

# Експериментальне дослідження діаграм спрямованості слабоспрямованих бортових антен

Левченко О. В., Каращук Н. М.

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, м. Житомир, Україна

E-mail: knm7@ukr.net

Наводяться результати експериментального дослідження діаграм спрямованості (ДС) щілини, прорізаної в прямокутному хвилеводі перерізом  $23 \times 10$  мм, яка збуджується штирем у площинах Е та Н на частоті 10 ГГц. Експериментально визначено, що ширина ДС у площині Е дорівнює  $84^\circ$ . Рівень ДС спадає до 20% у напрямках  $\pm 90^\circ$ . У площині Н ДС має ширину  $54^\circ$ , рівень ДС у напрямках  $\pm 90^\circ$  спадає до 5%. Отримані експериментальні ДС у площинах Е та Н не протирічать розрахованим теоретично, при цьому розбіжність не перевищує 7%. Представлені результати експериментального дослідження ДС поздовжньої щілини, прорізаної в прямокутному хвилеводі перерізом  $23 \times 10$  мм із частковим діелектричним заповненням (ЧДЗ), яка збуджується штирем в площинах Е та Н на частоті 7 ГГц. У прямокутний хвилевід вставлені фторопластові пластини (фторопласт Ф4) біля вузьких стінок розмірами  $79 \times 10 \times 2$  мм (Д $\times$ Ш $\times$ В) із відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_r = 2$ . Експериментально визначено, що ширина ДС у площині Е дорівнює  $72^\circ$ , у напрямках  $\pm 90^\circ$  рівень ДС спадає до 25%. У площині Н  $-43^\circ$ , у напрямках  $\pm 90^\circ$  рівень ДС спадає до 7%. Застосування ЧДЗ у прямокутному хвилеводі дозволяє зменшувати геометричні розміри без зміни електричних. Результати досліджень можуть бути використані для проектування і розробки слабоспрямованих бортових антен для радіоканалів сантиметрового діапазону хвиль.

*Ключові слова:* конформні антени; поздовжня щілина; часткове діелектричне заповнення; слабоспрямовані антени; штир збудження

DOI: [10.20535/RADAP.2022.90.5-12](https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.90.5-12)

## Вступ. Постановка проблеми

Застосування безпілотних літальних апаратів (БпЛА) різного призначення останнім часом достатньо швидко зростає [1–4]. Електродинамічні характеристики бортових антен впливають на ряд показників та можливостей відповідних БпЛА [5–7]. Залежно від призначення, в БпЛА можуть використовуватись всепрямовані, слабоспрямовані та спрямовані антени [3, 8]. Всепрямовані та квазі всепрямовані патч-антени, плоскі сегментовані петлеві антени працюють в широкій смузі частот для безпроводного передавання даних по каналах Bluetooth, GPS, WIFI і LTE [3]. Слабоспрямована антена у вигляді пари L-подібних вузьких щілин та пасивного резонатора призначена для бортових систем зв'язку [4]. Використовується широкосмугова слабоспрямована дипольна антена з прорізними щілинами та двома вертикальними випромінювальними пластинами для протікання поверхневих струмів збудження, яка працює в діапазоні частот від 20 МГц до 1200 МГц [10]. Також слід відмітити спрямовану фрактальну антенну решітку (діапазон

частот 1,038–11,916 ГГц [9]), z-щілинні антени для радіовисотомірів дронів та ін. [8]. Серед вказаних та інших типів антен БпЛА в окремих випадках доцільність мають слабоспрямовані щілини, прорізані в прямокутних хвилеводах або елементах корпусу БпЛА.

Отже, той чи інший тип антени БпЛА вибирається залежно від відповідності загальним вимогам за діапазоном робочих частот, поляризацією, спрямованістю, потужністю. Крім того специфічним вимогам – за конформністю та масою.

Для одночасного виконання загальних та специфічних вимог певні переваги мають слабоспрямовані щілини, прорізані в прямокутних хвилеводах або елементах корпусу БпЛА. Щілина "вбудована" в БпЛА, поєднана з конструкцією апарату без погіршення його аеродинаміки, у тому числі унеможливує пошкодження (відламування) антени під час посадки. При цьому саме сантиметровий діапазон хвиль дозволяє розробляти спрямовані (слабоспрямовані) бортові антени з невеликими розмірами. Крім того, для забезпечення слабоспрямованого випромінювання, доцільно застосовувати поздовжню

щілину, прорізану у прямокутному хвилеводі, яка збуджується штирем. Оскільки вона може мати довжину відмінну від резонансної та налаштовуватись за допомогою штиря. Це дає можливість узгоджувати щілину та регулювати її потужність випромінювання. За зменшення робочої частоти без зміни геометричних розмірів прямокутного хвилеводу – поздовжню щілину, прорізану у прямокутному хвилеводі із частковим діелектричним заповненням (ЧДЗ), яка збуджується штирем.

