

Н. М. Каращук, В. П. Манойлов, П. П. Мартинчук, С. О. Соболенко

## ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПІДСИЛЕННЯ АНТЕН ДОВІЛЬНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ДЗЕРКАЛЬНИМ МЕТОДОМ

Вимоги до характеристик і параметрів сучасних антен, особливо до електромагнітної сумісності, постійно зростають. Ефективне використання антенної техніки в теперішній час неможливе без розвитку та вдосконалення засобів і способів вимірювань електричних характеристик та параметрів. Експериментальне дослідження характеристик антен – найважливіший технологічний процес у ході їх розробки та виготовлення. Результати вимірювань характеристик антен дозволяють перевірити достовірність розрахунків та моделювання, правильність вибору конструкції і матеріалів, точність виготовлення, а також відповідність вимогам щодо електромагнітної сумісності. У статті проаналізовано чинні дзеркальні методи визначення характеристик антен еліптичної та колової поляризацій. На підставі аналізу (особливостей розглянутих методів) обґрунтовано необхідність їх удосконалення. Запропоновано структурну схему вимірювання коефіцієнта підсилення антени довільної поляризації дзеркальним методом. Вона відрізняється наявністю поляризаційного екрана із пінопластової прямокутної пластини, на яку нанесені тонкі металеві провідники, відстань між якими менше чверті довжини хвилі в повітрі. У склад схеми також входять: панорамний вимірювач коефіцієнта стоячої хвилі за напругою, індикатор, узгоджувальний трансформатор, досліджувана антена, дзеркальне зображення антени. Вимірювання коефіцієнта підсилення проведено з урахуванням його зв'язку із діаграмою спрямованості антени. Наведено розрахункові та експериментально зняті графіки діаграм спрямованості антен колової поляризації в площинах  $E$  та  $H$  відповідно: прямокутного хвилеводу із круглими щілинами та квадратної рупорної антени з діелектричною пластиною, на якій із двох сторін нанесено неоднорідні щілинні лінії. Порівняння результатів розрахунків та експерименту показали можливість застосування методу дзеркального зображення для вимірювання характеристик антен із коловою поляризацією. Особливістю удосконаленого дзеркального методу вимірювання коефіцієнта підсилення є те, що напрямок обертання вектора напруженості електричного поля за відбиття не змінюється на протилежний, не потрібно вимірювати параметри поляризаційного еліпса, не має значення, яким чином забезпечується збудження електромагнітної хвилі обертової поляризації, можна вимірювати параметри антен лінійної поляризації.

**Ключові слова:** дзеркальний метод; колова поляризація; круглі щілини; поляризаційний екран; коефіцієнт підсилення.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Теорія і техніка вимірювання параметрів та характеристик антен й антенних пристроїв є одним із напрямків у техніці надвисоких частот, що достатньо швидко розвивається. Актуальні завдання © Н. М. Каращук, В. П. Манойлов, П. П. Мартинчук, С. О. Соболенко, 2021

вдосконалення методів вимірювання характеристик антенних систем набувають особливої значущості для розробки (вдосконалення) систем військового призначення, які повинні забезпечувати підвищену завадозахищеність, зменшення радіолокаційної помітності та виконання вимог електромагнітної сумісності [1, 2]. Відмінність антенних систем, як об'єктів вимірювання, обумовлена різноманіттям габаритних показників, конструктивними особливостями, характеристиками направленості, частотним діапазоном, відповідними доступними методами (методиками). На початковому етапі планування необхідно обрати метод вимірювання характеристик антени (або сукупності антен) у заданих умовах та визначити склад і структуру комплексу, який здатний його реалізувати. На сьогодні для проведення антенних вимірювань розроблено цілу низку методів, класифікацію яких наведено в [3–5]. Вибір того чи іншого методу зумовлений багатьма чинниками: частотним діапазоном, направленістю і масогабаритними параметрами досліджуваної антени, видами і необхідною точністю вимірювальних характеристик. Кожен з методів має переваги, недоліки й обмеження, зокрема, за точністю [5]. Тому розгляд питання усунення залежності точності вимірювання параметрів антени дзеркальним методом від виду поляризації електромагнітної хвилі (ЕМХ) є досить актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із найбільш поширених методів вимірювання коефіцієнта підсилення антен є метод дзеркальних зображень [6, 7]. Проте його застосування для антен, які мають еліптичну поляризацію електромагнітного поля, має труднощі через те, що за відбиття від плоского металевго екрана напрямок обертання вектора напруженості електричного поля змінюється на протилежний [8]. Запропонований у роботі [9] метод вимірювання коефіцієнта підсилення антен колової поляризації доцільний тільки для обмеженого типу антен, колова поляризація поля випромінювання яких забезпечується фазуючою секцією. Крім того, його недоліком є необхідність вимірювання параметрів поляризаційного еліпса, що зумовлює додаткові похибки.

