

Н. М. Карашук¹
С. О. Соболенко¹
І. С. Григор'єв¹

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА СТОЯЧОЇ ХВИЛІ ЗА НАПРУГОЮ ПРЯМОКУТНОГО ХВИЛЕВОДУ З ПОЗДОВЖНЬОЮ ЩІЛИНОЮ ЗА ЗМІНИ ЇЇ РОЗМІРІВ ТА ДОВЖИНИ ШТИРЯ ЗБУДЖЕННЯ

¹Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

Хвилевідно-щілинні антени достатньо широко застосовуються в бортових радіотехнічних системах. Вимогами до таких антен є зменшення масогабаритних показників та втрат потужності в антенно-фідерній системі. Для виконання вказаних вимог можна, зокрема, застосовувати прямокутний хвилевід із поздовжньою щілиною (якщо щілину зручно прорізати вздовж ліній поверхневого струму), як слабоспрямований випромінювач або елемент хвилевідно-щілинної антенної решітки. В такому випадку для збудження поздовжньої щілини та її налаштування застосовується реактивний штир. Для практичної реалізації такої антени важливо забезпечити добре узгодження щілини, яка збуджується штирем, як з хвилеводом, так і з вільним простором. Тому в статті досліджено можливість зменшення коефіцієнта стоячої хвилі за напругою в прямокутному хвилеводі з поздовжньою щілиною та штирем збудження. Отримано експериментальні дані щодо зміни коефіцієнта стоячої хвилі за напругою в прямокутному хвилеводі за зміни розмірів поздовжньої щілини (довжини, ширини), довжини штиря збудження, а також положення короткозамкненої мідної заглушки, яка закорочує хвилевід. Зокрема, для прямокутного хвилеводу з розмірами поперечного перерізу 23 мм на 10 мм, який працює на основному типі коливань H_{10} , отримано графіки залежностей коефіцієнта стоячої хвилі за напругою від зміни довжини штиря збудження за різної довжини щілини та фіксованих значень її ширини для положень короткозамкненої мідної заглушки 1,98 см та 2,97 см. Оптимальні розміри щілини та довжини штиря збудження для забезпечення мінімального коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (не більше 3) та фіксованого положення короткозамкненої мідної заглушки зведені в таблицю. За довжини штиря збудження 0,7 см, довжини щілини 1,3 см, її ширини 1,5 мм та положення короткозамкненої мідної заглушки 1,98 см коефіцієнт стоячої хвилі за напругою не перевищує 1,4. Результати експериментальних досліджень не суперечать відомим теоретичним та можуть бути використані для проектування та налаштування щілинних антен у прямокутному хвилеводі, які збуджуються штирем.

Ключові слова: прямокутний хвилевід, поздовжня щілина, коефіцієнт стоячої хвилі за напругою, штир збудження.

Вступ

Як бортові антени літальних апаратів використовують такі їх типи, що задовольняють специфічним вимогам. Перевагу щодо суміщення випромінювальної поверхні із зовнішніми обводами корпусу літального апарата (конформності) мають хвилевідно-щілинні антени. Достатньо часто застосовуються поперечні прямокутні щілини, як елементи випромінювання. Проте, з метою забезпечення конформності, зокрема виникають потреби використання поздовжніх щілин, розміщених посередині широкої стінки прямокутного хвилеводу. Для випромінювання потужності поздовжньою щілиною, необхідно її змістити з центру широкої стінки хвилеводу або розмістити під певним кутом. Порядок розрахунку електродинамічних характеристик поперечної прямокутної щілини зі зміною кута її розміщення та результати їх моделювання описано в [1], [2]. Для випро-

мінювання потужності поздовжньою щілиною, розміщеною посередині широкої стінки прямокутного хвилеводу, застосовується штир збудження. Аналіз робіт [3]—[8] показав, що зазвичай наводяться результати експериментальних вимірювань для прямокутних хвилеводів з поперечними та поздовжніми щілинами, зміщеними з центру широкої стінки, які збуджуються поверхневими струмами. Проте, експериментальні дослідження електродинамічних характеристик прямокутного хвилеводу з поздовжньою щілиною, розміщеною посередині широкої стінки прямокутного хвилеводу, та штирем, у літературі висвітлені недостатньо.

