

ELECTRODYNAMICS, RADIO WAVES PROPAGATION

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА, ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

УДК 621.396.677.494

DOI:10.30837/rt.2022.2.209.17

*А.І. КОВАЛЕНКО, канд. техн. наук, С.В. ТИТОВ, канд. техн. наук,
О.В. ТИТОВА, канд. техн. наук, О.С. ЧОРНА, канд. техн. наук*

ОЦІНКА ВИМОГ ДО ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ ПРИ V-ПОДІБНОМУ РОЗПОДІЛІ ЧАСТОТ У МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВИПРОМІНЮВАЧІВ

Вступ

Подальший розвиток ефективних радіотехнічних систем різного призначення, наприклад: засобів локації ближньої дії, спеціальних систем зв'язку між об'єктами в заданих локальних областях простору, систем передачі енергії НВЧ-променем та формування в локальній області простору високої щільності електромагнітної енергії – стало можливим завдяки використанню фокусування електромагнітного випромінювання [1 – 5].

При цьому найбільші можливості та гнучкість управління параметрами сфокусованого електромагнітного випромінювання (ЕМВ) забезпечуються за допомогою різних систем випромінювачів, наприклад, багатопозиційної системи випромінювачів (БСВ). Як відомо, можливі різні способи управління фокусуванням ЕМВ, класифікація яких дана у [6, 14]. Аналіз різних методів управління просторовим розподілом струмів по апертурі БСВ для формування просторово-часових імпульсів (ПЧІ) у заданій точці спостереження, проведений у [5, 6], показав, що найбільш ефективні методи фокусування ЕМВ на основі взаємоузгодженого просторово-фазово-частотного (ПФЧ) та просторово-фазово-частотно-часового управління. А для локалізації ЕМВ у заданому кутовому напрямку без сканування доцільно використовувати методи фокусування на основі ПФЧ-управління з використанням V-подібного закону розподілу частот за апертурою БСВ.

Однак флуктуації параметрів сигналів і антен, що виникають через різні випадкові фактори, обмежують їх потенційні можливості і можуть призвести до істотних змін сфокусованих просторово-часових імпульсів, зниження їх пікової потужності. У зв'язку з цим викликає інтерес вивчення та обґрунтування вимог до параметрів сигналів, що випромінюються, при використанні різних методів фокусування ЕМВ.

Ціль статті – статистичне дослідження впливу різних випадкових та детермінованих змін електричних та конструктивних параметрів антен, систем управління сигналами, що випромінюються, при V-подібному розподілі частот по апертурі БСВ на рівень пікової потужності, тривалість та період повторення сфокусованих імпульсів.

Основні припущення

Як було показано в [6], для формування послідовності сфокусованих ПЧІ необхідно встановити закон розподілу амплітуд, початкових фаз і частот сигналів по апертурі БСВ. При цьому повинні підтримуватись умови синфазного складання полів від усіх випромінюючих елементів у вибраній точці фокусування. Параметри закону ПФЧ управління повинні бути стабільними протягом часу, рівного усередненій тривалості імпульсів на виході випромінювачів при формуванні одиночного ПЧІ, а при формуванні послідовності імпульсів – протягом тривалості цієї пачки ПЧІ. Це накладає певні вимоги до точності та стабільності параметрів закону ПФЧ управління сигналами. Тому виникає необхідність дослідження впливу різноманітних відхилень від заданих значень параметрів закону ПФЧ управління сигналами, що випромінюються, в каналах БСВ при формуванні послідовностей ПЧІ. При цьому необхідно досліджувати також вплив помилок в установці заданої дискретності початкової фази та частоти на характеристики ПЧІ, що формуються.

Вплив типових помилок виготовлення традиційних антен та елементів антенно-фідерного тракту на характеристики поля випромінювання досить добре розглянуто у [1, 8, 9]. Тому розглянемо лише особливості вимог до точності розташування фазових центрів випромінювачів та вимоги до дискретності та точності установки початкових фаз та несучих частот по апертурі БСВ, специфічні для ПФЧ фокусування на основі V-подібних розподілів частот.

