

**Н.М. Карашук, к.т.н., ст. викладач**  
*Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова*  
**В.П. Манойлов, д.т.н., проф.**  
**П.П. Мартинчук, ст. викладач**  
**К.С. Терех, студент**  
*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## Широкосмугова антена у вигляді відрізка коаксіального хвилеводу

*Антена у вигляді відкритого відрізка коаксіального хвилеводу в режимі хвилі типу  $H_{11}$  широко використовується як самостійний випромінювач. Особливістю такої антени є її погане узгодження з вільним простором. Для покращення узгодження антени у вигляді відрізка коаксіального хвилеводу застосовано діелектричний чвертьхвильовий трансформатор. Отримано формули (1)–(5) для розрахунку параметрів діелектричного чвертьхвильового трансформатора та представлено експериментальні дані, які підтверджують розрахунки. А саме: активної  $G_R$  (1) та реактивної  $B_R$  (2) зовнішніх провідностей відкритого кінця коаксіальної лінії; коефіцієнта відбиття хвилі в коаксіальній лінії  $\Gamma$  (4) і коефіцієнта корисної дії  $\eta$  (5). У таблиці 1 наведено значення результатів розрахунків геометричних розмірів та місця включення виготовлених зразків діелектричних чвертьхвильових трансформаторів, що підтверджені експериментально.*

*Наведено розраховані та експериментально зняті графіки зміни коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) у смузі частот для різних типів діелектричних чвертьхвильових трансформаторів та діаграм спрямованості антени різних розмірів.*

**Ключові слова:** узгодження; діелектричний трансформатор; коаксіальна антена; коефіцієнт стоячої хвилі за напругою.

**Актуальність теми.** В діапазоні надвисоких частот застосовуються антени у вигляді відкритих кінців прямокутних, круглих, коаксіальних та інших типів хвилеводів. Випромінювачі вказаних типів застосовуються самостійно, а також як опромінювачі лінзових і дзеркальних антен [1, 2].

Антена у вигляді відкритого кінця хвилеводу є слабкоспрямованою [3, 4]. Для підвищення спрямованості необхідно, щоб розміри поверхні, яка випромінює, були набагато більшими за робочу довжину хвилі [5]. Проте розміри розкриття не можуть бути більшими певного значення, оскільки в них можуть виникнути хвилі вищих типів, які порушують нормальну роботу антени. Для отримання вузької діаграми спрямованості перетин хвилеводу плавно збільшують, перетворюючи хвилевід у рупор [6], а в такому випадку структура поля в ньому змінюється незначно.

Особливістю хвилевідних випромінювачів є погане узгодження із вільним простором [7, 8]. В наслідок різкої зміни умов розповсюдження електромагнітної хвилі за переходу від хвилеводу до вільного простору коефіцієнт відбиття досягає за модулем величини  $|\Gamma| = 3$ . Тому питання покращення узгодження хвилевідних випромінювачів, зокрема на базі коаксіальних хвилеводів, є досить актуальним.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Для покращення узгодження відкритого кінця хвилеводу із вільним простором застосовуються різні конструктивні рішення [9, 10]: узгоджувальні трансформатори у вигляді діелектричних втулок, кілець, відрізків ліній передач, узгоджувальних пристроїв для компенсації реактивних складових опору – штирі, діафрагми, короткозамкнуті шлейфи, поглинальні навантаження. Всі вказані узгоджувальні пристрої є резонансними. Для застосування діелектричних чвертьхвильових узгоджувальних трансформаторів необхідно мати вирази для розрахунку їх геометричних розмірів та значення місця включення, враховуючи коаксіальний тип лінії передачі.

**Метою статті** є розгляд характеристик широкосмугової антени у вигляді коаксіального хвилеводу із узгоджувальним діелектричним чвертьхвильовим трансформатором.

**Викладення основного матеріалу.** Антена, що розглядається, складається із коаксіальної лінії 1 діаметром  $2a$  та внутрішнього провідника 2 діаметром  $2b$  (рис. 1). Провідник 2 не досягає розкриття антени на розмір  $d_m$ .