Тому актуальними є експериментальні дослідження характеристик поздовжньої щілини в прямокутному хвилеводі, яка збуджується штирем зі змінною довжиною. Щілина в такому разі може мати довжину, відмінну від резонансної, та налаштовуватися за допомогою цього штиря для узгодження із хвилеводом та вільним простором. Отримані дані можуть бути використані для обґрунтування можливості й доцільності застосування прямокутного хвилеводу з поздовжньою щілиною та штирем збудження як бортової хвилевідно-щілинної антени сантиметрового діапазону хвиль.

Метою роботи є експериментальне дослідження коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) прямокутного хвилеводу з поздовжньою щілиною за зміни її розмірів та довжини штиря збудження для забезпечення узгодження щілини з прямокутним хвилеводом та вільним простором. Необхідно отримати оптимальні вказані розміри, що забезпечують мінімальний КСХН.

Результати дослідження

Для проведення досліджень розроблено і виготовлено експериментальний зразок антени (рис. 1). На рис. 1 показаний зовнішній вигляд прямокутного хвилеводу з поздовжньою щілиною та штирями.

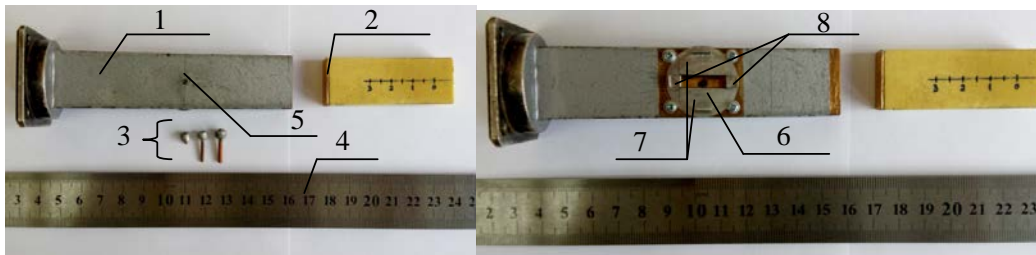


Рис. 1. Прямокутний хвилевід з поздовжньою щілиною та штирями: 1 — відрізок прямокутного хвилеводу, що має розміри перерізу (23×10) мм з фланцем; 2 — мідна заглушка для короткого замикання хвилеводу та мірна лінійка для визначення місцезнаходження заглушки в хвилеводі; 3 — два мідні гвинти та заглушка, для встановлення в отвір широкої стінки хвилеводу 5; 4 — вимірювальна лінійка; 6 — вставка в широкую стінку хвилеводу у вигляді диска з поздовжньою щілиною; 7 — дві металеві пластини на вставці для зміни ширини щілини; 8 — дві металеві пластини на вставці для зміни довжини щілини

Таким чином, виготовлений експериментальний зразок антени дозволяє змінювати: ширину та довжину щілини; довжину штиря збудження та його положення; кут повороту щілини через 5°, оскільки вставку в широкую стінку хвилеводу у вигляді диска з щілиною можна повертати.

Для дослідження КСХН прямокутного хвилеводу застосовано вимірювальну установку, зовнішній вигляд якої показаний на рис. 2.

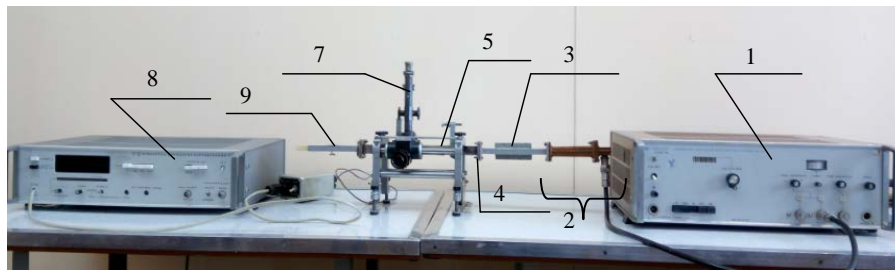


Рис. 2. Зовнішній вигляд вимірювальної установки для дослідження КСХН прямокутного хвилеводу з поздовжньою щілиною та штирем

З виходу генератора 1 (генератор сигналів високочастотний Г4-111) через коаксіальний кабель, коаксіально-хвилеводний перехід 2, вентиль 3 електромагнітні амплітудно модульовані коливання надходять на вхід вимірювальної лінії 5, до виходу якої приєднано досліджувану антену 9. З виходу детектора 7 вимірювальної лінії сигнал надходить на вимірювальний прилад (Вимірю-

вач відношення напруг В8-7). Генератор сигналів високочастотний Г4-111 працює в смузі частот $\Delta f = (6 \dots 17,85)$ ГГц [9]. Для усунення впливу навантаження на частоту та потужність генератора сигналів високочастотного Г4-111 встановлено феритовий вентиль В-2. За допомогою вимірювальної лінії на базі прямокутного хвильоводу визначається коефіцієнт стоячої хвилі за напругою.