Статистичні параметри законів ПФЧ управління фокусуванням ЕМВ (вид закону розподілу помилок, дисперсії та радіуси кореляції помилок) є вихідними величинами щодо статистики поля випромінювання. Однак через велику кількість елементів у каналах випромінювання, видів та джерел нестабільностей досить складно визначити вид закону розподілу помилок параметрів сигналів у кожному каналі БСВ. Враховуючи конструктивну незалежність каналів випромінювання та нехтуючи їх взаємним впливом, надалі припускати, що помилки встановлення параметрів сигналів у каналах БСВ некорельовані та рівноймовірні. Як відомо [10, 11], у разі, коли немає можливості встановити закон розподілу, доцільно прийняти закон рівної ймовірності. Можна показати, що в цьому випадку помилка за рахунок відхилення дійсного закону від обраного закону рівної ймовірності, у гіршому випадку, не перевищить $\pm 20\%$ значення сумарної похибки (якщо розглянута похибка домінує). У першому наближенні це можна пояснити тим, що закон рівної ймовірності займає проміжне положення між модальними та антимодальними законами розподілу.

Розглянемо вплив зазначених нестабільностей на рівень пікової потужності, тривалість та період повторення ПЧІ. Проведемо оцінку максимальних значень помилок параметрів законів ПФЧ управління сигналами, у яких зазначені характеристики сфокусованих ПЧІ змінюються лише на 10 %.

Вимоги до точності розташування фазових центрів випромінювачів

Аналіз виразів для розрахунку щільності потоку потужності, яка створюється багатопозиційною системою випромінювачів у заданій точці простору [5 – 7], показує, що якість фокусування ПЧІ залежить від рівня забезпечення заданих координат фазових центрів джерел випромінювання. Однак при створенні конкретних зразків багатопозиційних радіотехнічних систем можливі помилки у забезпеченні вибраних координат і закони зміни миттєвих фаз не відповідатимуть вимогам когерентного складання сигналів випромінювачів у заданій точці простору $P(x_F, y_F, z_F)$. Тому процес формування послідовності сфокусованих ПЧІ може бути порушений. Для обґрунтування вимог до точності розташування фазових центрів випромінювачів у багатопозиційній системі проведемо математичне моделювання поля випромінювання при використанні V-подібних законів розподілу частот за наявності зазначених помилок.

Вплив помилок розташування фазових центрів окремих джерел випромінювання на нормовану щільність потоку потужності БСВ можна оцінити за виразом

$$\langle S(x, y, z, t) \rangle = \left\langle \frac{1}{S_{\max}} \left| \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \sqrt{\frac{P_n G_n}{4\pi R_n^2}} \exp \left\{ -j \left[2\pi f_{0n} \left(t - \frac{R_n^\Delta}{c} \right) + \varphi_{0n} \right] \right\} \right|^2 \right\rangle; \quad (1)$$

де P_n і G_n – потужність випромінювання та коефіцієнт посилення окремого джерела випромінювання; S_{\max} – максимальне значення щільності потоку потужності БСВ.

Відстань до точки спостереження від кожного джерела випромінювання з урахуванням помилок розташування фазових центрів

$$R_n^\Delta = \sqrt{(x - x_n^\Delta)^2 + (y - y_n^\Delta)^2 + (z - z_n^\Delta)^2}; \quad (2)$$

де $x_n^\Delta = x_n + \Delta x \Psi_1$, $y_n^\Delta = y_n + \Delta y \Psi_2$, $z_n^\Delta = z_n + \Delta z \Psi_3$ – значення координат фазових центрів джерел випромінювання БСВ з урахуванням помилок; Δx , Δy та Δz – максимальні значення помилок розташування фазових центрів джерел випромінювання; Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 – рівномірно розподілені в межах інтервалу $[-1, 1]$ випадкові числа.

Закон розподілу несучих частот за відсутності помилок має вигляд [6, 7]:

$$f_{0n} = f_0 + |n| \Delta F_n; \quad (3)$$

$$\text{де } n \in \left[-\frac{N-1}{2}; \dots 0; \dots \frac{N-1}{2} \right].$$

Закон розподілу початкових фаз для здійснення когерентного складання полів у вибраній точці фокусування матиме вигляд

$$\varphi_{0n} = -2\pi f_{0n} \left(\frac{z_F}{c} - \frac{R_{Fn}}{c} \right); \quad (4)$$

де $R_{Fn} = \sqrt{(x_F - x_n)^2 + (y_F - y_n)^2 + (z_F - z_n)^2}$ – відстань між точкою фокусування з координатами $P_F(x_F, y_F, z_F)$ та центром n -го джерела випромінювання з координатами (x_n, y_n, z_n) .