Тому постає необхідність модифікації дзеркального методу вимірювання коефіцієнта підсилення, що дозволить усунути вказані вище недоліки.

**Формулювання завдання дослідження.** Необхідно удосконалити дзеркальний метод вимірювання коефіцієнта підсилення антен шляхом застосування поляризаційного екрана із пінопластової прямокутної пластини, на яку нанесені тонкі металеві провідники, відстань між якими менше чверті довжини хвилі. У такому разі напрямок обертання вектора напруженості електричного поля не змінюється за відбиття, немає необхідності вимірювати параметри поляризаційного еліпса та не важливо, яким чином створюється обертова поляризація в антені.

**Виклад основного матеріалу.** Структурну схему установки для вимірювання коефіцієнта підсилення антени довільної поляризації наведено на рис.1. Вона складається із панорамного вимірювача коефіцієнта стоячої хвилі за напругою 1, індикатора 2, узгоджувального трансформатора 3, досліджуваної антени 4, поляризаційного екрана 5 та дзеркального зображення антени 4'. Для проведення вимірювань антена 4 узгоджується із лінією передачі за допомогою трансформатора 3.

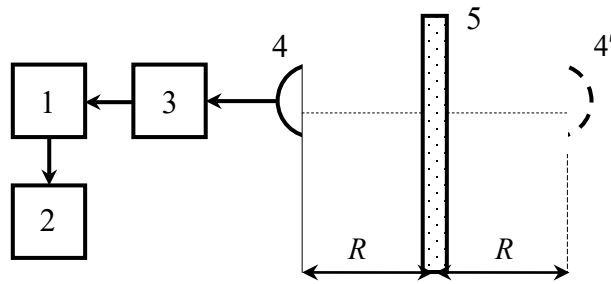


Рис. 1. Структурна схема вимірювання коефіцієнта підсилення антени довільної поляризації дзеркальним методом

Потім у поле випромінювання антени 4 встановлюється поляризаційний екран 5 та реєструється величина коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) за допомогою індикатора 2. Поляризаційний екран 5 – це пінопластова прямокутна пластина, на яку нанесені тонкі металеві провідники, паралельні одній зі сторін листа, крім того, відстань між провідниками менше  $\lambda/4$ .

Оскільки дзеркальне зображення антени 4 (4') знаходиться в площині симетрії поляризаційного екрана 5, то потужність, яка приймається, дорівнює [10]

$$P_2 = \left( \frac{\lambda}{8\pi R} \right)^2 P_1 G^2, \quad (1)$$

де  $P_1$ ,  $P_2$  – потужності випромінювання та приймання, Вт;

$R$  – відстань між антеною та центром екрана, м;

$G$  – коефіцієнт підсилення антени, разів (дБ).

Коефіцієнт підсилення антени пов'язаний із коефіцієнтом спрямованої дії (КСД)  $D$  таким чином [10]:

$$G = D \cdot \eta, \quad (2)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії антени.

Із виразів (1) та (2) можна отримати розрахункову формулу для величини  $D$ , вважаючи, що  $\eta = 1$ :

$$D = \frac{8\pi R}{\lambda} G, \quad (3)$$

де  $G$  – коефіцієнт відбиття в лінії передачі.

Коефіцієнт відбиття  $G$  за модулем пов'язаний із КСХН формулою [11]

$$КСХН = \frac{1 + |G|}{1 - |G|}. \quad (4)$$

КСД антени вимірюється в такий спосіб: антена узгоджується з лінією передачі та визначається величина КСХН; вноситься поляризаційний екран та здійснюється його повертання в напрямку максимального випромінювання. За допомогою індикатора 2 реєструється величина КСХН. Далі, використовуючи (4), можна отримати величину  $\Gamma_1$ :

$$\Gamma_1 = \frac{\lambda}{8\pi R} D_1, \quad (5)$$

де  $D_1$  – КСД антени на малій осі поляризаційного еліпса.