Отже, на сьогодні доцільно розглядати використання в БпЛА поздовжньої щілини прорізаної у стінці прямокутного хвилеводу із ЧДЗ та без нього, яка збуджується штирем, як конформної слабоспрямованої антени сантиметрового діапазону хвиль.

## 1 Аналіз останніх досліджень і публікацій

Характеристики випромінювання прямокутного хвилеводу мають суттєву залежність від зміни його розмірів. Можливість зниження діапазону робочих частот без зміни поперечного перерізу прямокутного хвилеводу досягається за рахунок зміни модифікації ЧДЗ. Представлена удосконалена методика розрахунку антени у вигляді відкритого кінця прямокутного хвилеводу з ЧДЗ та штирем збудження у [11] дозволяє зменшувати геометричні розміри поперечного перерізу хвилеводу (до 61% і більше) за його незмінного електричного розміру та дещо підвищувати спрямованість порівняно із випромінювачем типу відкритий кінець прямокутного хвилеводу.

Отже, ЧДЗ задовольняє вимогу мінімізації геометричних розмірів. Проте ці випромінювачі мають недостатньо добре узгодження із вільним простором та не доцільні у випадку необхідності роботи в малій смузі частот.

Методика розрахунку електродинамічних характеристик щілини довільних розмірів та положення, прорізаної в стінках прямокутного хвилеводу наведена в [12]. За вказаною методикою досліджено залежності електродинамічних характеристик щілини, прорізаної у прямокутному хвилеводі, від зміни її розмірів та положення, результати яких представлені в [13]. Також у [13] надаються рекомендації оптимальних розмірів та положення щілини за критерієм її мінімального коефіцієнта відбиття. Проте, з метою забезпечення більшої спрямованості та смуги частот, доцільно застосовувати поздовжню щілину, яка збуджується штирем. На відміну від поперечних, похилих, криволінійних, гантелеподібних, кутових та ін. щілин [14, 15], теоретичні та експериментальні дослідження електродинамічних характеристик поздовжньої щілини, прорізаної в прямокутному хвилеводі з ЧДЗ та без нього, яка збуджується штирем, у літературі наводяться недо-

статньо. Є ряд методів розрахунку характеристик спрямованості щілин: метод на основі принципу подвійності; метод поверхневих струмів; дифракційний метод; метод еквівалентних схем провідностей; енергетичний метод; метод рекурентних співвідношень; метод послідовних наближень та ін. [16].

За результатами експериментального дослідження коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) прямокутного хвилеводу з поздовжньою щілиною за зміни її розмірів та довжини штиря збудження, представленими в [17], отримані оптимальні розміри щілини, довжини штиря збудження за яких КСХН менше 2. Проте, за визначених оптимальних розмірів, дослідження характеристик випромінювання (діаграм спрямованості (ДС)) не проведено.

Тому актуальним є питання експериментального вимірювання ДС антен, які можуть використовуватись у БпЛА, а саме поздовжньої щілини, прорізаної у прямокутному хвилеводі, яка збуджується штирем, та поздовжньої щілини, прорізаної у прямокутному хвилеводі з ЧДЗ, яка збуджується штирем. Також актуальною є задача оцінювання можливостей застосування вказаних типів випромінювачів для радіоканалів БпЛА.

**Метою роботи є** експериментальне дослідження ДС конформних слабоспрямованих антен сантиметрового діапазону хвиль у вигляді поздовжніх щілин, прорізаних у прямокутному хвилеводі з ЧДЗ та без нього, які збуджуються штирями, з урахуванням оцінки точності методу вимірювання, особливостей конструкції антени та точності експериментальної установки для застосування у радіоканалах БпЛА.

## 2 Виклад основного матеріалу

Для проведення досліджень виготовлено експериментальний зразок антени на основі прямокутного хвилеводу з поздовжньою щілиною та штирями (Рис. 1).