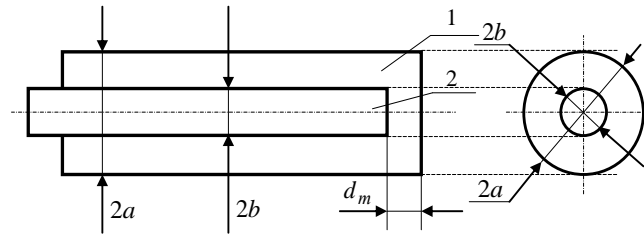


Рис. 1. Антена у вигляді відрізка коаксіального хвилеводу

На рисунку 2 показано залежність величини  $\pi d_m/a$  від відношення  $b/a$  за різних значень  $2a/\lambda$  ( $\lambda$  – довжина хвилі у вільному просторі) [11].

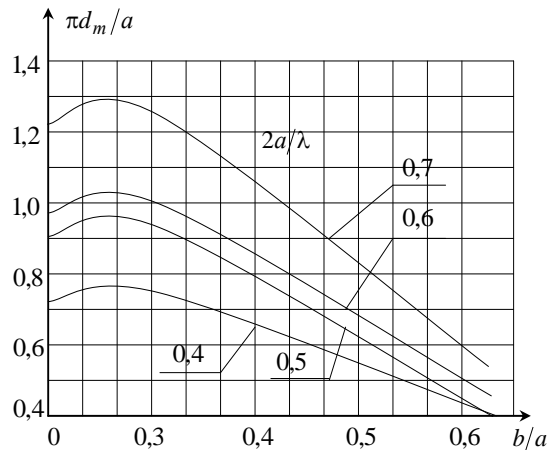


Рис. 2. Графіки залежностей величини  $\pi d_m/a$  від відношення  $b/a$  за різних значень  $2a/\lambda$

Рисунок 2 свідчить, що ці залежності мають нелінійний характер, що необхідно враховувати за проектування таких антен. В коаксіальній лінії між двома провідниками з радіусами  $a$  та  $b$  можуть розповсюджуватися хвилі електричного і магнітного типів [9].

Активна та реактивна зовнішні провідності відкритого кінця коаксіальної лінії описуються такими формулами [11]:

$$G_R = \frac{1}{1,44} [(k_0 b)^2 - (k_0 a)^2] \cdot 10^{-3}; \quad (1)$$

$$B_R = \frac{1}{12} (k_0 b) [1 - 2(a/b) + (a/b)^2] \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

де  $k_0$  – хвильове число,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ , рад/м;

$\lambda_0$  – середня робоча довжина хвилі діапазону, м.

Формули (1), (2) свідчать, що реактивна складова провідності такого випромінювача значно більша за активну складову, яка відповідає за випромінювання. Нормована до хвильової провідності Т-хвилі комплексна провідність кільцевої щілини з нульовою азимутальною варіацією струму рівна [11]:

$$Y_R = \frac{1}{\ln(b/a)} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left[ \frac{1}{24} [(k_0 b)^2 - (k_0 a)^2]^2 + j \frac{(k_0 b)}{2} \left[ 1 - 2\left(\frac{b}{a}\right) + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \right] \right]. \quad (3)$$

Коефіцієнт відбиття хвилі у коаксіальній лінії і коефіцієнт корисної дії  $\eta$  відкритого кінця коаксіальної лінії дорівнюють:

$$|\Gamma| = \left| \frac{1 - G_R - jB_R}{1 + G_R + jB_R} \right|; \quad (4)$$

$$\eta = 1 - |\Gamma|^2. \quad (5)$$

На рисунку 3 наведено графіки залежностей  $G_R, B_R, \eta$  від частоти для декількох значень співвідношень розмірів поперечного перетину коаксимальної лінії  $b/a$ . Графіки рисунка 3 показують низьку властивість випромінювання такої антени. Коефіцієнт спрямованої дії відкритого кінця коаксимальної лінії дорівнює  $D=1,5$ , як у диполя і коефіцієнт підсилення достатньо низький –  $G = (1 - |\Gamma|^2)D$  [11].