Аналогічно реєструється максимальний коефіцієнт відбиття  $\Gamma_2$ :

$$\Gamma_2 = \frac{\lambda}{8\pi R} D_2, \quad (6)$$

де  $D_2$  – КСД антени на великій осі поляризаційного еліпса.

Користуючись виразами (5) та (6), можна розрахувати КСД антени:

$$D_1 + D_2 = \frac{8\pi R}{\lambda} (\Gamma_1 + \Gamma_2). \quad (7)$$

Розглянутий підхід виправданий за відсутності перевідбиттів між досліджуваною антеною та поляризаційним екраном. Використовуючи відомий зв'язок величини коефіцієнта підсилення антени з її діаграмою спрямованості [11], розглянемо його на прикладі двох антен.

Для практичної перевірки результатів вимірювання коефіцієнта підсилення антен були використані дві антени колової поляризації: прямокутний хвилевід із круглими щілинами та квадратна рупорна антена з діелектричною пластиною, на якій із двох сторін нанесено неоднорідні щілинні лінії.

Розглянемо діаграми спрямованості кожної з антен в Е та Н площинах.

Відомо, що в прямокутному хвилеводі із хвилею типу  $H_{10}$  є складові напруженості магнітного поля  $H_x$  та  $H_z$ , зсунуті за фазою на  $\pi/2$  [10] (рис. 2).

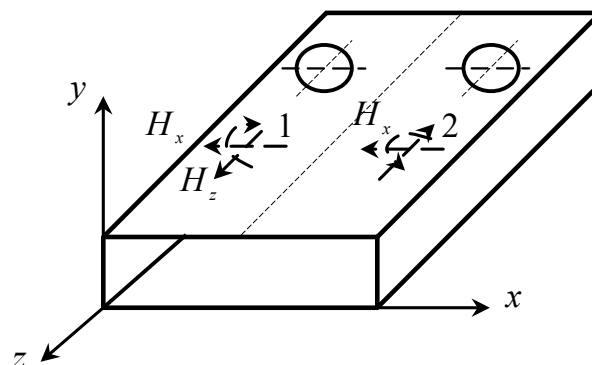


Рис. 2. Прямокутний хвилевід із круглими щілинами

У поперечному перетині хвилеводу на його широкій стінці можна знайти дві точки, у яких амплітуди складових напруженості магнітного поля  $H_x$  та  $H_z$  рівні. Ці точки розташовані симетрично відносно середини широкої стінки хвилеводу. Наявність у них на

внутрішній поверхні широкої стінки хвилеводу двох рівних за модулем перпендикулярних складових  $H_x$  та  $H_z$ , зсунутих за фазою на  $\pi/2$ , означає, що сумарне магнітне поле в них має колову поляризацію. Відповідно, складова  $H_z$ , у разі переходу від однієї точки до іншої, змінює знак на протилежний. Це означає, що напрямок обертання сумарного вектора магнітного поля в одній точці буде протилежним напрямку обертання цього вектора в іншій. Якщо в широкій стінці хвилеводу прорізати дві хрестоподібні чи круглі щілини, то можна стверджувати, що поле випромінювання близьке до поля випромінювання перпендикулярних вібраторів. Такі щілини, у разі приймання хвилі еліптичної поляризації, розкладають на дві хвилі з коловою поляризацією правого та лівого напрямку обертання. На базі цих щілин будують аналізатори поляризаційної структури поля. На рис. 3 наведено результати розрахунків та вимірювань діаграми спрямованості (ДС) круглих щілин 1 та 2 (рис. 2), прорізаних у прямокутному хвилеводі, на середній частоті діапазону 10 ГГц.

