

УДК 621.396.677.73

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.4.294631>

## МЕТОД ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ЗВОРОТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ АПЕРТУРНИХ АНТЕН

*Я. І. Лепіх, А. О. Карпенко*

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН та НАН України  
при Одеському національному університеті імені І. І. Мечникова  
e-mail: [ndl\\_lepikh@onu.edu.ua](mailto:ndl_lepikh@onu.edu.ua)

## МЕТОД ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ЗВОРОТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ АПЕРТУРНИХ АНТЕН

*Я. І. Лепіх, А. О. Карпенко*

**Анотація.** Запропоновано та розроблено метод, що дозволяє суттєво знизити рівень зворотного випромінювання електромагнітних хвиль антен апертурного типу будь-якої конструкції. Суть методу полягає у збудженні уповільнених поверхневих хвиль на зовнішній стороні кромки апертури антени, що знаходяться у протифазі з електромагнітними хвилями зворотного випромінювання. Уповільнені поверхневі хвилі формуються імпедансною металевою гребінкою, що виконує функцію уповільнюючої системи, розміщеної на зовнішній стороні кромки розкриття антени.

**Ключові слова:** електромагнітні хвилі, антени апертурного типу, імпедансні структури, діаграма спрямованості

## METHOD OF REDUCING THE LEVEL OF BACK RADIATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES OF APERTURE ANTENNAS

*Ya. I. Lepikh, A. O. Karpenko*

**Abstract.** A method has been proposed and developed that allows you to significantly reduce the level of back radiation of electromagnetic waves of aperture-type antennas of any design. The essence of the method is the excitation of slowed surface waves on the outer side of the edge of the antenna aperture, which are in antiphase with electromagnetic waves of back radiation. Slowed surface waves are formed by an impedance metal comb, which performs the function of a retarding system, placed on the outer side of the opening edge of the antenna.

**Keywords:** electromagnetic waves, aperture type antennas, impedance structures, directional diagram

## Вступ

Сучасні темпи зростання обсягів інформації, що передається, вимагають подальшого освоєння діапазону надвисоких частот (НВЧ). Для антенної техніки це означає перехід до антени апертурного типу, що працюють в гігерцовому і терагерцовому діапазонах частот.

Головними перевагами антен апертурного типу є:

- висока спрямованість випромінювання;
- невеликі масогабаритні параметри;
- широкий діапазон робочих частот;
- можливість випромінювати електромагнітні хвилі великої потужності.

Однак існують різні фактори, що погіршують їх характеристики. Зокрема, виникнення зворотного випромінювання в область простору, що знаходиться за апертурою антени, в результаті чого в її діаграмі спрямованості (ДС) з'являється задня пелюстка, що обумовлено рядом явищ, серед яких найбільш вагомим є перевипромінювання електромагнітних хвиль струмами, що наводяться в контурі кромки отвору (розкриття) апертурної антени. Ця проблема актуальна і потребує вирішення.

До апертурного класу антен, що працюють у діапазоні надвисоких частот (НВЧ) відносяться, як відомо, рупорні, дзеркальні параболічні антени та фазовані антенні решітки [1]. Завдяки високим технічним характеристикам апертурні антени знайшли широке застосування у сучасних радіоелектронних системах зв'язку, радіолокації, радіонавігації, радіоастрономії, а також у космічних літальних апаратах.

Однією з переваг рупорних антен і фазованих антенних решіток є висока спрямованість випромінювання, яку характеризує ДС, широкий діапазон робочих частот, високий коефіцієнт корисної дії та можливість випромінювати електромагнітні хвилі великої потужності (до 100 МВт), що робить їх незамінними в радіолокації та космічному радіозв'язку. В той же час мають місце чинники, які негативно впливають на параметри антен апертурного типу, формуючи випромінюванням елек-

тромагнітних хвиль у зворотньому напрямку спотворену частину ДС відбираючи частину потужності випромінювання і суттєво погіршуючи можливості точної локації об'єкта. Тому усунення цих недоліків в апертурних антенах є актуальною задачею як в теоретичному так і в конструктивному плані [2].

У нашій роботі запропоновано та розроблено метод зменшення рівня зворотного випромінювання, що виникає на кромці вихідного отвору антени апертурного типу (ААТ), зокрема, антени рупорного типу.