Непряме опосередковане експериментальне вимірювання проведено з такими похибками.

Коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН) знаходимо за результатами i -го вимірювання за формулою

$$\text{КСХН}_i = \sqrt{\alpha_{\text{макс}i} / \alpha_{\text{мін}i}}, \quad (1)$$

де $\alpha_{\text{макс}i}, \alpha_{\text{мін}i}$ — максимальні та мінімальні значення квадратів амплітуд електромагнітної хвилі (ЕМХ) у i -х перерізах уздовж хвильоводу вимірювальної лінії.

Значення КСХН розраховуємо як середнє арифметичне за трьома вимірюваннями

$$\text{КСХН} = \sum_{i=1}^3 \text{КСХН}_i, \quad (2)$$

де i — номер вимірювання.

Основна похибка вимірювання відношення напруг відносно точки 1,000 вимірювального приладу В8-7, якщо відношення напруг, яке вимірюється, більше одиниці ($NX > 1$), відповідно до виразу $\pm [0,3 + 0,6(NX - 1)]$, % [10], дорівнює 0,1 %. Відносна похибка вимірювання КСХН дорівнює $\delta_{\text{КСХН}} = 1 \pm 0,0175$ [11]. Похибка індикації зонда вимірювальної лінії 10 мкм [12].

Розміри щілини, штиря, місця розміщення щілини вибираємо з урахуванням довжини хвилі в прямокутному хвильоводі, розрахованої за формулою з роботи [3] за $a = 2,3$ см, $\lambda = 3$ см для хвилі типу H_{10} , яка дорівнює $\lambda_x = 3,96$ см.

На рис. 3 показані результати вимірювання зміни КСХН у прямокутному хвильоводі від довжини штиря збудження $l_{\text{шт}}$ за різної ширини щілини Δ . Довжина щілини $l_{\text{щл}} = 1,5$ см та положення короткозамкнутої мідної заглушки $l_3 = 1,98$ см не змінювалися. На рис. 4—6 показано графіки залежності КСХН у прямокутному хвильоводі від довжини штиря збудження $l_{\text{шт}}$ за різної довжини щілини $l_{\text{щл}}$, якщо $\Delta = 5$ мм (рис. 4), $\Delta = 4$ мм (рис. 5), $\Delta = 1,5$ мм (рис. 6). Положення короткозамкнутої мідної заглушки $l_3 = 1,98$ см не змінювалося.

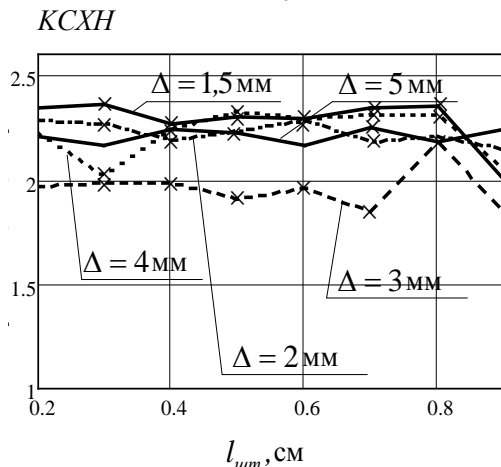


Рис. 3. Залежності КСХН ($l_{\text{шт}}$) за різних значень Δ та $l_{\text{щл}} = 1,5$ см, $l_3 = 1,98$ см