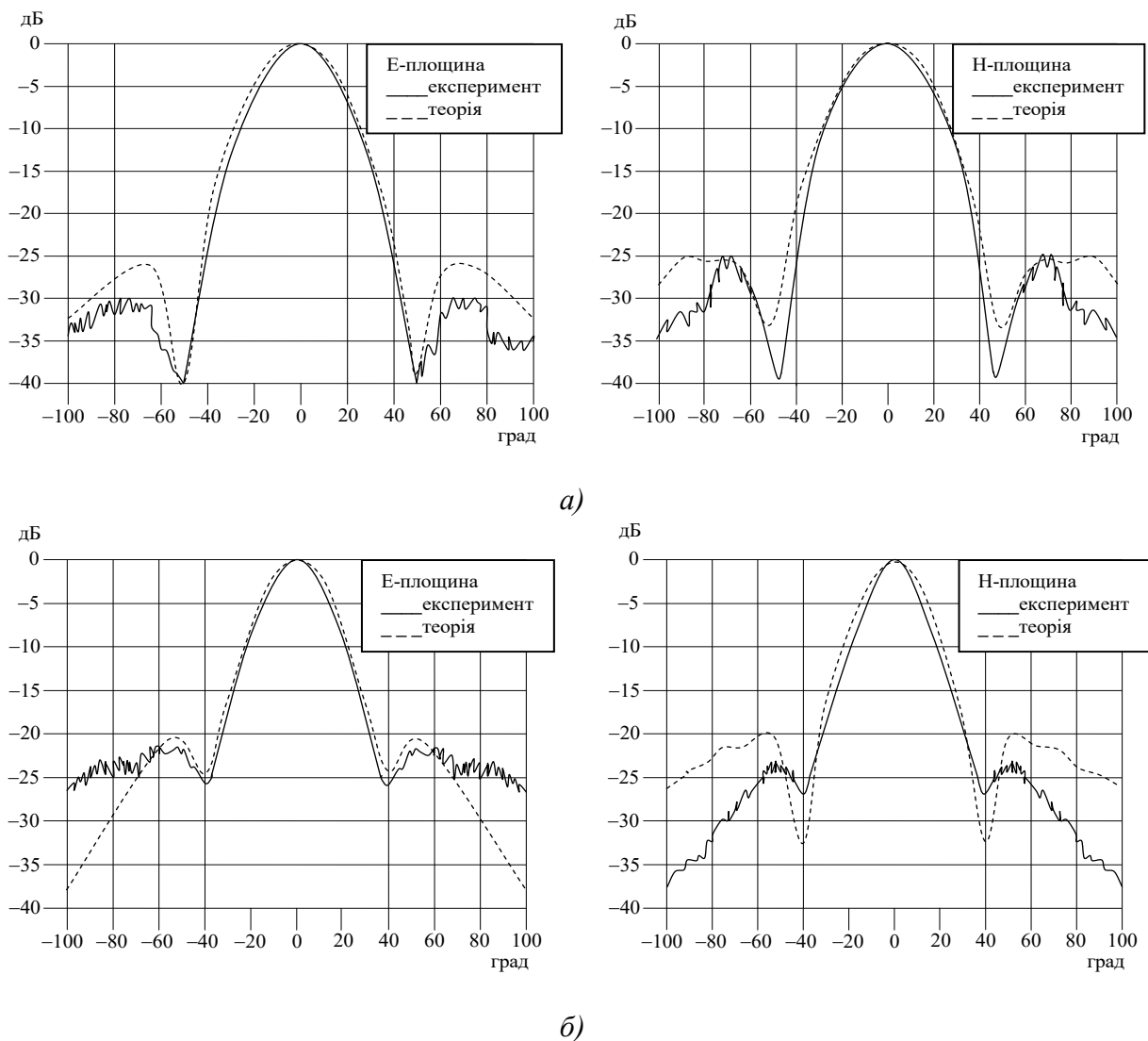


Рис. 3. Діаграми спрямованості круглих щілин, прорізаних у прямокутному хвилеводі: а) 1; б) 2

Другий випромінювач колової поляризації поля [12] зображений на рис. 4. Квадратна рупорна антена колової поляризації, що містить послідовно встановлений відрізок квадратного хвилеводу (1), у складі якого є рухомий короткозамикач (2) та коаксіальний

збуджувач (3), квадратний рупор (4), який відрізняється тим, що має всередині діелектричну пластину (5), розміщену під кутом  $45^\circ$  відносно квадратного хвилеводу (5), на якій із двох сторін нанесені неоднорідні щілині (6) та (7), що виходять за край пластини (5) на відстань, рівну  $\lambda_x/8$  ( $\lambda_x$  – довжина хвилі у хвилеводі, м), а біля кінців щілин перпендикулярно їх площині розташована коаксіальна лінія збудження (3).