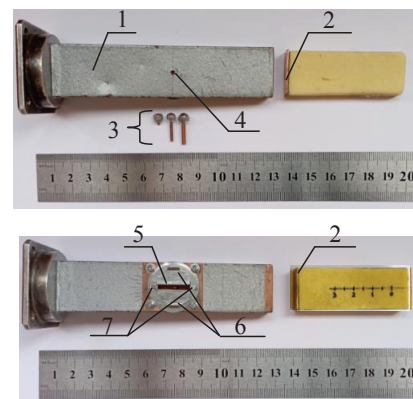


Рис. 1. Експериментальний зразок антени на основі прямокутного хвилеводу з поздовжньою щілиною та штирями

На Рис. 1 позначено: 1 – відрізок прямокутного хвилеводу, що має розміри поперечного перерізу  $23 \times 10$  мм із фланцем; 2 – мідна заглушка для короткого замикання хвилеводу з мірною лінійкою для визначення місцезнаходження заглушки в хвилеводі; 3 – два мідні гвинти та заглушка для встановлення в отвір широкої стінки хвилеводу; 4 – вставка в широку стінку хвилеводу у вигляді диска з поздовжньою щілиною; 6 – дві металеві пластини на вставці для зміни ширини щілини; 7 – дві металеві пластини на вставці для зміни довжини щілини.

Виготовлений експериментальний зразок антени дозволяє змінювати: ширину та довжину щілини; довжину штиря збудження та його положення; кут повороту щілини через  $5^\circ$ , оскільки вставку в широку стінку хвилеводу у вигляді диска з щілиною можна повертати.

Для обраних оптимальних за КСХН параметрів антени на частоті 10 ГГц [17] (ширина щілини  $\Delta = 1,5$  мм, довжина щілини  $l_{шт} = 13$  мм, положення короткозамикаючої мідної заглушки  $l_z = 19,8$  мм, довжини штиря збудження  $l_{шт} = 7$  мм) на базі прямокутного хвилеводу з поздовжньою щілиною та штирем збудження експериментально виміряна ДС.

Для визначення ДС застосовано вимірювальну установку, схема якої зображена на Рис. 2.

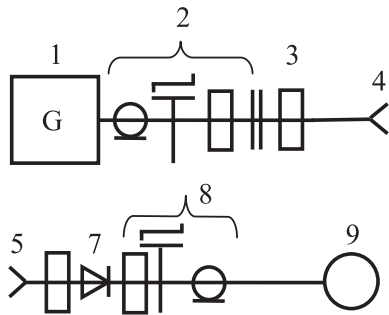


Рис. 2. Схема вимірювальної установки для дослідження ДС поздовжньої щілини, прорізаної в прямокутному хвилеводі з штирем збудження

ДС вимірюється методом обертання досліджуваної антени 5. Передавальний рупор 4 живиться від генератора сигналів високочастотного Г4-111 – 1 і випромінює електромагнітну хвилю (ЕМХ) у напрямку досліджуваної приймальної антени. Остання встановлюється на поворотному столі з лімбом 6 для вимірювання кутів повороту антени. Вихід приймальної антени через детектор 7 з'єднується з вимірювальним приладом В8-7 – 9, який використовується для антенних досліджень. Відстань між приймальною та передавальною антенами відповідає умові дальньої зони і не змінюється в ході обертання приймальної антени. Тому густина потоку потужності поля, яке падає на приймальну антену, також є постійною величиною. Потужність

на виході приймальної антени, яка повернута на кут  $\theta_i$  відносно нульового напрямку, визначаємо за такою формулою [18]:

$$P_{пр i} = \Pi A_{эф} F^2(\theta_i), \quad (1)$$

де  $\Pi$  – густина потоку потужності поля, Вт/м<sup>2</sup>;  $A_{эф}$  – ефективна площа антени, м<sup>2</sup>;  $F^2(\theta_i)$  – нормована ДС за потужністю.

За умови  $\Pi = const$ ,  $A_{эф} = const$ , відповідно до (1) потужність на виході приймальної антени пропорційна нормованій ДС за потужністю. Вимірювання за допомогою В8-7 проводимо шляхом порівняння вхідних величин з усередненими попередніми значеннями. Якщо максимальне значення показань у ході обертання антени шляхом регулювання підсилення встановити на 1,000, то це дозволяє вимірювати нормовані ДС.

Непряме опосередковане експериментальне вимірювання проведено з такими похибками.

Дискретні вимірювання нормованої ДС за потужністю  $|F(\theta_i)|^2$  було проведено п'ять разів і усереднено:

$$|F(\theta_i)|^2 = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 |F(\theta_i)|^2_j, \quad (2)$$

де  $|F(\theta_i)|^2_j$  – значення нормованої ДС за потужністю  $j$ -го вимірювання.