## Постановка задачі

Розглянемо поперечний переріз вихідного отвору ААТ, що є електричним контуром прямокутного перерізу  $K_1$ , що випромінює електромагнітні хвилі (рис. 1). Джерелами електромагнітного поля є змінні струми  $i_1, i_2, i_3, i_4$ . Припустимо, кожна сторона контуру випромінює у простір циліндричні хвилі з довжиною  $\lambda_0$  і фазою  $\varphi_0$ . Умовно розділимо весь простір на 2 області:  $A$  – область зворотного випромінювання, що знаходиться за ААТ;  $B$  – область прямого випромінювання, розташована попереду розкриття ААТ. Площина розділу цих областей збігається з площиною контуру  $K_1$ . Помістимо геометричний центр контуру  $K_1$  на початок системи координат. На осі  $z$  області напівпростору  $A(-z, \pm x, \pm y)$  розмістимо контур  $K_2$ , ідентичний контуру  $K_1$  з геометричним центром з координатами  $(0, 0, -l)$ .

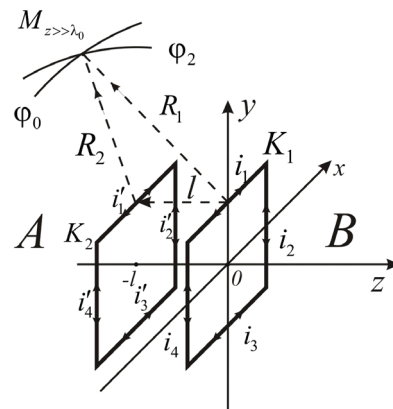


Рис. 1. Еквівалентна схема зниження рівня зворотного випромінювання.

Тоді електромагнітні хвилі, випромінювані контуром  $K_1$  пройшовши відстань  $l$  за час  $t_{зад}$  наведуть змінні струми  $i'_1, i'_2, i'_3, i'_4$  в контурі  $K_2$ . В результаті вийде система двох випромінюючих контурів – активного  $K_1$  і пасивного  $K_2$ , причому фаза випромінювання контуру  $K_2$  -  $\varphi_2$  відставатиме від фази  $\varphi_0$  на час, необхідний електромагнітній хвилі для подолання відстані  $l$ .

У дальній зоні виділимо точку  $M$ . Відстань від початку системи координат до точки  $M$  має бути на багато разів більшою за довжину хвилі  $\lambda_0$  [2]. Електромагнітні хвилі, випромінювані контурами  $K_1$  і  $K_2$  досягнуть точки  $M_{z \gg \lambda_0}$  не одночасно, а за час  $t_0 = \frac{R_1}{c}$  по радіус-вектору  $R_1$  і  $t_{зад} = \frac{l}{v} + \frac{R_2}{c}$ , де  $v$  і  $c$  – швидкості поширення електромагнітних хвиль між контурами  $K_1$  і  $K_2$ , і у вільному просторі відповідно.

Оскільки  $R_1$  і  $R_2$  набагато більше відстані між контурами  $l$  можна вважати, що  $R_1 = R_2 = R$ . Необхідно визначити такий час затримки  $t_{зад}$ , при якому в точці спостереження  $M_{z \gg \lambda_0}$  фази  $\varphi_0$  і  $\varphi_2$  відрізнятимуться одна від одної на величину  $\pi$

$$t_{зад} - t_0 = \pi, \quad (1)$$

або

$$\frac{l}{v} - \frac{l}{c} = \frac{\lambda_0}{2c}. \quad (2)$$

У цьому випадку електричні та магнітні вектори полів, випромінюваних контурами  $K_1$  і  $K_2$  знаходяться в протифазі для будь-яких  $x, y, z$ , більших на порядок, ніж  $\lambda_0$ , а результуюча щільність потоку потужності в дальній зоні напівпростору  $A$  прагне до нуля. У напівпросторі  $B(z, \pm x, \pm y)$  в дальній зоні фази  $\varphi_0$  і  $\varphi_2$  збігатимуться, оскільки хвиля проходить між контурами відстань, що дорівнює  $2l$  (туди і назад) за відповідний час  $2t_{зад} = 2\pi$ . Така лінія затримки забезпечує досягнення суттєвого зниження рівня зворотного випромінювання антени.