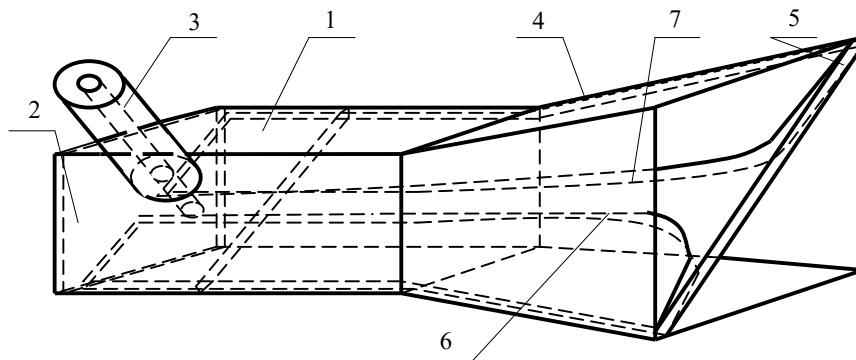


Рис. 4. Квадратна рупорна антена колової поляризації з діелектричною пластиною, на якій із двох сторін нанесені неоднорідні щілинні лінії

На рис. 5 показані теоретичні та експериментальні залежності ДС квадратної рупорної антени з діелектричною пластиною з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon = 5$ , на якій із двох сторін нанесені неоднорідні щілинні лінії.