Основна відносна похибка вимірювання відношення напруг відносно точки 1,000 вимірювального приладу В8-7, якщо відношення напруг, яке вимірюється, більше одиниці ( $NX > 1$ ), відповідно до виразу  $\pm [0,3 + 0,6(NX - 1)]$ , % [19], дорівнює 0,1%. Похибка установки частоти генератора сигналів високочастотного Г4-111  $\pm 0,5\%$  [20]. Нестабільність рівня вихідної потужності генератора сигналів високочастотного Г4-111 за незмінних зовнішніх умов, незмінній напрузі живлення за інтервал часу 15 хв. після 30 хв. часу встановлення робочого режиму при роботі генератора в нормальних умовах не більше  $\pm 0,1\%$  [20]. Похибка установки кутів повороту антени на лімбі дорівнює половині ціни поділки  $\pm 1,3^\circ$ . Точність виготовлення експериментального зразка антени лежить в межах технічних допусків, які визначаються вимогами до картини розподілу поверхневих струмів у прямокутному хвилеводі з хвилею типу  $H_{10}$ .

На Рис. 3 і 4 зображено розраховані [16] та експериментальні нормовані ДС, виміряні на частоті 10 ГГц у площинах Е та Н відповідно.

Для проведення досліджень ДС поздовжньої щілини, прорізаної в прямокутному хвилеводі з ЧДЗ та штирем збудження (креслення антени наведено на Рис. 5), виконано експериментальний зразок антени, представлений на Рис. 6.

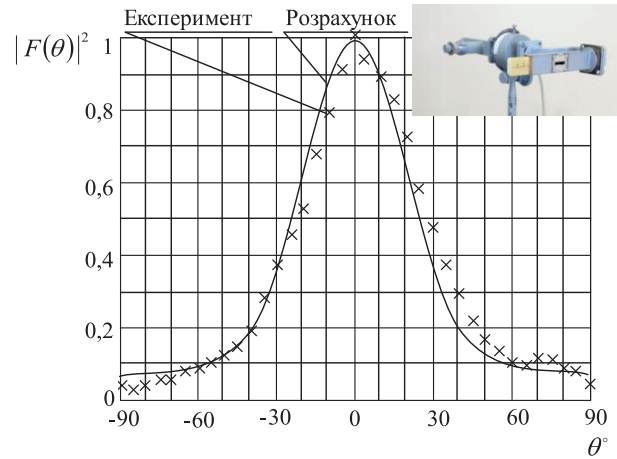
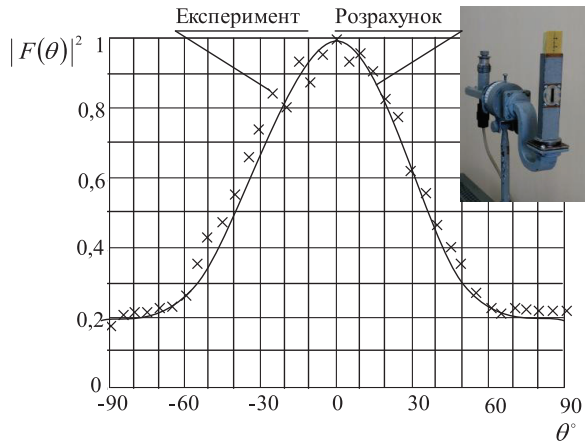


Рис. 3. Розрахована та експериментальна нормовані ДС досліджуваної антени в площині Е за  $\Delta = 1,5$  мм,  $l_{щл} = 13$  мм,  $l_3 = 19,8$  мм,  $l_{шт} = 7$  мм

Рис. 4. Розрахована та експериментальна нормовані ДС досліджуваної антени в площині Н за  $\Delta = 1,5$  мм,  $l_{щл} = 13$  мм,  $l_3 = 19,8$  мм,  $l_{шт} = 7$  мм