### Методика розв'язання

Для виконання умов (1, 2) необхідно зменшити швидкість поширення електромагнітної енергії в області  $z(0, -l)$ . Для цього помістимо між провідниками контурів  $K_1$  і  $K_2$  уповільнюючу структуру, гребінчастої типу [3], виконану у вигляді плоского металевого гребінця (рис. 2).

Перший гребінь ( $a$ ) відповідає контуру  $K_1$ , останній гребінь ( $c$ ) відповідає контуру  $K_2$ .

При взаємодії плоскої електромагнітної хвилі з імпедансним металевим гребінцем над її поверхнею виникають уповільнені поверхневі хвилі. Електродинаміка цього процесу досить вивчена [3–7]. Розв'язавши рівняння (2) відносно швидкості поверхневої уповільненої хвилі  $v$  отримаємо:

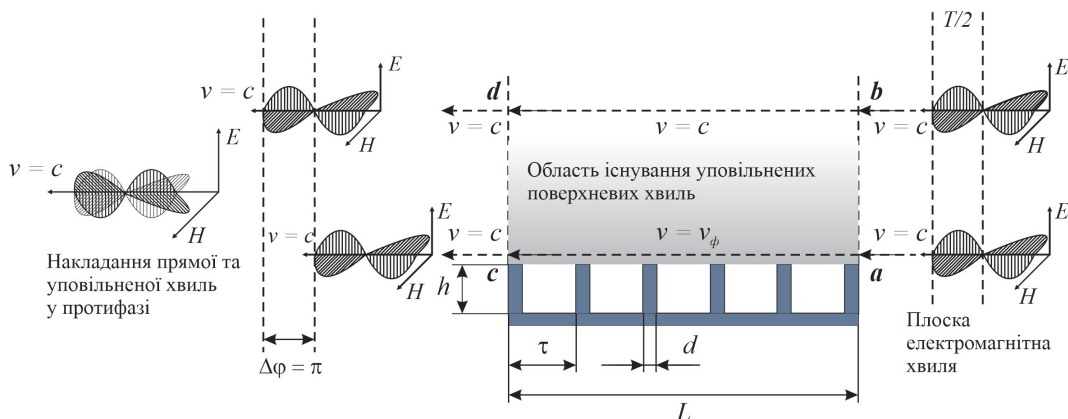


Рис. 2. Фрагмент сповільнюючої гребінчастої структури на основі імпедансного металевого гребінця.  $\tau$  – період гребінки,  $l$  – довжина гребінки,  $d$  – товщина гребенів,  $h$  – висота гребенів,  $v$  – швидкість уповільненої хвилі,  $v_\phi$  – фазова швидкість.

$$v = c \frac{l}{\frac{\lambda_0}{2} + l} \quad (3)$$

Знаючи величину  $v$  можна знайти всі геометричні параметри уповільнюючої структури, а саме:  $\tau$  – період гребінки,  $l$  – довжина гребінки,  $d$  – товщина гребенів,  $h$  – висота гребенів, за яких виконуватиметься умова задачі (1). Використовуючи отримані в [2–5] вирази для уповільнюючої структури індуктивного типу на базі імпедансного металевого гребінця запишемо загальне рішення задачі, що поєднує в собі геометричні та електродинамічні параметри

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{1 + \left( \frac{-d}{\tau} \operatorname{tg} \frac{2\pi h_e}{\lambda_0} \right)^2} = \frac{lc}{\frac{\lambda_0}{2} + l}; \\ l = 6 \div 8 \lambda_0; \\ \tau < 0,5 \lambda_0; \\ d \ll \tau; \\ 0 < h_e < \frac{\lambda_{max}}{4}; \\ \frac{\lambda_{max}}{2} < h_e < \frac{3\lambda_{max}}{4}, \end{array} \right. \quad (4)$$

де  $c$  – швидкість поширення електромагнітної хвилі;

$\lambda_0 = \frac{\lambda_{min} + \lambda_{max}}{2}$  – довжина хвилі, що відповідає середині робочого діапазону;

$\lambda_{min}$  – мінімальна довжина хвилі робочого діапазону;

$\lambda_{max}$  – максимальна довжина хвилі робочого діапазону;

$h_e$  – ефективна висота гребенів, що розраховується за формулою:

$$h_e = h - 0.14(d + \tau),$$

де  $h$  – конструктивна (фактична) висота ребра.