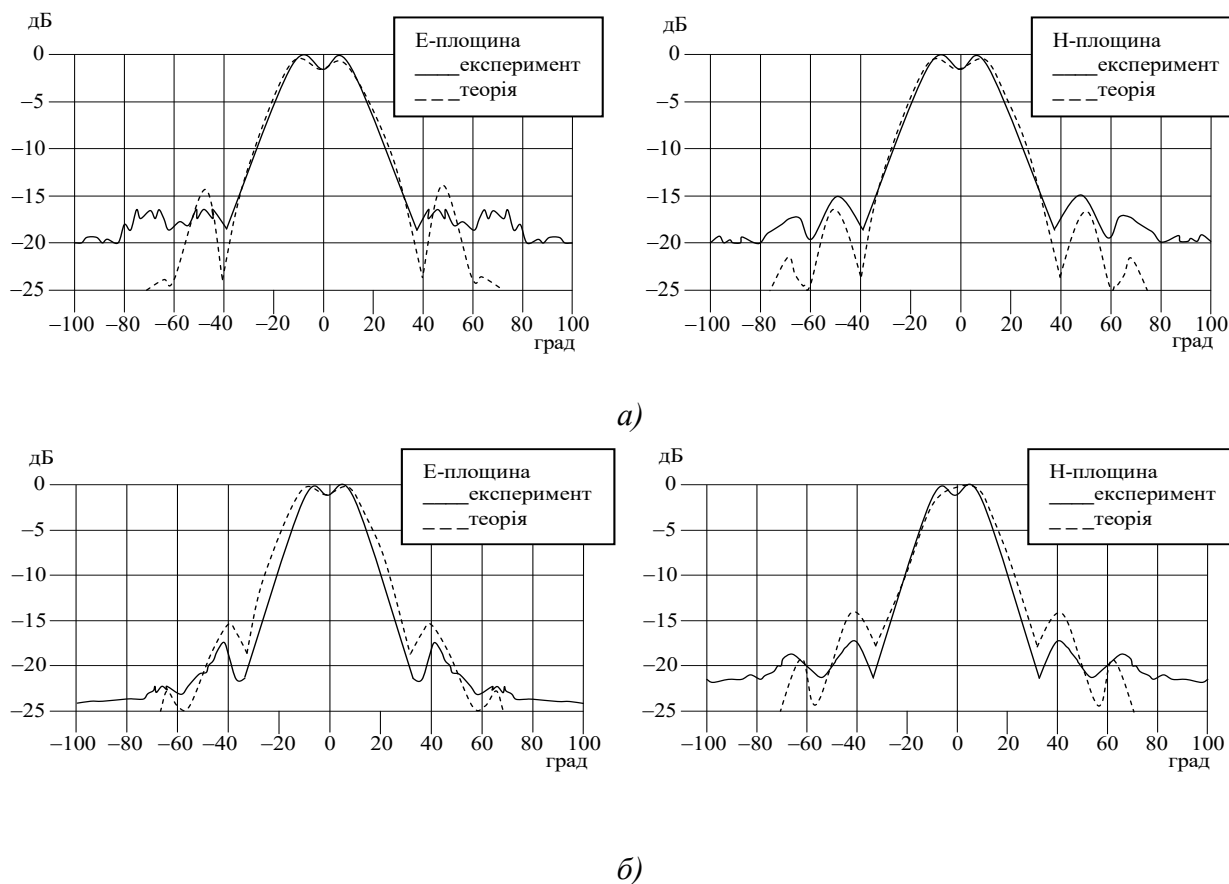


Рис. 5. Діаграми спрямованості квадратної рупорної антени: а) на частоті 10 ГГц; б) на частоті 14 ГГц

Розрахунок такої антени можна провести з використанням робіт [13, 14]. Ширина основної пелюстки ДС (на рівні -3 дБ) становить 30°. Для більш точного визначення величини КСХН можна використовувати метод неузгодженого подвійного трійника, що розглянуто в [15].

Порівняння результатів розрахунків та експерименту показали можливість застосування методу дзеркального зображення для вимірювання характеристик антен із коловою поляризацією.

**Висновки.** Запропоновано вдосконалений дзеркальний метод вимірювання коефіцієнта підсилення антен шляхом застосування поляризаційного екрана із пінопластової прямокутної пластини, на яку нанесені тонкі металеві провідники, відстань між ними менше чверті довжини хвилі.

Переваги вдосконаленого дзеркального методу:

напрямок обертання вектора напруженості електричного поля не змінюється за відбиття;

немає необхідності вимірювати параметри поляризаційного еліпса;

не важливо значення, яким чином створюється обертова поляризація в антені;

можна вимірювати параметри та характеристики антен із будь-якою поляризацією.

Отримані результати вимірювання ДС прямокутного хвилеводу із круглими щілинами та квадратної рупорної антени з діелектричною пластиною, на якій із двох сторін нанесені неоднорідні щілинні лінії, несуттєво відрізняються від розрахункових. Це підтверджує достатньо високу точність дослідження.

Практична значущість отриманих результатів полягає в можливості достатньо точного вимірювання параметрів та характеристик антен будь-якої поляризації вдосконаленим дзеркальним методом.

## **СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Кузавков В. В., Зарубенко А. О. Оцінка можливості зміни конструктиву встановлення та налаштування антен супутникового зв'язку // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист : зб. наук. праць. Київ : ДУ ІГНС НАН України, 2017. № 1 (7). С. 69–74.
2. Кузавков В. В., Зарубенко А. О. Алгоритм розрахунку характеристик антени супутникового зв'язку в ближній зоні сферичним методом вимірювання // Зб. наук. праць ВІТІ. Київ, 2019. № 3. С. 33–47.
3. Near-field vs Far-field. (Reprinted with the permission of Nearfield Systems Inc.) URL: <http://educyclopedia.karadimov.info/library/NSI-near-far.pdf> (last accessed: 07.04.2021).
4. Fordham J. A. An introduction to antenna test ranges, measurements and instrumentation (Microwave Instrumentation Technologies, LLC). URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.112.9981&rep=rep1&type=pdf> (last accessed: 07.04.2021).
5. Parini C., Gregson S., Mc Cormic J., Daniel J. Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements. Electromagnetic waves series. Institution of Engineering and Technology (eBooks) 2014. 799 p. DOI: 10.1049/PBEW055E. e-ISBN: 9781849195638
6. Фрадин А. З., Рыжков Е. В. Измерения параметров антенно-фидерных устройств. Москва : Связь, 1972, 362 с.