Оцінки проведемо для випадку: ефективна база БСВ $L_{\text{еф}} = 1000$ м; $\lambda = 0,1$ м; $N = 33$ та $P_n = 10$ кВт ($P_{\text{вун.}} = P_n N = 330$ кВт). Крок частоти між сусідніми джерелами випромінювання становить $\Delta F = 6,25$ МГц і, відповідно, максимальне рознесення несучих частот дорівнює $\Delta F_{\text{max}} = 100$ МГц, що дозволяє формувати послідовність ПЧІ тривалістю $\tau_{\text{ПЧІ}} = 10$ нс із періодом повторення $T_{\text{ПЧІ}} = 160$ нс.

Розглянемо сумісне функціонування джерел випромінювання, розподілених за випадковим законом всередині кола з діаметром 1000 м. Як було показано в [6, 7], фокусування ЕМВ в аналізованій малобазовій БСВ можливе вже на дальностях, що перевищують у 2 – 4 рази розмір ефективної бази $L_{\text{еф}}$. При цьому структура сформованої послідовності ПЧІ змінюється зі збільшенням дальності фокусування [12, 13]. Виходячи з цього, розглянемо вплив помилок розташування фазових центрів випромінювачів на характеристики поля випромінювання БСВ з урахуванням дальності фокусування.

На рис. 1 наведено залежності математичного очікування нормованої щільності потоку потужності випромінювання БСВ від помилок Δx , Δy та Δz відповідно, розраховані за виразом (1) при використанні одноступінчастого V-подібного закону розподілу частот (див. вир. (3)) при зміні дальності до точки фокусування від $z_F = 4,0L_{\text{еф}}$ до $z_F = 24,0L_{\text{еф}}$. Як видно із рис. 1, а вплив помилок розташування випромінювачів по осі Ox на рівень \bar{S}_n більш суттєво позначається при виборі точки фокусування на малих дальностях від апертури БСВ. При цьому зменшення значення \bar{S}_n не перевищує 10% на дальності $z_F = 4,0L_{\text{еф}}$ при $\Delta x = 1,5\lambda$. Зі збільшенням дальності до точки фокусування вплив помилок розташування випромінювачів по осі Ox стає менш суттєвим і на дальності $z_F = 14,0L_{\text{еф}}$ зменшення значення \bar{S}_n на 10% відбувається при $\Delta x = 4,0\lambda$. Вибираємо за допустиме значення $\Delta x \leq 1,5\lambda$. Як видно із рис. 1, б вплив помилок розташування випромінювачів по осі Oy на рівень \bar{S}_n менш суттєвий, ніж вплив помилок розташування випромінювачів по осі Ox .

Аналіз рис. 1, в показує, вплив помилок розташування фазових центрів випромінювачів по осі Oz не залежить від дальності до точки фокусування. Однак, на відміну від попередніх випадків, вплив помилок по осі Oz є суттєвим і потрібне вживання спеціальних заходів щодо

їх зниження [11, 12]. Область допустимих значень Δz , в якій зменшення значення \bar{S}_H не перевищує 10 %, визначається, як і для Δh у разі плоскої ФАР, тобто. з умови $\Delta z \leq \lambda/6$.