Виходячи з критерію мінімізації масогабаритних характеристик імпедансної гребінки доцільно прийняти  $h_e = \frac{\lambda_{max}}{8}$ , що відповідає середньому значенню з нерівності [2, 3]

$$0 < h_e < \frac{\lambda_{max}}{4} \quad (5)$$

В цьому випадку реактивний опір гребінки не йтиме в нескінченність або в нуль [3, 5].

### Результати моделювання та їх обговорення

Як апробування описаного вище методу обрано рупорно-щілинну антену суднової навігаційної станції радіолокації типу “Міус”, яка представляє собою лінійну фазовану антенну решітку (ФАР), розміщену у фазовому центрі Н-секторіального рупорного випромінювача (рис. 3, 4).

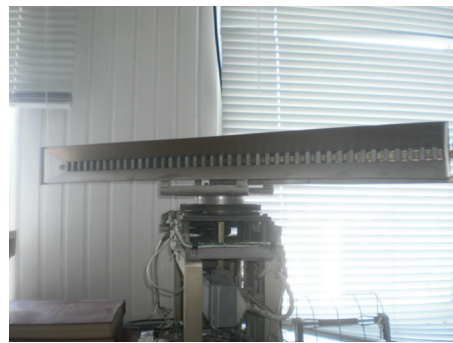


Рис. 3. Рупорно-щілинна антена суднової навігаційної станції радіолокації типу “Міус”.



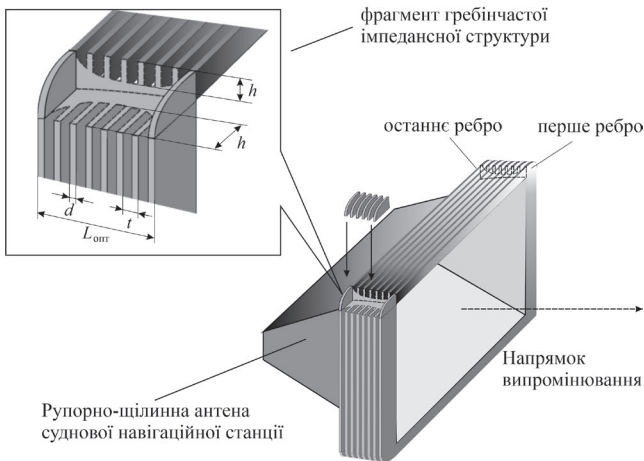
Рис. 4. Фрагмент рупорно-щілинної антени суднової навігаційної радіолокаційної станції типу “Міус”.

Антену судової навігаційної радіолокаційної станції та “Міус” має такі характеристики:

- площа розкриття:  $S = 0,077 \text{ м}^2$ ;
- робоча довжина хвилі:  $\lambda_0 = 0,032 \text{ м}$ ;
- ширина ДС антени за потужністю електромагнітного поля:
  - у вертикальній площині –  $20^\circ$
  - в горизонтальній площині –  $2,4^\circ$ ;
- рівень бічних та зворотних пелюсток за потужністю:  $-12 \text{ дБ}$ .

За умовами комп’ютерної моделі по всьому периметру рупорно-щілинної антени на її кромці задана уповільнююча гребінчаста

структура [3, 8] (рис. 5), що має вигляд імпедансного металевого гребінця, фрагмент якого зображений на рис. 2.