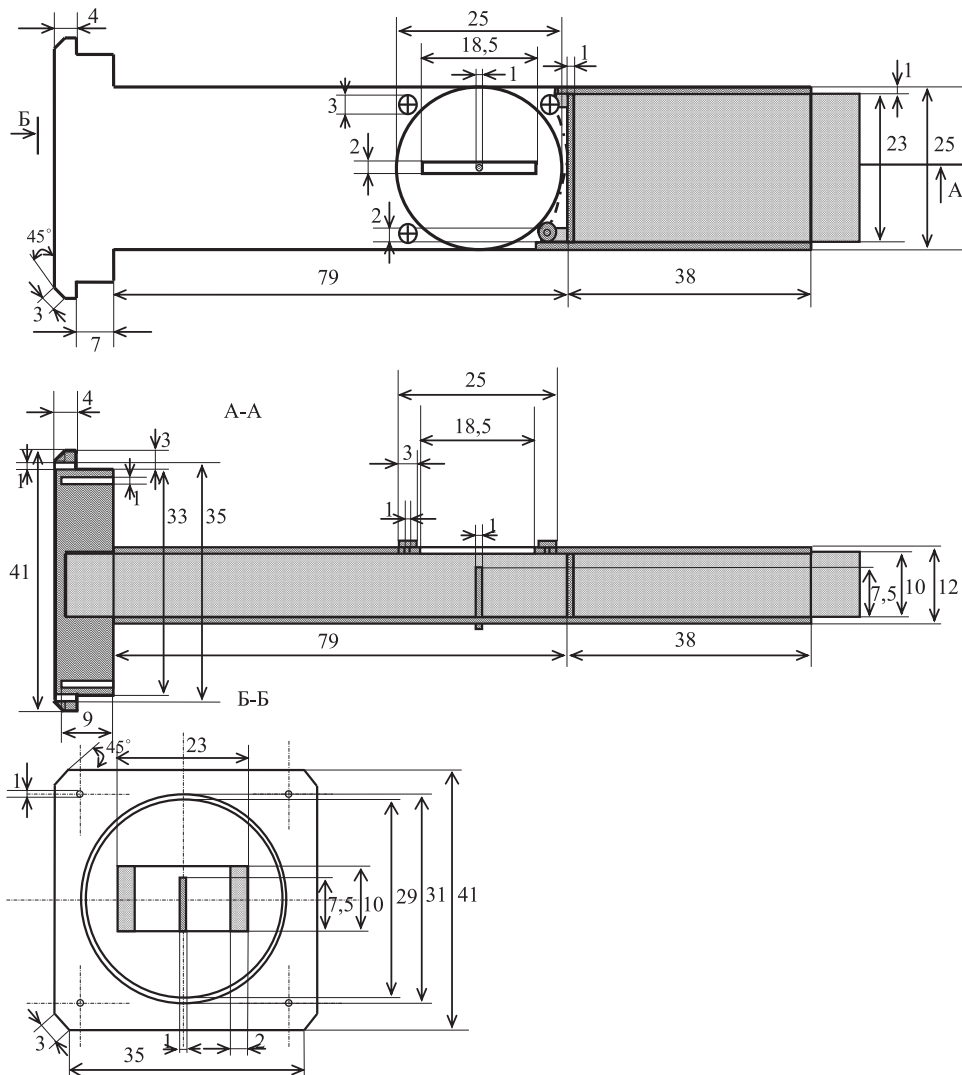


Рис. 5. Креслення експериментального зразку антени у вигляді прямокутного хвильоводу з ЧДЗ із поздовжньою щілиною та штирем збудження

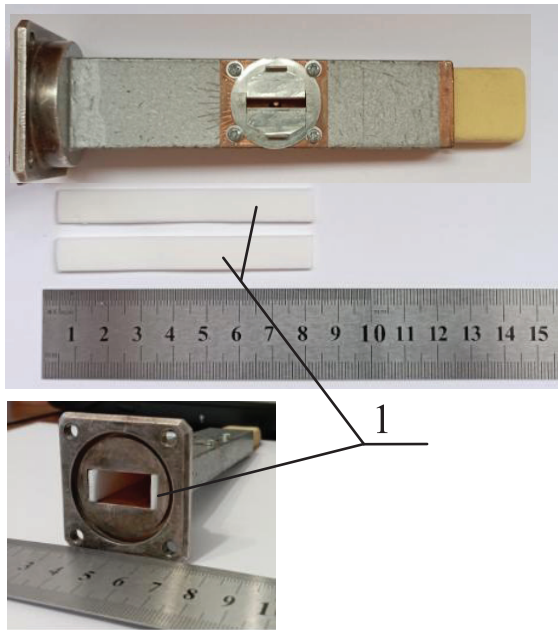


Рис. 6. Експериментальний зразок антени у вигляді прямокутного хвильоводу з ЧДЗ із поздовжньою щілиною та штирем збудження

У прямокутний хвильвід (Рис. 6) вставлено діелектричні пластини – 1. Розміри діелектричних пластин  $79 \times 10 \times 2$  мм (Д $\times$ Ш $\times$ В), виготовлені з фторопласту Ф4 із відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_r = 2$  [21].