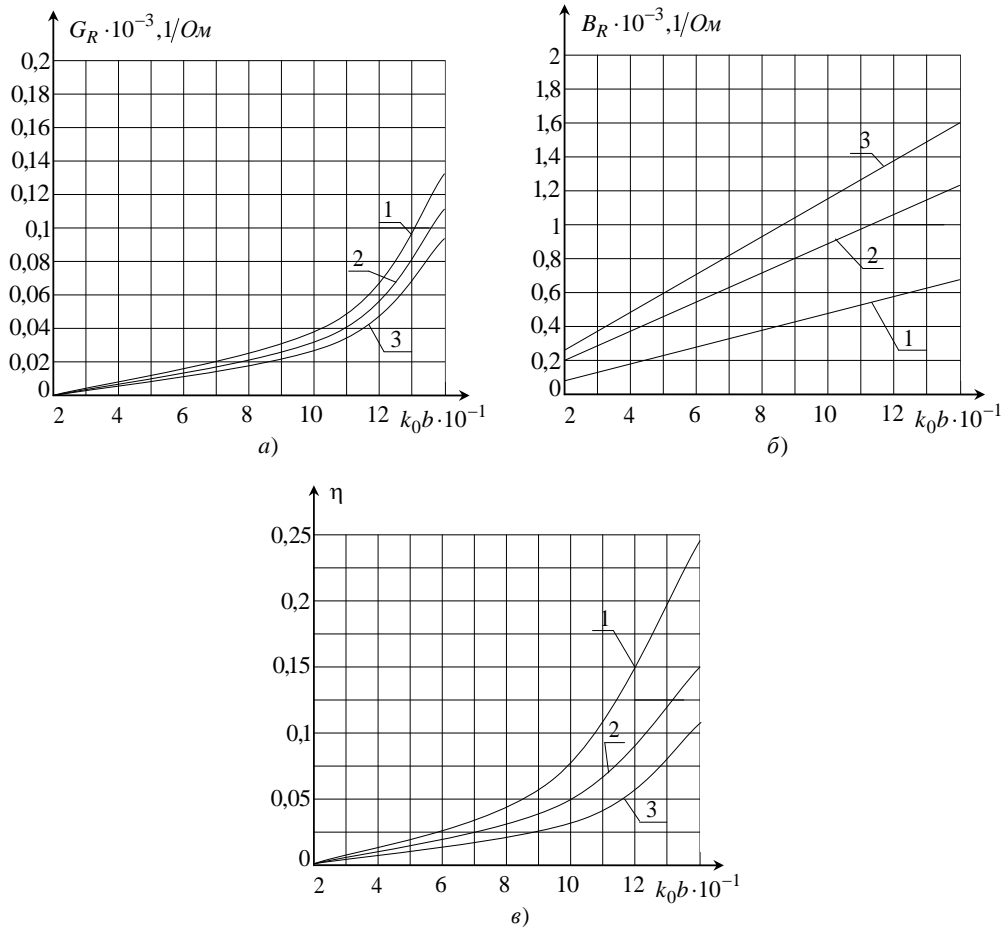


Рис. 3. Електричні характеристики відкритого кінця коаксимальної лінії:  
а) –  $G_R$ ; б) –  $B_R$ ; в) –  $\eta$ ; 1 –  $b/a = 2$ ; 2 –  $b/a = 2,23$ ; 3 –  $b/a = 2,5$ ;  $\epsilon = \mu = 1$ .

Для узгодження хвильового опору відрізка коаксимальної лінії  $z_k$  із хвильовим опором вільного простору (навантаження)  $z_n$  застосуємо діелектричний чвертьхвильовий трансформатор з опором  $z_{mp}$  (Рис. 4). Якщо підібрати опір  $z_{mp}$  так, щоб вхідний опір діелектричного чвертьхвильового трансформатора дорівнював  $z_{\alpha} = z_k$ , а це виконується за  $z_{mp} = \sqrt{z_k z_n}$ , то в лінії передачі не буде відбитої хвилі.

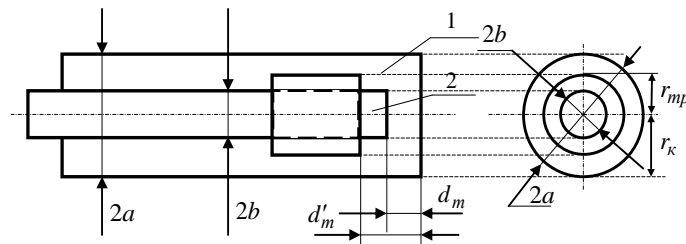


Рис. 4. Антена у вигляді відрізка коаксимального хвильоводу із узгоджувальним діелектричним чвертьхвильовим трансформатором

Оскільки  $z_k$  і  $z_{mp}$  є дійсними величинами, то діелектричний чвертьхвильовий трансформатор може узгоджувати чисто активні опори навантаження  $z_n$ .