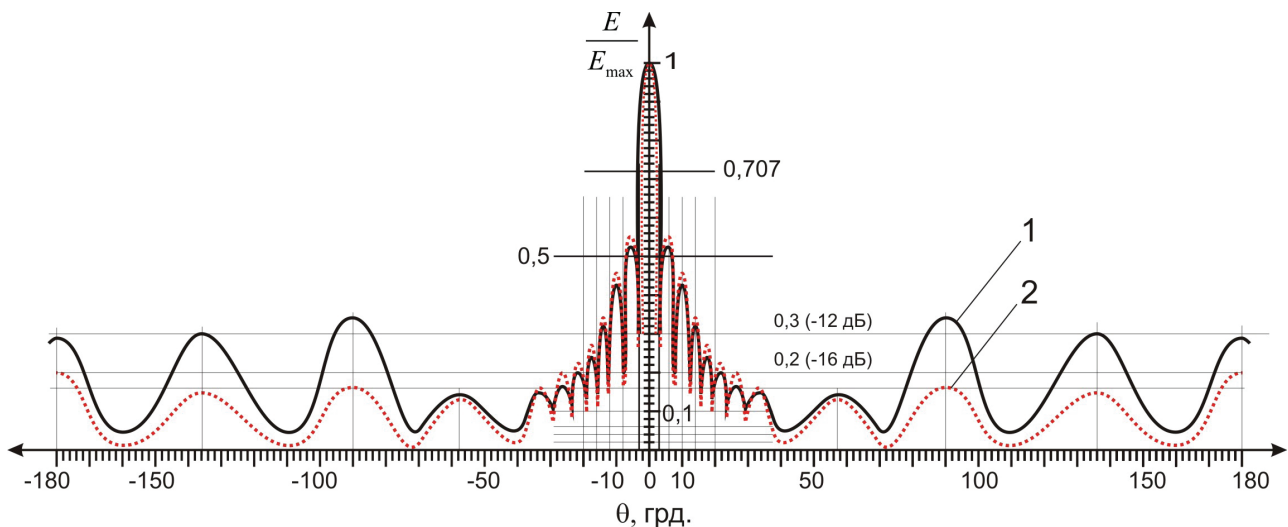
**Рис. 5.** Спосіб розміщення сповільнюючої гребінчастої структури на основі імпедансної металеві гребінки на кромці рупорно-щілинної антени суднової станції навігаційної радіолокації типу «Міус». На малюнку  $L_{\text{онт}} = l$ .

В результаті чисельного комп'ютерного моделювання методом кінцевих елементів у частотній ділянці отримана ДС антени в горизонтальній площині (рис. 6), що відрізняється від прототипу меншим рівнем зворотного випромінювання ( $-17$  дБ), з якої видно, що запропонований метод дозволяє приблизно в 1,4 рази знизити рівень зворотного випромінювання цієї антени.

## Висновки

1. Запропонований метод, заснований на взаємодії електромагнітної хвилі з імпедансною металеві гребінкою антени апертурного типу, дозволяє в 1,4 рази знизити рівень задньої пелюстки ДС.

2. Хвильовий діапазон застосування даного методу визначається співвідношенням ефективної висоти гребенів і максимальної довжини хвилі сигналу рівним  $h_e = \frac{\lambda_{\text{max}}}{8}$ .



**Рис. 6.** 1 – ДС щілинної антени морської навігаційної РЛС «Міус» в горизонтальній площині. 2 – розрахункова ДС з імпедансною сповільнюючою гребінчастою структурою на зовнішній стороні розкриття.

## Список використаної літератури

[1]. М. З. Zghurovskiy, М. Іу. Ilchenko, S.A. Kravchuk та ін. Mikrokhyvlyovi prystroi telekomunikatsiinykh system / V 2 t. K.: IVTs “Vydavnytstvo “Politekhnika”, 2003. – Т. 1: Poshyrennia radiokhyvl. Antenni ta chastotno-vybirkovyi prystroi.– 456 s. (in Ukrainian).

[2]. Ya. I. Lepikh, AA Karpenko. Method for Lowering Level of Backward Radiation of Microwave Horn Radiator // ISSN1064–2269, Journal of Communications Technology and Electronics, 2015, Vol. 60, No. 4, pp. 341–344. Pleiades Publishing, Inc., 2015 (in Ukrainian).

[3]. Karpenko A. O., Lepikh Ya. I. Kompensatsiia fazovoi pomylyky u vyprominiuvachakh

NVCh-khvyly za dopomohoiu impedansnoi struktury // Tekhnolohiia ta konstruiuvannia v elektronii aparatury. 2007. Odesa, № 2 (68), S. 38–41 (in Ukrainian).

[4]. I. I. Shumljansky. Horn radiators of complex configuration. Copyright. 1993 by World Scientific Publishing Singapore, New Jersey, London, Hon Kong. Co. Pte. Ltd.