Оскільки відносна діелектрична проникність фторопласту Ф4  $\epsilon_r = 2$ , тоді діапазон робочих частот прямокутного хвильоводу з ЧДЗ та перерізом  $23 \times 10$  мм із поздовжньою щілиною та штирем збудження знизиться від 8–12 ГГц до 5,6–8,5 ГГц [21]. За принципом електродинамічної подібності, довжина та ширина щілини (Рис. 6) для середньої частоти діапазону 7 ГГц, дорівнюють  $l_{щл} = 18,5$  мм,  $\Delta = 2$  мм. Довжина штиря збудження  $l_{шт} = 7,5$  мм. Положення короткозамкнутої мідної заглушки  $l_3 = 38$  мм.

ДС поздовжньої щілини, прорізаної у прямокутному хвильоводі з ЧДЗ, яка збуджується штирем, вимірюється методом обертання приймальної досліджуваної антени (Рис. 2). Вона під'єднується до хвильоводного тракту з розмірами поперечного перерізу  $23 \times 10$  мм із ЧДЗ. Передавальна рупорна антена живиться хвильоводним трактом із розмірами поперечного перерізу  $28,5 \times 12,5$  мм. На Рис. 7 і 8 зображено експериментальні нормовані ДС, виміряні на частоті 7 ГГц у площинах Е та Н відповідно.

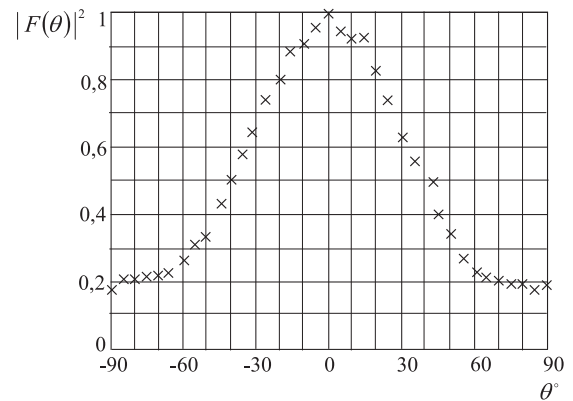


Рис. 7. Експериментальна нормована ДС досліджуваної антени з ЧДЗ у площині Е за  $\Delta = 2$  мм,  $l_{щл} = 18,5$  мм,  $l_3 = 38$  мм,  $l_{шт} = 7,5$  мм

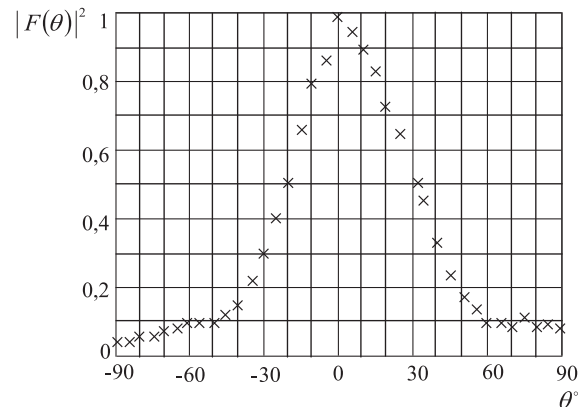


Рис. 8. Експериментальна нормована ДС досліджуваної антени з ЧДЗ у площині Н за  $\Delta = 2$  мм,  $l_{щл} = 18,5$  мм,  $l_3 = 38$  мм,  $l_{шт} = 7,5$  мм

### 3 Аналіз отриманих даних

Відповідно до Рис. 3 ширина ДС дорівнює  $84^\circ$ . Рівень ДС спадає до 20% у напрямках  $\pm 90^\circ$ . Згідно із Рис. 4 експериментальна ДС має ширину  $54^\circ$ , рівень ДС у напрямках  $\pm 90^\circ$  спадає до 5%. На форму та параметри ДС щілини впливає розмір екрана. У площині Е ДС ширша, ніж у площині Н, тому що в площині Е на неї впливають менші розміри широкої стінки прямокутного хвильоводу в поперечній площині відносно його осі, ніж у площині Н, де розміри широкої стінки вздовж осі прямокутного хвильоводу більші. З аналізу наведених графіків (Рис. 3 і 4) випливає, що отримані експериментальні нормовані ДС у площинах Е та Н не протирічають розрахованим теоретично [16].

Відхилення експериментальних даних від розрахованих теоретично в середньому дорівнює 3%,

максимальне – 7%. Зазначені похибки знаходяться в межах похибок виготовлення дослідного зразку антени та вимірювальної апаратури.