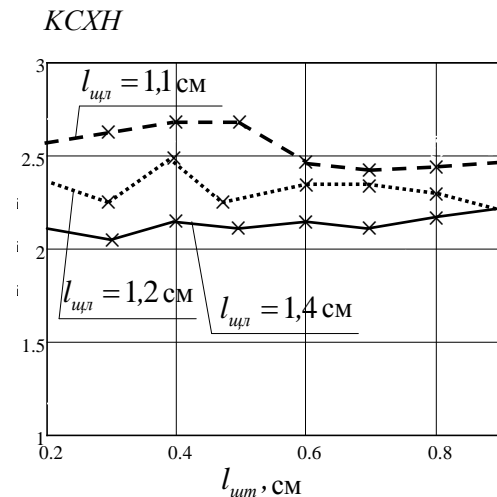


Рис. 4. Залежності КСХН ($l_{\text{шт}}$) за різних значень $l_{\text{щл}}$ та $\Delta = 5$ мм, $l_3 = 1,98$ см

З графіків рис. 3—6 випливає, що довжина щілини найбільше впливає на узгодження. Найменше значення $\text{КСХН} < 1,5$ досягається за довжини щілини $l_{\text{щл}} = 1,4$ см, тобто, $l_{\text{щл}} = 0,46\lambda$ і $\Delta = 4$ мм, а також $l_{\text{щл}} = 1,3$ см, тобто, $l_{\text{щл}} = 0,43\lambda$ та $\Delta = 1,5$ мм. Зміна довжини щілини на $l_{\text{щл}} = 0,13\lambda$ призводить до збільшення КСХН удвічі. Зміна довжини штиря в межах $l_{\text{шт}} = (0,2 \dots 0,7)$ мм несуттєво впливає на узгодження. Ширина щілини менше впливає на узгодження.

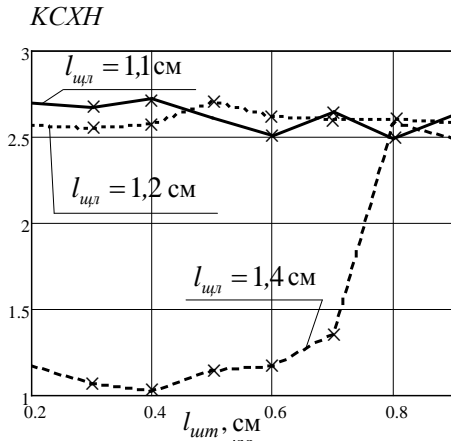


Рис. 5. Залежності КХСН ($l_{шт}$) за різних значень $l_{щл}$ та $\Delta = 4$ мм, $l_3 = 1,98$ см

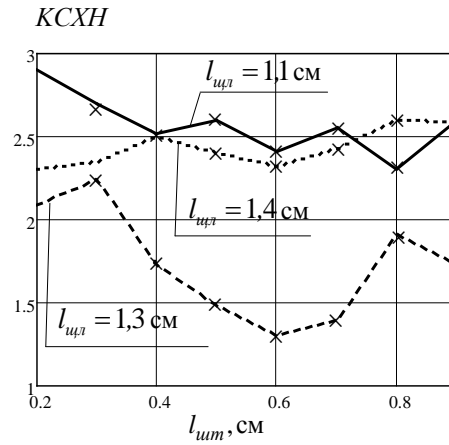


Рис. 6. Залежності КХСН ($l_{шт}$) за різних значень $l_{щл}$ та $\Delta = 1,5$ мм, $l_3 = 1,98$ см

Найменший КХСН отримано, за ширини щілини $\Delta = 3$ мм або $\Delta = 0,6\lambda$. Зменшення або збільшення ширини щілини на $\Delta = 0,2\lambda$ призводить до збільшення КХСН у середньому на 15 %.

Також проведено дослідження антени для випадку, коли штир і центр щілини розташовані на відстані 2,97 см ($0,75\lambda$) від заглушки, яка замикає хвилевід. На рис. 7—10 показано результати вимірювання зміни КХСН у прямокутному хвилеводі від довжини штиря збудження $l_{шт}$ за різної довжини щілини $l_{щл}$, якщо $\Delta = 5$ мм (рис. 7), $\Delta = 3$ мм (рис. 8), $\Delta = 2$ мм (рис. 9), $\Delta = 1,5$ мм (рис. 10).