За розповсюдження падаючої хвилі (рис. 5) у першому наближенні будуть виникати дві відбиті хвилі: одна – в місці з'єднання лінії з трансформатором (перетин 1–1), друга – в місці з'єднання трансформатора з навантаженням (перетин 2–2), за цього відносний зсув за фазою між відбитими хвилями в лінії дорівнює  $\pi$ , що досягається вибором довжини  $l_{mp} = \lambda/4$ .

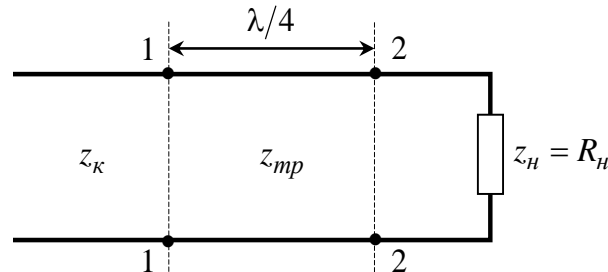


Рис. 5. Антена у вигляді відрізка коаксіального хвилеводу із узгоджувальним діелектричним чвертьхвильовим трансформатором

Вибираючи  $z_{mp} = \sqrt{z_k z_n}$  забезпечується рівність амплітуд відбитих хвиль, що призводить до їх компенсації в лінії, тобто до узгодження лінії з навантаженням.

У таблиці 1 наведені чисельні значення відносної діелектричної проникності діелектриків, із яких виготовлено діелектричний чвертьхвильовий трансформатор [12].

Таблиця 1

Розміри та параметри матеріалів виготовлення діелектричного чвертьхвильового трансформатора

№ з/п	Марка діелектрика	$\varepsilon$	$r_{mp}/r_k$	$d'_{mp}$ , мм
1	Флан-16	16	0,72	8
2	СТ-10	10	0,74	7,2
3	СТ-7	7	0,78	6,5
4	СТ-5	5	0,82	6,2

У таблиці 1 також представлено відношення радіуса діелектричного чвертьхвильового трансформатора  $r_{mp}$  до зовнішнього радіуса коаксіального хвилеводу  $r_k$  та довжини відрізка від апертури антени до початку трансформатора  $d'_{mp}$  (рис. 4). Графіки залежностей коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН)  $K$  від відношення  $\lambda/\lambda_0$  наведено на рисунку 6, а), де суцільними лініями показані розрахункові значення  $K$ , а крапками – експериментальні дані. Графіки показують, що широкосмуговість діелектричного чвертьхвильового трансформатора в середньому становить близько 20% від середньої довжини хвилі, яка дорівнює 3 см. На рисунку 6, б) наведено розраховані за формулами (15.4) і (15.5) [13] та експериментально виміряні діаграми спрямованості антени у вигляді відрізка коаксіального хвилеводу.

До недоліків узгодження за допомогою діелектричного чвертьхвильового трансформатора можна зарахувати складність налаштування трансформатора після його практичного виготовлення. Налаштовувати діелектричний чвертьхвильовий трансформатор можна за допомогою діелектричного кільця, яке на нього надівається, або виготовити трансформатор у вигляді конуса із  $\theta = 20^\circ$  – тоді узгодження можна досягти в усій смузі частот [14].