Згідно із Рис. 7 ширина ДС дорівнює  $72^\circ$ . Рівень ДС спадає до 25% у напрямках  $\pm 90^\circ$ . Згідно із Рис. 8 експериментальна нормована ДС має ширину  $43^\circ$ , рівень ДС у напрямках  $\pm 90^\circ$  спадає до 7%. На форму та параметри ДС щілини також впливає розмір екрану. Тому в площині Е ДС ширша, ніж у площині Н.

Порівняння наведених графіків Рис. 3 і 4 із графіками на Рис. 7 і 8 показує, що отримані експериментальні нормовані ДС у площинах Е та Н для поздовжньої щілини, прорізаної у прямокутному хвилеводі з ЧДЗ та штирем збудження, вужчі. Це обумовлено впливом діелектричного ефекту, зміною розподілу напруженості електричного поля в поперечному перерізі прямокутного хвилеводу (амплітудний розподіл наближається до рівномірного) та зміною закону розподілу напруги на щілині. Часткове діелектричне заповнення хвилеводу підвищує спрямованість антени та дозволяє зменшувати її геометричні розміри без зміни електричних.

Досліджені поздовжні щілини можна прорізати в носовій частині фюзеляжу БпЛА літакового типу, на крилах, на кілі для формування секторної ДС. Тоді максимум ДС буде спрямований по осі БпЛА, якщо щілина прорізана в фюзеляжі, або відхилений в бік, якщо щілина прорізана в борту або крилі.

## Висновки

1. Експериментальні дослідження виготовлених дослідних зразків антен мають розбіжність між розрахунками та експериментом не більше 7%.

2. Основна відносна похибка вимірювання відношення напруг дорівнює 0,1%. Похибка установки частоти генератора сигналів високочастотного Г4-111  $\pm 0,5\%$ . Нестабільність рівня вихідної потужності генератора сигналів високочастотного Г4-111 в нормальних умовах не більше  $\pm 0,1\%$ . Похибка установки кутів повороту антени на лімбі дорівнює половині ціни поділки  $\pm 1,3^\circ$ . Точність виготовлення експериментального зразку антени лежить в межах технічних допусків.

3. Застосування ЧДЗ в антені у вигляді прямокутного хвилеводу із поздовжньою щілиною та штирем збудження підвищує її спрямованість та дозволяє зменшувати геометричні розміри без зміни електричних.

4. Вибір для БпЛА антени у вигляді прямокутного хвилеводу із поздовжньою щілиною та штирем збудження або антени у вигляді прямокутного хвилеводу із ЧДЗ поздовжньою щілиною та штирем збудження залежить від вимог до смуги робочих частот та маси.

5. Практичним значенням результатів досліджень є можливість проектування конформних сла-

боспрямованих бортових антен сантиметрового діапазону хвиль у вигляді поздовжніх щілин, прорізаних у прямокутному хвилеводі з ЧДЗ та без нього, які збуджуються штирями.

## Перелік посилань

1. Nex F. UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next / F. Nex, C. Armenakis, M. Cramer, D. A. Cuccid, M. Gerke, E. Honkavaara, A. Kukkonen, C. Persello, J. Skaloudh // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2022. – Vol. 184. – PP. 215–242. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006>.
2. Zhao N. Antenna and Propagation Considerations for Amateur UAV Monitoring / N. Zhao, X. Yang, A. Ren, Z. Zhang, W. Zhao et al. // In IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – PP. 28001–28007. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2838062](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2838062).
3. Sung J. Investigation of Antennas Integrated Into Disposable Unmanned Aerial Vehicles / J. Sung, S. Anshuman, S. Benito, B. David, M. Alan // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2018. – Vol. 68, Iss. 1. – PP. 1–8. doi: [10.1109/TVT.2018.2882791](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2882791).
4. Zhang Wei. Design of L-Shaped Open-Slot Antenna Used in UAV Airborne Communication System / Wei Zhang, Junfeng Yang // International Journal of Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 2018. – Article ID 6846193. doi: [10.1155/2018/6846193](https://doi.org/10.1155/2018/6846193).
5. Faiyaz A. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review / A. Faiyaz, J. C. Mohanta, A. Keshari, P. S. Yadav // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2022. – Vol. 47. – PP. 7963–7984. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06738-0>.
6. Nunez J. Analysis of the operating conditions for UAV-based on-board antenna radiation pattern measurement systems / J. Nunez, P. Orgeira-Crespo, C. Ulloa, I. Garcia-Tunon // PLoS ONE. – 2021. Vol. 16, No. 2. – PP. 1–21. doi: [10.1371/journal.pone.0245004](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245004).
7. Kelechi A. H. The Recent Advancement in Unmanned Aerial Vehicle Tracking Antenna: A Review / A. H. Kelechi, M. H. Alsharif, D. A. Oluwale, P. Achimugu, O. Ubadike, et al. // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 16. – PP. 56–62. doi: [10.3390/s21165662](https://doi.org/10.3390/s21165662).
8. Gray D. Structural slotted waveguide antennas for multirotor UAV radio altimeter / D. Gray, X. Xin, Y. Zhu, J. le Kernec // IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). – 2014. – PP. 819–824. doi: [10.1109/ICSPCC.2014.6986311](https://doi.org/10.1109/ICSPCC.2014.6986311).
9. Zhang Z. Design of Multi-band Compatible Trigeminal Monopole Array Antenna for Unmanned Aerial Vehicle / Z. Zhang, B. Lin, Y. Huang, Ye He, H. Chen, M. Zheng, S. Wen // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2209. – PP. 1–4. doi: [10.1088/1742-6596/2209/1/012019](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2209/1/012019).
10. Nosrati M. Broadband Slotted Blade Dipole Antenna for Airborne UAV Applications / M. Nosrati, A. Jafarholi, R. Pazoki and N. Tavassolian // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66, No. 8. – PP. 3857–3864. doi: [10.1109/TAP.2018.2835524](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2835524).