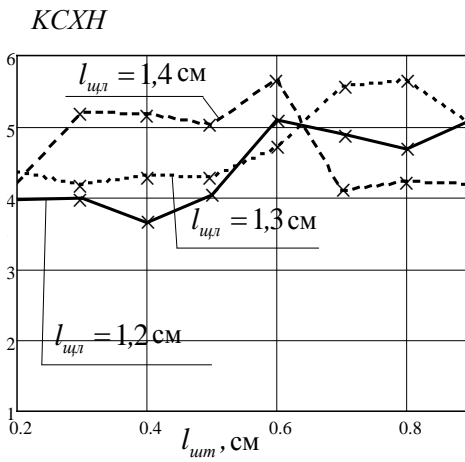


Рис. 7. Залежності КХСН ($l_{шт}$) за різних значень $l_{щл}$ та $\Delta = 5$ мм, $l_3 = 2,97$ см

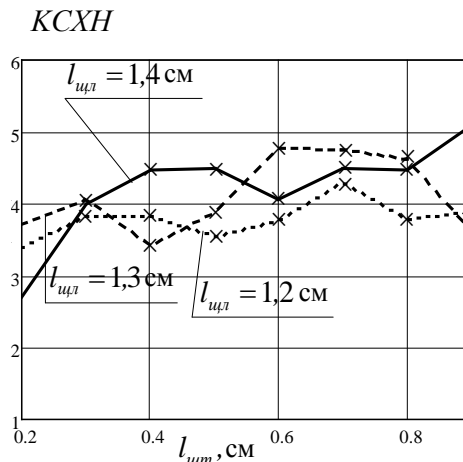


Рис. 8. Залежності КХСН ($l_{шт}$) за різних значень $l_{щл}$ та $\Delta = 3$ мм, $l_3 = 2,97$ см

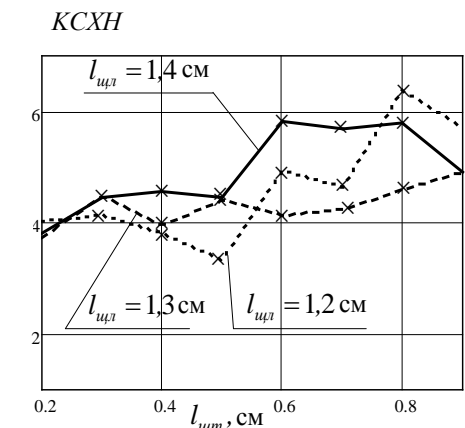


Рис. 9. Залежності КХСН ($l_{шт}$) за різних значень $l_{щл}$ та $\Delta = 2$ мм, $l_3 = 2,97$ см

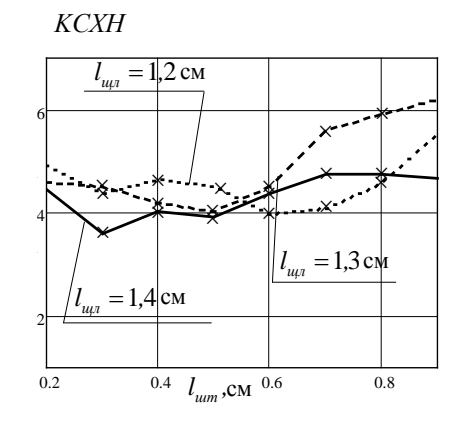


Рис. 10. Залежності КХСН ($l_{шт}$) за різних значень $l_{щл}$ та $\Delta = 1,5$ мм, $l_3 = 2,97$ см

Згідно з рис. 7—10, у разі зменшення площі щілини на 30 %, значення КСХН збільшується в середньому в 1,8 рази, за зміни довжини штиря збудження. Довжину штиря збудження доцільно вибирати в межах $l_{шт} = (0,5 \dots 0,7)$ см. Це пояснюється тим, що зі збільшенням довжини штиря значення його хвильового опору зростає [10], відповідно зростає напруга вздовж штиря, що призводить до збільшення амплітуди хвиль, збуджених штирем у прямокутному хвилеводі, та потужності випромінювання щілини. На значення КСХН має вплив положення короткозамкненої мідної заглушки відносно щілини і штиря. Якщо $l_3 = 1,98$ см то за всіх умов дослідження КСХН змінюється від 1,1 до 2,7. Коли $l_3 = 2,97$ см, то КСХН збільшується і набуває значення від 2,8 до 6,2. Тобто доцільно вибирати $l_3 = 0,5\lambda$, що не суперечить такій умові [5]:

$$l_3 = (2n - 1)(\lambda_x / 4), \quad (3)$$

де $n = 1, 2, 3$.