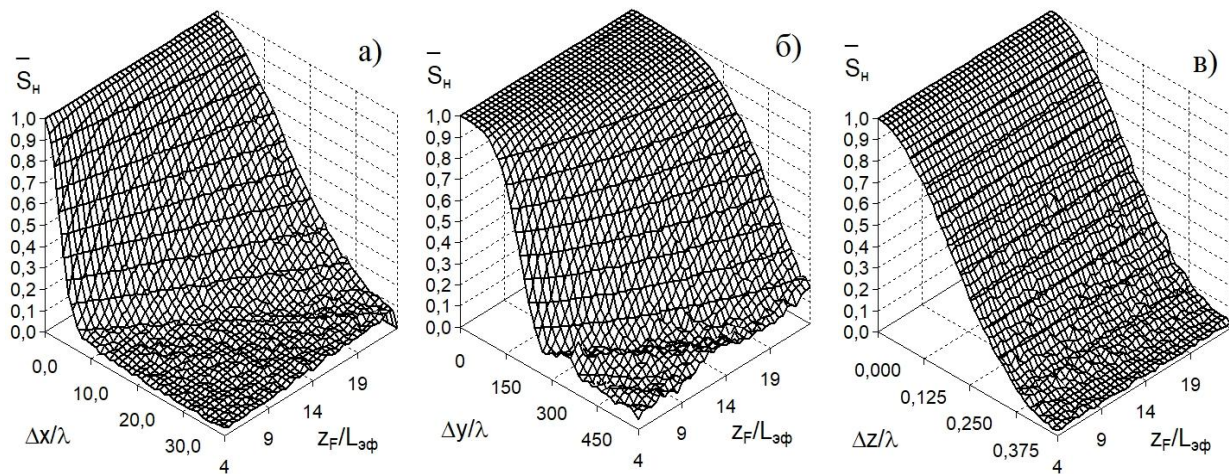


Рис. 1. Залежність математичного очікування нормованої щільності потоку потужності БСВ від помилок розташування фазових центрів: а) Δx ; б) Δy ; в) Δz

Вимоги до дискретності та точності установки початкових фаз та несучих частот за елементами системи

Розглянемо вплив помилок у встановленні заданих дискретностей несучої частоти та початкової фази у кожному елементі випромінювання на характеристики випромінювання БСВ. Розрахунок значень математичного очікування нормованої щільності потоку потужності проведемо на основі наступного виразу:

$$\langle S(x, y, z, t) \rangle = \left\langle \frac{1}{S_{\max}} \left| \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sqrt{\frac{P_n G_n}{4\pi R_n^2}} \exp \left\{ -j \left[2\pi f_{0n}^{\Delta} \left(t - \frac{R_n}{c} \right) + \varphi_{0n}^{\Delta} \right] \right\} \right|^2 \right\rangle. \quad (5)$$

При цьому закон розподілу початкових фаз з урахуванням помилок має вигляд

$$\varphi_{0n}^{\Delta} = -2\pi f_{0n} \left(\frac{z_F}{c} - \frac{R_{Fn}}{c} \right) + \Delta\varphi\Psi_1; \quad (6)$$

де $\Delta\varphi$ – максимальне значення помилки встановлення початкової фази у кожному джерелі випромінювання; Ψ_1 – випадкова величина, рівномірно розподілена в межах інтервалу $[-1, 1]$.

Одноступінчастий V-подібний закон розподілу несучих частот (див. вир. (3)) можна записати у вигляді

$$f_{0n}^{\Delta} = f_0 + |n|\Delta f + \Delta f\Psi_2; \quad (7)$$

де Δf – максимальне значення помилки встановлення несучої частоти у кожному джерелі випромінювання; Ψ_2 – випадкова величина, рівномірно розподілена в межах інтервалу $[-1, 1]$.

На рис. 2 наведена залежність математичного очікування нормованого значення щільності потоку потужності випромінювання БСВ від помилок $\Delta\varphi$ при зміні дальності до точки фокусування від $z_F = 4,0L_{эф}$ до $z_F = 24,0L_{эф}$. Як видно із рис. 2, вплив помилок закону

ПФЧ управління сигналами, що випромінюються, не залежить від дальності до точки фокусування. Проте вплив помилок закону ПФЧ управління є суттєвим і потрібне вживання спеціальних заходів щодо їх зменшення [14]. Область допустимих значень $\Delta\varphi$, при якій зменшення значення \bar{S}_H не перевищує 10 %, визначається за умови $\Delta\varphi \leq \pi/3$.

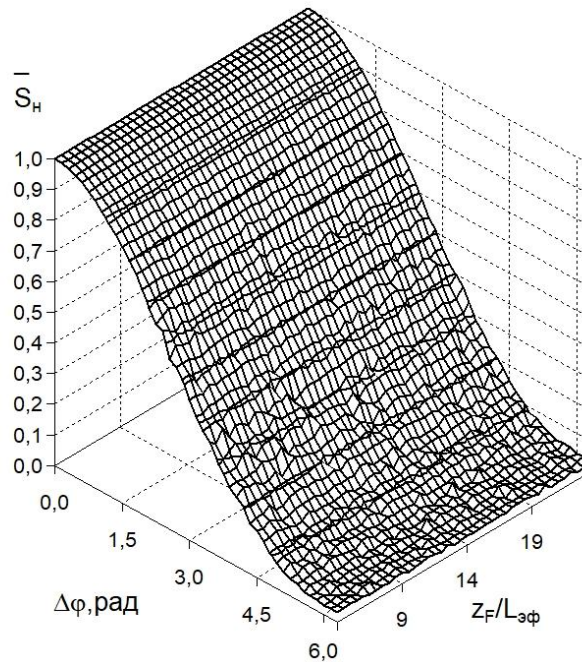


Рис. 2. Залежність математичного очікування нормованої щільності потоку потужності БСВ від помилок $\Delta\varphi$