[5]. Volkov I. A., Cherenkov V. S. Pryblyzni formuly ekvivalentnoho poverkhnevoho impedansu kanavky // Naukovi pratsi ONAZ im. O. S. Popova, 2004 № 1. DOI: 10. 1007/BF00990497 (in Ukrainian).

[6]. Andrey A. Yelizarov, Yuriy N. Pchel'nikov and Ruslan V. Shaymardanov.

Electro-Dynamic Analysis of Slow-Wave Structure Formed by Ribbed Coaxial Line // Vacuum Electronics Conference, IEEE International, Monterey, CA, USA., 22–24 April 2014. DOI: 10. 1109 / IVEC. 2014. 6857607

[7]. Ю. N. Pchel'nikov and David S. Nyce. Slow-Wave Structures-Based Method of Measurements // IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 51, NO. 5, October 2002. DOI: 10. 1109/TIM. 2002. 806011

[8]. Lepikh Ya. I., Karpenko A. O. Vyprominiuvach elektromagnitnykh NVCh khvyly // Patent na vynakhid U A № 102183, MPK (2013. 01) N01 Q 13/02 (in Ukrainian).

Стаття надійшла до редакції 22.11.2023 р.

UDC 621.396.677.73

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.4.294631>

## METHOD OF REDUCING THE LEVEL OF BACK RADIATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES OF APERTURE ANTENNAS

*Ya. I. Lepikh, A. O. Karpenko*

Interdepartmental Scientific-Educational Physics and Technical Center of MES and NAS of Ukraine  
at the Odesa I. I. Mechnikov National University  
e-mail: [ndl\\_lepikh@onu.edu.ua](mailto:ndl_lepikh@onu.edu.ua)

### Summary

A method has been proposed and developed that allows you to significantly reduce the level of back radiation of electromagnetic waves of aperture-type antennas of any design. The essence of the method is the excitation of slowed surface waves on the outer side of the edge of the antenna aperture, which are in antiphase with electromagnetic waves of back radiation. Slowed surface waves are formed by an impedance metal comb, which performs the function of a retarding system, placed on the outer side of the opening edge of the antenna. The dependence of the formed characteristics of the electromagnetic field on the design parameters of the impedance comb is shown.

The method was tested on the horn-slot ship antenna of the “Mius” type navigation radar station. The results of modeling and calculation of the directional pattern (DP) of the antenna confirm that the proposed method allows to reduce the level of the rear lobe of the directional pattern of the horn-slit antenna with an impedance comb by approximately 1.4 times.

**Keywords:** electromagnetic waves, aperture type antennas, impedance structures, directional diagram

УДК 621.396.677.73

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.4.294631>

## МЕТОД ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ЗВОРОТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ АПЕРТУРНИХ АНТЕН

*Я. І. Лепіх, А. О. Карпенко*

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН та НАН України  
при Одеському національному університеті імені І. І. Мечникова  
e-mail: [ndl\\_lepikh@onu.edu.ua](mailto:ndl_lepikh@onu.edu.ua)

### Реферат

Запропоновано та розроблено метод, що дозволяє суттєво знизити рівень зворотного випромінювання електромагнітних хвиль антен апертурного типу будь-якої конструкції. Суть методу полягає у збудженні уповільнених поверхневих хвиль на зовнішній стороні кромки апертури антени, що знаходяться у протифазі з електромагнітними хвилями зворотного випромінювання. Уповільнені поверхневі хвилі формуються імпедансною металевою гребінкою, що виконує функцію уповільнюючої системи, розміщеної на зовнішній стороні кромки розкриття антени. Показано залежність формованих характеристик електромагнітного поля від конструктивних параметрів імпедансного гребінки.

Метод апробований на рупорно-щілинній судновій антені навігаційної радіолокаційної станції типу «Міус». Результати моделювання та розрахунку діаграми спрямованості (ДС) антени підтверджують, що запропонований метод дозволяє приблизно в 1,4 рази знизити рівень задньої пелюстки діаграми спрямованості рупорно-щілинної антени з імпедансним гребінцем.

**Ключові слова:** електромагнітні хвилі, антени апертурного типу, імпедансні структури, діаграма спрямованості