За результатами аналізу рис. 3—10 можна скласти таблицю з оптимальними розмірами поздовжньої щілини та довжини штиря збудження за критерієм мінімального КСХН для зменшення втрат потужності сигналу.

Оптимальні розміри щілини та довжини штиря для забезпечення мінімального КСХН за фіксованого положення короткозамкненої мідної заглушки

l_3 , см	Δ , мм	$l_{щл}$, см	$l_{шт}$, см	КСХН
1,98	1,5	1,3	0,6; 0,7	1,3; 1,4
	3	1,5	0,7	1,8
	4	1,4	0,4; 0,7	1,05; 1,4

За результатами експериментальних досліджень доцільно зазначити, що краще застосовувати антену з положенням короткозамкненої мідної заглушки $l_3 = 1,98$ см, оскільки значення КСХН < 3 за всіх вибраних для дослідження розмірів щілини та штиря. У разі $l_3 = 2,97$ см величина КСХН > 3 . Оптимальні розміри щілини та довжини штиря збудження для забезпечення мінімального КСХН за фіксованого положення короткозамкненої мідної заглушки $l_3 = 1,98$ см такі: $l_{шт} = 0,7$ см, $l_{щл} = 1,3$ см, $\Delta = 1,5$ мм.

Порівняння отриманих результатів з результатами теоретичних досліджень впливу зміни довжини, ширини, кута розміщення прямокутної поперечної щілини, прорізаної в прямокутному хвилеводі з хвилею типу H_{10} з розмірами поперечного перерізу 23 мм на 10 мм, на зміну КСХН (через коефіцієнт відбиття), поданих в [1], [2], таке. Для отримання значення КСХН < 3 доцільно вибирати такі геометричні розміри прямокутної поперечної щілини: ширина (3...5) % від довжини хвилі; довжина близька до резонансної з урахуванням укорочення; кут розміщення $0^\circ \dots 30^\circ$.

Отже, за КСХН повздовжня щілина зі штирем збудження має перевагу над поперечною щілиною за діапазоном частот та незмінним розміщенням.

Висновки

Таким чином, повздовжню щілину зі штирем збудження доцільно застосовувати як слабоспрямований випромінювач або як елемент хвилевідно-щілинних бортових антенних решіток, які задовольняють вимогу конформності. У результаті експериментальних досліджень встановлено умови узгодження поздовжньої щілини, що збуджується штирем у прямокутному хвилеводі, за яких КСХН не перевищує 3. Знайдено розміри антени, за яких КСХН у хвилеводі живлення не більше 1,5. Відносна похибка вимірювання КСХН дорівнює $\delta_{КСХН} = 1 \pm 0,0175$.

У подальшому необхідно експериментально дослідити діаграму спрямованості антени за знайдених оптимальних розмірів щілини та довжини штиря збудження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Н. М. Карашук, «Методика розрахунку електродинамічних характеристик щілини довільних розмірів та положення, прорізаної в стінках прямокутного хвилеводу,» *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*, вип. 13, с. 73-84, 2016.

[2] Н. М. Карашук, О. П. Черкес, і О. Л. Сидорчук, «Дослідження залежності електродинамічних характеристик щілини, прорізаної у прямокутному хвилеводі, від зміни її розмірів та положення,» *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*, № 1 (79), с. 63-74, 2017.