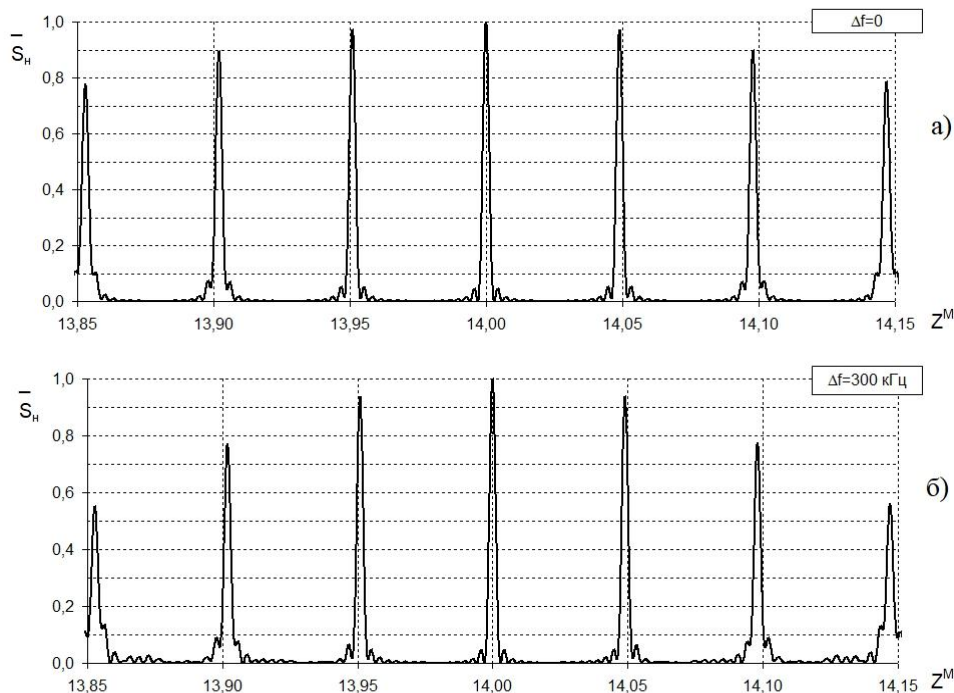


Рис. 3. Залежність математичного очікування нормованої щільності потоку потужності БСВ від помилок Δf : а) – $\Delta f=0$; б) – $\Delta f=300$ кГц

Як було показано в [15], на відстанях, порівнянних із розміром бази БСВ, формується пачка ПЧІ обмеженої тривалості. На рис. 3 наведено залежності математичного очікування нормованого значення щільності потоку потужності випромінювання БСВ без помилок в установці заданої дискретності несучих частот $\Delta f=0$ та з урахуванням максимального

значення цієї помилки $\Delta f = 300$ кГц для точки фокусування $z_F = 14,0L_{ef}$. Як видно із рис. 3, б, вплив помилок установки несучих частот, що наростає з часом, зменшує тривалість пачки ПЧІ, що має враховуватися при здійсненні функціонального ураження бортових радіоелектронних пристроїв на дальностях, порівнянних з L_{ef} . Зі збільшенням дальності до точки фокусування вплив помилок установки несучих частот у передаючих каналах БСВ стає аналогічним випадку плоских фазованих антенних решіток. Проведені розрахунки показали, що при 10 %-му зниженні значення щільності потоку потужності БСВ допустимим є $\Delta f T \leq 0,1$.

Висновки

Вплив помилок розташування випромінювачів у площині XOY на рівень щільності потоку потужності ЕМВ найбільше позначається в першій половині зони Френеля. Зі збільшенням дальності до точки фокусування $z_F \geq 0,5z_d$ вплив цих помилок стає менш суттєвим. Вплив помилок розташування фазових центрів випромінювачів на осі OZ не залежить від дальності до точки фокусування.