7. Методы измерений характеристик антенн СВЧ / Л. Н. Захарьев, А. А. Леманский, В. В. Турчин и др. Москва : Радио и связь, 1983. 230 с.
8. Жук М. С., Молочков Ю. Б. Проектирование линзовых, сканирующих широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. Москва : Энергия, 1973. 490 с.
9. Шубарин Ю. В., Волошин В. А. Метод измерения коэффициента усиления антенн круговой поляризации // Радиотехника и электроника. 1966. Т. 11. С. 1870–1872.
10. Драбкин А. А., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. Москва : Сов. радио, 1974. 536 с.
11. Карашук Н. М., Манойлов В. П., Нікітчук Т. М., Чухов В. В. Рупорна антена на основі заграничного прямокутного хвилеводу із частковим діелектричним заповненням та петлею зв'язку // Технічна інженерія. Житомир : Житомирська політехніка, 2020. № 1 (85). С. 177–183.
12. Штейншлейгер В. Б. Измерения на высоких частотах. Москва : Сов. радио, 1952. 297 с.
13. Манойлов В. П., Морозов Д. С., Карашук Н. М. Рупорна антена кругової поляризації : патент 117152 Україна. Н1913/02 ; № Q2016 07072 ; заявл. 29.06.2016 ; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. 4 с.
14. Антена Вівальді на основі симетричних щілинних ліній / Н. М. Карашук, В. П. Манойлов, Д. С. Морозов, О. Л. Сидорчук // Вісник ННТУ КПП. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2018. № 73. С. 5–11.
15. Моделирование и экспресс-методика измерения ЭПР рупорных антенн / О. Л. Кореновская, В. Ф. Манойлов., Д. С. Морозов и др. // Вісник ННТУ КПП. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2015. № 62. С. 31–40.

Стаття надійшла до редакції 31.05.2021.

## REFERENCES

1. Kuzavkov, V. V., & Zarubenko, A. O. (2017). Otsinka mozhlivosti zminy konstruktyvu vstanovlennia ta nalashtuvannia anten suputnykovoho zv'iazku [Assess the possibility of changing the design of installation and configuration of satellite antennas]. *Tekhnohennno-ekolohichna bezpeka ta tsyvilnyi zakhyst : zb. nauk. prats [Technogenic and ecological safety and civil protection : Collection of scientific works]*, 1 (7), 69–74. Kyiv [in Ukrainian].
2. Kuzavkov, V. V., & Zarubenko, A. O. (2019). Alhorytm rozrakhunku kharakterystyk anteny suputnykovoho zv'iazku v blyzhnii zoni sferychnym metodom vymiriuvannia [Algorithm for calculating the characteristics of a satellite antenna in the near zone by a spherical method of measurement]. *Zb. nauk. prats VITI [Collection of scientific works of Military Institute of Telecommunications and Information Technologies]*, 3, 33–47. Kyiv [in Ukrainian].
3. *Near-field vs Far-field. (Reprinted with the permission of Nearfield Systems Inc.).* (n.d.). Retrieved from <http://educyclopedia.karadimov.info/library/NSI-near-far.pdf>
4. Fordham, J. A. (n.d.). *An introduction to antenna test ranges, measurements and instrumentation (Microwave Instrumentation Technologies, LLC).* Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.112.9981&rep=rep1&type=pdf>