- [3] В. Н. Кочин, «Моделирование несимметричного вертикального вибратора конечной толщины при осесимметричном возбуждении», *Радиофизика и астрономия*, т. 7, № 1, с. 17-28, 2002.
- [4] Ю. Я. Юров, и К. Ф. Лавренко, «Экспериментальная проверка применения приближенной теории тонкого проводника в волноводе», *Радиоэлектроника*, т. 13, № 9, с. 1047-1054, 1970.
- [5] Я. Н. Фельд, и Л. С. Бененсон, *Антенно-фидерные устройства*, ч. 2., Москва: изд. ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1959, 550 с.
- [6] Г. З. Айзенберг, *Антенны ультракоротких волн*, моногр. Москва: Гос. изд-во лит. по вопр. связи и радио, 1957, 699 с.
- [7] V. A. Katrich, "On Calculation of Radiation Field from Complex-Shaped Slot in Rectangular Waveguide," *Telecommunication and Radio Engineering*, vol. 53, no 4-5, pp. 83-87, 1999.
- [8] А. И. Жакин, В. А. Катрич, и С. А. Мартыненко, «Об излучении узкой криволинейной щели в прямоугольном волноводе», *Вісник Дніпропетр. ун-ту. Фізика. Радіоелектроніка*, № 6, с. 89-99, 2000.
- [9] *Генераторы сигналов высокочастотные Г4-111, Г4-111/а, Г4-111/б*. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 3.260.080 ТО, 1988, 131 с.
- [10] *Измеритель отношения напряжений В8-7*, Техническое описание и инструкция по эксплуатации, 1984, 99 с.
- [11] С. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук, В. М. Ванько, і Т. Г. Бойко, «Метрологія та вимірювальна техніка», Львів, Україна: вид-во Бескид біт, 2003, 544 с.
- [12] *Измерительная волноводная линия типа Р1-4 (ИВЛУ-140)*. Описание и инструкция по эксплуатации, 1965, 17 с.

Рекомендована кафедрою інформаційних радіоелектронних технологій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 4.02.2022

Карацук Наталія Миколаївна — канд. техн. наук, доцент, старший викладач кафедри телекомунікацій та радіотехніки, e-mail: knm7@ukr.net ;

Соболенко Сергій Олександрович — канд. техн. наук, заступник начальника кафедри телекомунікацій та радіотехніки, e-mail: sas100974@gmail.com ;

Григор'єв Ігор Сергійович — начальник навчально-лабораторного комплексу кафедри телекомунікацій та радіотехніки, e-mail: grifus1973@gmail.com .

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Житомир

N. M. Karashchuk¹

S. O. Sobolenko¹

I. S. Grigoriev¹

Experimental Research on VSWR of a Rectangular Waveguide with a Longitudinal Slot with a Change in its Dimensions and Excitation Pin Length

¹Zhytomyr Korolov Military Institute

Wave-slot antennas are widely used in on-board radio systems. The requirements for such antennas are to reduce weight and size indicators and power losses in the antenna feed system. To fulfill these requirements, it is possible, in particular, to use a rectangular waveguide with a longitudinal slot (if it is convenient to cut the slot along the surface current lines), as a weakly directional radiator or an element of a slotted waveguide antenna array. In this case, a reactive pin is used to excite the longitudinal slot and adjust it. For the practical implementation of such an antenna, it is important to ensure appropriate matching of the slot excited by the pin, both with the waveguide and with free space. Therefore, in the article, the possibility of reducing the voltage standing wave ratio in a rectangular waveguide with a longitudinal slot and the excitation pin was studied by experimental method. Experimental data are obtained on the change in the voltage standing wave ratio in a rectangular waveguide with a change in the dimensions of the longitudinal slot (length, width), the length of the excitation pin, and the position of the short-circuited copper plug which completes the waveguide. In particular, for a rectangular waveguide with a cross-sectional size of 23 mm by 10 mm, operating on H10 main type of oscillations, graphs were obtained to specify the dependence of the voltage standing wave coefficient on the change in the length of the excitation pin for different slot lengths and fixed values of its width of 1.98 cm and 2.97 cm. The optimal dimensions of the slot and the length of the excitation pin to ensure the minimum voltage standing wave ratio (no more than 3) with a fixed position of the short-circuited copper plug are summarized in the table. With an excitation pin length of 0.7 cm, a slot length of 1.3 cm, a slot width of 1.5 mm, and a position of a short-circuited copper plug of 1.98 cm, the voltage standing wave ratio does not exceed 1.4. The results of experimental studies do not contradict the existing theories and can be used to design and adjust slot antennas in a rectangular waveguide, which are excited by a pin.

Keywords: rectangular waveguide, longitudinal slot, voltage standing wave ratio, excitation pin.

Karashchuk Natalia M. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Senior Lecturer of the Department of Telecommunications and Radio Engineering, e-mail: knm7@ukr.net ;

Sobolenko Sergey O. — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head of the Chair of Telecommunications and Radio Engineering, e-mail: sas100974@gmail.com ;

Grigoriev Igor S. — Head of the Educational and Laboratory Complex of the Chair of Telecommunications and Radio Engineering, e-mail: grifus1973@gmail.com