., Sooriyabandara, M. (2017), "Low Power Wide Area Networks: An Overview", IEEE Communications Surveys & Tutorials, No. 19, P. 855-873. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
11. Radio Regulations Articles, International Telecommunication Union, available at: <https://www.itu.int/en/myitu/Publications/2020/09/02/14/23/Radio-Regulations-2020> (ост. відв. 20.12.2020)
12. Resolution COM 6/20 (WRC-15) (2015), Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion(s) of the frequency range between 24.25 and 86 GHz for the future development of International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond, available at: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.12-2015-PDF-E.pdf (ост. відв. 20.12.2020)
13. Mokrov, E., Ponomarenko-Timofeev, A., Gudkova, I., Masek, P., Hosek, J., Andreev, S., Koucheryavy, Y., Gaidamaka, Y. (2018), "Modeling Transmit Power Reduction for a Typical Cell with Licensed Shared Access Capabilities", IEEE Transactions on Vehicular Technology, No. 67(6), P. 5505-5509. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2799141>
14. Markova, E., Gudkova, I., Ometov, A., Dzantiev, I., Andreev, S., Koucheryavy, Y., Samouylov, K. (2017), "Flexible Spectrum Management in a Smart City within Licensed Shared Access Framework", IEEE Access, No. 5, P. 22252-22261. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2758840>
15. Talwar, S., Choudhury, D., Dimou, K., Aryafar, E., Bangerter, B., Stewart, K. (2014), "Enabling technologies and architectures for 5G wireless", Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), IEEE, Tampa, FL, USA, 1-6 June 2014, P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2014.6848639>
16. Kurakova, T., Valdburger, M. (2013), "How ITU can help develop future networks", ITU News, No. 1, P. 38-41.
17. Galinina, O., Andreev, S., Komarov, M., Maltseva, S. (2017), "Leveraging heterogeneous device connectivity in a converged 5G-IoT ecosystem, Computer Networks, No. 128, P. 123-132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.04.051>
18. Кременецька, Я. А., Марков, С. Ю., Градобоева, Н. В., Харченко, Є. М. (2019), "Аналіз обмежуючих та компенсуючих факторів при розрахунку енергетичної ефективності радіосистем в міліметровому діапазоні", Телекомунікаційні та інформаційні технології, No. 1, С. 12-21. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2019.011221>
19. 3GPP TS 38.104. NR, "Base Station (BS) radio transmission and reception", European Telecommunications Standards Institute, 3GPP TS 38.104 version 15.5.0 Release 15, available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/15.05.00_60/ts_138104v150500p.pdf (ост. відв. 20.12.2020)
20. 3GPP TS 38.211. NR, "Physical channels and modulation", European Telecommunications Standards Institute, 3GPP TS 38.211 version 15.2.0 Release 15, available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/15.02.00_60/ts_138211v150200p.pdf (ост. відв. 20.12.2020)

21. 3GPP TS 38.212. NR, "Multiplexing and channel coding", European Telecommunications Standards Institute, (3GPP TS 38.212 version 15.2.0 Release 15, available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138212/15.02.00_60/ts_138212v150200p.pdf) (ост. відв. 20.12.2020)
22. 3GPP TS 38.213. NR, "Physical layer procedures for control", European Telecommunications Standards Institute, (3GPP TS 38.213 version 15.3.0 Release 15, available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138213/15.03.00_60/ts_138213v150300p.pdf) (ост. відв. 20.12.2020)
23. 3GPP TS 38.300. NR, "NR and NG-RAN Overall Description, Stage 2", European Telecommunications Standards Institute, (3GPP TS 38.300 version 16.2.0 Release 16, available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138300/16.02.00_60/ts_138300v160200p.pdf) (ост. відв. 20.12.2020)
24. Yan, M., Feng, G., Zhou, J., Sun, Y., Liang, Y. C. (2019), "Intelligent Resource Scheduling for 5G Radio Access Network Slicing", IEEE Transactions on Vehicular Technology, No. 68(8), P. 7691-7703. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2922668>
25. Коляденко, Ю. Ю., Глушко А. П., Воронин А. И. (2018), "Математическая модель атак и защит в программно-конфигурируемых сетях связи", Проблемы телекомунікацій, No. 1(22), С. 56-66. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2018.1.04>