Для БСВ істотним є вплив помилок закону просторово-фазового управління сигналами, що випромінюються, і помилок розташування фазових центрів випромінювачів по осі OZ . Як і для випадку плоскої фазованої антени решітки, область допустимих значень цих помилок визначається за умови $\Delta\varphi \leq \pi/3$ і $\Delta z \leq \lambda/6$.

Вплив помилок установки несучих частот залежить від тривалості випромінювання, оскільки фазові помилки, зумовлені неточністю установки несучих частот радіовипромінювань, наростають з часом. Аналіз помилок установки несучих частот у каналах БСВ показав, що їх вплив не залежить від обраного значення максимального рознесення несучих частот по апертурі та визначається значенням помилки установки несучої частоти в випромінюючих елементах (або абсолютною нестабільністю частоти). Тривалість пачки ПЧІ при якій щільність потоку потужності знижується не більше ніж на 10 % через помилки встановлення несучих частот у випромінюючих елементах вибирається з умови $\Delta f T \leq 0,1$.

Список літератури:

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. Москва : Высш. шк., 1988. 432 с.
2. Зиолковски Р.В. Новые импульсы направленной электромагнитной энергии // SPIE. Microwave and Particle Beam Sources and Propagation. 1988. Vol. 873.
3. Фельсен Л.В., Хейшан Е. Методы фокусировки луча от распределенных апертур // SPIE. Microwave and Particle Beam Sources and Propagation. 1988. Vol.873.
4. Содин Л.Г. Характеристики импульсного излучения антенн (электромагнитного снаряда) // Радиотехника и электроника. 1992. Т.37, № 5. С. 849-857.
5. Гомозов В.И., Гомозов А.В. Новый метод фокусировки электромагнитных излучений // Антенны. 2001. Вып. 3(49). С. 54-60.
6. Гомозов В.И., Гомозов А.В. Титов С.В. Пространственно-фазово-частотная фокусировка сигналов в плоских ФАР при V-образной дискретизации частот // Радиотехника. 2001. Вып. 122. С. 201-207.
7. Гомозов В.И., Гомозов А.В., Титов С.В. Метод формирования последовательностей сфокусированных пространственно-временных импульсов при использовании многоступенчатого V-образного распределения частот по апертуре плоских ФАР // Радиотехника. 2002. Вып. 130. С. 33-38.
8. Сканирующие антенные системы СВЧ. Т. I ; пер. с англ. ; под ред. Г.Т.Маркова и А.Ф. Чаплина. Москва : Сов. радио, 1966. 536 с.
9. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. Москва : Сов. радио, 1970. 384 с.
10. Маляревский Н.М. Погрешность измерения вероятностей // Известия вузов. 1962. № 2. С. 73-76.
11. Рабинович Б.Е. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений // Вопросы радиоэлектроники. Сер. VI. Радиоизмерительная техника. 1961. Вып. 4. С. 3-20.
12. Линде Д.П. Радиопередающие устройства. Москва : Энергия, 1969. 680 с.
13. Уманский В.С. Усилительный тракт импульсных передающих устройств СВЧ. Москва : Сов. радио, 1973. 256 с.
14. Гомозов А.В., Гомозов В.И., Ермаков Г.В., Титов С.В. Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ ; под ред. В.И. Гомозова. Харьков : КП «Городская типография», 2011. 330 с.

15. Математическое и информационное обеспечение многоступенчатого V-образного управления частотой пространственно-распределенной передающей системы / С. В. Титов, Е. В. Титова // Системы обработки информации. Харьков : ХУПС, 2016. Вып. 2(139). С. 63-67.

Надійшла до редколегії 11.05.2022

Відомості про авторів:

Коваленко Андрій Іванович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри системотехніки; Україна; e-mail: andrey.kovalenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2882-5082>

Тітов Сергій Володимирович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри системотехніки; Україна; e-mail: serhii.titov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0910-4415>

Титова Олена Вітольдівна – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інформатики; Україна; e-mail: olena.titova@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8894-2040>

Чорна Ольга Сергіївна – канд. техн. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри системотехніки; Україна; e-mail: olha.chorna@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6745-8137>