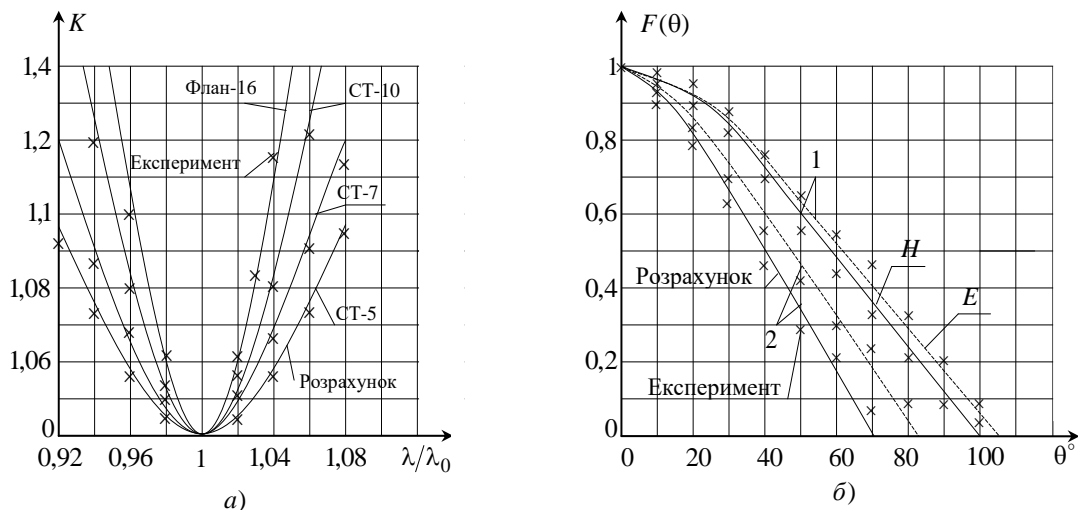


Рис. 6. Графіки залежностей КСХН антени у вигляді відрізка коаксимального хвилеводу в смузі частот – а); діаграми спрямованості (1 –  $2a = 0,7\lambda$ , 2 –  $2a = \lambda$ ) – б)

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Проведені теоретичні та експериментальні дослідження широкопasmової антени у вигляді відрізка коаксимального хвилеводу показують можливість створення малогабаритного випромінювача для використання в різних радіотехнічних системах надвисокочастотного діапазону. Застосування діелектричного чвертьхвильового трансформатора дозволяє провести узгодження антени в заданій смузі частот шляхом регулювання його місця включення.

Розглянуті залежності свідчать, що КСХН не перевищує значення 1,4 у всій смузі частот для різних за геометричними розмірами та матеріалом виготовлення діелектричних чвертьхвильових трансформаторів. Діаграма спрямованості в площині Н вужча, ніж в площині Е, та вужча в антені з більшим поперечним перетином коаксимального хвилеводу. Достовірність отриманих виразів підтверджена збіжністю за одиницями вимірювання, а також шляхом порівняння з результатами експериментальних досліджень, виконаних авторами. Практичним значенням результатів досліджень є можливість синтезу (проектування) антен з покращеним узгодженням. Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі полягають у розв'язанні задачі узгодження антени у всій смузі робочих частот шляхом розрахунку та застосування трансформатора у вигляді конуса із  $\theta = 20^\circ$ .

#### Список використаної літератури:

1. *Неганов В.Я.* Устройства СВЧ и антенны / В.Я. Неганов, Д.С. Клюев, Д.П. Табаков. – М. : Ленанд, 2016. – 728 с.
2. *Moallemiraden A.* A simple design substrate-integrated waveguide horn antenna with reduced back lobe / A.Moallemiraden, M.Kioni-Kharaji, S.Mohammad-Ali-Nezhad // International Journal of Electronics. – 2020. – Vol. 107. – P. 417–440.
3. *Фрадин А.З.* Антенно-фидерные устройства / А.З. Фрадин. – М. : Связь, 1977. – 440 с.
4. *Манойлов В.П.* Дослідження електродинамічних характеристик антени у вигляді відкритого кінця прямокутного хвилеводу із частковим діелектричним заповненням та штирем збудження / В.П. Манойлов, В.В. Чухов, Н.М. Карацук // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2019. – № 1 (83). – С. 214–218.
5. *Сомов А.М.* Проектирование антенно-фидерных устройств / А.М. Сомов, Р.В. Кабетов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2015. – 500 с.
6. *Устройства СВЧ и КВЧ-диапазонов / Ю.А. Иларионов, А.С. Раевский, С.Б. Раевский, А.Ю. Седаков.* – М. : Радиотехника, 2013. – 752 с.
7. *Sorrentino R.* Microwave and RF Engineering / R.Sorrentino, G.Bianchi ; in K.Chang (ed.) // John Wiley & Sons, 2010. – 892 p.
8. *Zbitou I.* Emerging Innovations / I.Zbitou, A.Evhik // JGJ Glodal, 2018. – P. 437.
9. *Лебедев И.В.* Тезисы и приборы СВЧ. / И.В. Лебедев. – М. : Высшая школа, 1970. – 437 с.
10. *Веселов Г.И.* Слоистые мегалодиелектрические волноводы / Г.И. Веселов. – М. : Радио и связь, 1988. – 247 с.
11. *Панченко Б.А.* Нанопантенны / Б.А. Панченко, М.А. Гизатуллин. – М. : Радиотехника, 2010. – 87 с.
12. *Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под. ред. В.Н. Вальмана.* – М. : Радио и связь, 1982. – 328 с.
13. *Айзенберг Г.З.* Антенны УКВ. Ч. 1. / Г.З. Айзенберг, В.Г. Ямпольский, О.Н. Терешин. – М. : Связь, 1977. – 380 с.
14. *Манойлов В.Ф.* Линейные невязимные ферритовые и диелектрические устройства с электрическим управлением для систем СВЧ-радиометрии : дисс. ... д.т.н. / В.Ф. Манойлов. – Винница : ВНТУ, 1996. – 450 с.