5. Parini, C., Gregson, S., Mc Cormic, J., & Daniel, J. (2014). *Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements. Electromagnetic waves series. Institution of Engineering and Technology (eBooks)*. DOI: 10.1049/PBEW055E. e-ISBN: 9781849195638
6. Fradin, A. Z., & Ryzhkov, E. V. (1972). *Izmereniia parametrov antenno-fidernykh ustroystv* [Measurements of parameters of antenna-feeder devices]. Moscow [in Russian].
7. Zakhar'ev, L. N., Lemanskii, A. A., & Turchin, V. V. et al. (1983). *Metody izmerenii kharakteristik antenn SVCh* [Methods for measuring the characteristics of microwave antennas]. Moscow [in Russian].
8. Zhuk, M. S., & Molochkov, Iu. B. (1973). *Proektirovanie linzovykh, skaniruiushchikh shirokodiapazonnykh antenn i fidernykh ustroystv* [Design of lens, scanning broadband antennas and feeder devices]. Moscow [in Russian].
9. Shubarin, Iu. V., & Voloshin, V. A. (1966). Metod izmereniia koeffitsienta usileniia antenn krugovoi poliarizatsii [Method for measuring the gain of circular polarized antennas]. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], Vol. 11, 1870–1872 [in Russian].
10. Drabkin, A. A., Zuzenko, V. L., & Kislov, A. G. (1974). *Antenno-fidernye ustroystva* [Antenna feeder devices]. Moscow [in Russian].
11. Karashchuk, N. M., Manoilov, V. P., Nikitchuk, T. M., & Chukhov, V. V. (2020). Ruporna antena na osnovi zahranychnoho priamokutnoho khvylevodu iz chastkovym dielektrychnym zapovnenniam ta petleiu zv'iazku [Horn antenna based on foreign rectangular waveguide with partial dielectric filling and communication loop]. *Tekhnichna inzheneriia* [Technical engineering], 1 (85), 177–183. Zhytomyr : Zhytomyr polytechnic [in Ukrainian].
12. Shteinshleiger, V. B. (1952). *Izmereniia na vysokikh chastotakh* [High frequency measurements]. Moscow [in Russian].
13. Manoilov, V. P., Morozov, D. S., & Karashchuk, N. M. (2018). *Ruporna antena kruhovoii poliarizatsii* [Horn antenna of circular polarization] : patent 117152 Ukraine. H1913/02; № Q2016 07072; stated 29.06.2016; published 25.06.2018, Bulletin № 12. 4 p. [in Ukrainian].
14. Karashchuk, N. M., Manoilov, V. P., Morozov, D. S., & Sydoruk, O. L. (2018). Antena Vivaldi na osnovi symetrychnykh shchilynykh linii [Vivaldi antenna based on symmetrical slit lines]. *Visnyk NNTU KPI. Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia* [Bulletin of NNTU KPI. Radio Engineering. Radioengineering], 73, 5–11 [in Ukrainian].
15. Korenovskaia, O. L., Manoilov, V. F., & Morozov, D. S. et al. (2015). Modelirovanie i ekspress-metodika izmereniia EPR rupornykh antenn [Modeling and express-method for measuring EPR of horn antennas]. *Visnyk NNTU KPI. Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia* [Bulletin of NNTU KPI. Radio Engineering. Radioengineering], 62, 31–40 [in Russian].

**N. N. Karashchuk, V. P. Manoilov, P. P. Martynchuk, S. O. Sobolenko**

**MEASUREMENT OF ANTENNA GAIN OF ANY POLARIZATION BY MIRROR METHOD**

*Requirements to characteristics and parameters of modern aerials, especially to electromagnetic compatibility, constantly grow. The effective utilisation of antenna technics is impossible now without development and perfection of means and ways of measurement of electric characteristics and parameters. Experimental study of antenna characteristics is the*

*most important technological process during their development and manufacture. Results of measurements of characteristics of aerials allow to check up reliability of calculations and modelling, correctness of a choice of a design and materials, accuracy of manufacturing, and also conformity to requirements of electromagnetic compatibility. The article analyzes the current mirror methods for determining the characteristics of elliptical and circular polarization antennas. On the basis of the analysis (features of the considered methods) necessity of their perfection is proved. The block diagramme of measurement of factor of strengthening of the aerial of any polarisation is offered by a mirror method. It is distinguished by the presence of a polarizing screen with a rectangular foam plate on which thin metal conductors are applied, the distance between which is less than a quarter of the wavelength in air. The circuit also includes: a panoramic voltage standing wave ratio meter, an indicator, a matching transformer, an antenna for research, a mirror image of the antenna. Measurement strengthening factor is spent taking into account its communication with the diagramme of an orientation of the aerial. The settlement and experimentally removed schedules of diagrammes of an orientation of aerials of circular polarisation in planes E and H accordingly are resulted: rectangular wave guide with round cracks and square aerials with a dielectric plate on which from two parties non-uniform slot-hole lines are put. Comparison of the calculation and experimental results showed the possibility of using the mirror image method to measure the characteristics of circularly polarized antennas. Feature of an advanced mirror method of measurement of factor of strengthening is that the direction of rotation of a vector of intensity of electric field at reflexion does not change on opposite, it is not necessary to measure parametres of a polarising ellipse, has no value how excitation of an electromagnetic wave of rotating polarisation is provided, you can measure the parameters of antennas with linear polarization.*

**Keywords:** *a mirror method, circular polarisation; round cracks; the polarising screen; strengthening factor.*