**References:**

1. Neganov, V.Ya., Klyuev, D.S. and Tabakov, D.P. (2016), *Ustroistva SVCh i anteny*, Lenand, M., 728 p.
2. Moallemiraden, A., Kioni-Kharaji, M. and Mohammad-Ali-Nezhad, S. (2020), «A simple design substrate-integrated waveguide horn antenna with reduced back lobe», *International Journal of Electronics*, Vol. 107, pp. 417–440.
3. Fradin, A.Z. (1977), *Antenno-fidernye ustroystva*, Svyaz', M., 440 p.
4. Manojlov, V.P., Chuhov, V.V. and Karashhuk, N.M. (2019), «Doslidzhennja elektrodynamichnyh harakterystyk anteny u vygljadi vidkrytogo kincja prjamokutnogo hvylevodu iz chastkovym dielektrychnym zapovnennjam ta shtyrem zbudzhennja», *Visnyk ZhDTU, Serija Tehnichni nauky*, No. 1 (83), pp. 214–218.
5. Somov, A.M. and Kabetov, R.V. (2015), *Proektirovanie antenno-fidernykh ustroystv*, Goryachaya liniya – Telekom, M., 500 p.
6. Ilarionov, Yu.A., Raevskii, A.S., Raevskii, S.B. and Sedakov, A.Yu. (2013), *Ustroistva SVCh i KVCh-diapazonov*, Radiotekhnika, M., 752 p.
7. Sorrentino, R. and Bianchi, G. (2010), *Microwave and RF Engineering*, in Chang, K. (ed.), John Wiley & Sons, 892 p.
8. Zbitou, I. and Evhik, A. (2018), Emerging Innovations, *JGI Global*, pp. 437.
9. Lebedev, I.V. (1970), *Teznika i pribory SVCh*, Vysshaya shkola, M., 437 p.
10. Veselov, G.I. (1988), *Sloistye metalodielektricheskie volnovody*, Radio i svyaz', M., 247 p.
11. Panchenko, B.A. and Gizatullin, M.A. (2010), *Nanoantenny*, Radiotekhnika, M., 87 p.
12. Val'mana, V.N. (ed.) (1982), *Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCh poloskovykh ustroystv*, Radio i svyaz', M., 328 p.
13. Aizenberg, G.Z., Yampol'skii, V.G. and Tereshin, O.N. (1977), *Anteny UKV, Part 1*, Svyaz', M., 380 p.
14. Manoilo, V.F. (1996), «Lineinye nevzaimnye ferritovye i dielektricheskie ustroystva s elektricheskim upravleniem dlya sistem SVCh-radiometrii», D.Sc. Thesis of dissertation, VNTU, Vinnitsa, 450 p.

**Карашук** Наталія Миколаївна – кандидат технічних наук, старший викладач Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова.

<http://orcid.org/0000-0002-5691-2098>.

Наукові інтереси:

– антени та техніка НВЧ.

E-mail: knm7@ukr.net.

**Манойлов** В'ячеслав Пилипович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0001-6961-6995>.

Наукові інтереси:

– електродинаміка;

– прилади НВЧ та антени;

– біомедичні прилади та системи.

E-mail: kaf.rtrat@ukr.net.

**Мартинчук** Петро Петрович – старший викладач кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-3220-6033>.

Наукові інтереси:

– обробка сигналів у радіотехнічних системах;

– електро- та радіовимірювальні прилади.

E-mail: m\_petro@ukr.net.

**Терех** Катерина Сергіївна – студент кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

– телеметрія, телемедицина.

E-mail: bi21\_tks@student.ztu.edu.ua.

Стаття надійшла до редакції 25.03.2021.