11. Артюшин Л. М. Удосконалена методика розрахунку антени у вигляді відкритого кінця прямокутного хвильоводу з частковим діелектричним заповненням та штирем збудження / Л. М. Артюшин, Ю. О. Колос, Н. М. Каращук, Р. О. Авсієвич, Д. В. Коваль // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. – Київ, 2020. – Вип. № 82. – С. 5–13. doi:10.20535/RADAP.2020.82.5-13.
12. Каращук Н. М. Методика розрахунку електродинамічних характеристик щілини довільних розмірів та положення, прорізаної в стінках прямокутного хвильоводу / Н. М. Каращук // Проблеми створення, випробування та застосування складних інформаційних систем: Збірник наукових праць. – Житомир, ЖВІ, 2016. – Вип. 13. – С. 73–84.
13. Каращук Н. М., Черкес О. П., Сидорчук О. Л. Дослідження залежності електродинамічних характеристик щілини, прорізаної у прямокутному хвильоводі, від зміни її розмірів та положення / Н. М. Каращук, О. П. Черкес, О. Л. Сидорчук // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир, 2017. – № 1 (79). – С. 63–74. doi.org/10.26642/tn-2017-1(79)-63-74.
14. Жакин А. И., Катрич В. А., Мартыненко С. А., Пшеничная С. В. Диаграмма направленности криволинейной щели в прямоугольном волноводе // Вісник Харків. нац. ун-ту. Радіофізика та електроніка. – 2002. – № 544. – С. 50–55.
15. Катрич В. А., Яцук Л. П., Носенко О. Н. Проводимости узкой нерегулярной щели в широкой стенке прямоугольного волновода // Вісник Харків. нац. ун-ту. Радіофізика та електроніка. – 2004. – № 646. – С. 150–154.
16. Катрич В. А. Возбуждение и излучение электромагнитных полей регулярных и нерегулярных волноводно-щелевых структур.: дис. д-ра. физ.-мат. наук: / В. А. Катрич // Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина. – Х.: 2005. – 535 с.
17. Каращук Н. М., Соболенко С. О., Григор'єв І. С. Експериментальне дослідження коефіцієнта стоячої хвилі за напругою прямокутного хвильоводу з позовжною щілиною за зміни її розмірів та довжини штиря збудження / Н. М. Каращук, С. О. Соболенко, І. С. Григор'єв // Вісник ВПП. – 2022. – Вип. 2. – С. 108–113. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-161-2-108-113>.
18. Катрич В. О. Збудження та випромінювання електромагнітних полів регулярними і нерегулярними хвильовідно-щілинними структурами: автореф. дис. д-ра. фіз.-мат. наук: 01. 04. 03. / В. О. Катрич // Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна. – Х.: 2005. – 33 с.
19. Измеритель отношения напряжений В8-7. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 1984. – 99 с.
20. Генераторы сигналов высокочастотные Г4-111, Г4-111/а, Г4-111/б. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 3.260.080 ТО. – 1988. – 131 с.
21. Фторопласт Ф-4 листовый 6-05-810-88. ПП «Стандарт Комплект».
- [2] Zhao, N., Yang, X., Ren, A., Zhang, Z., Zhao, W., et al. (2018). Antenna and Propagation Considerations for Amateur UAV Monitoring. *In IEEE Access*, Vol. 6, pp. 28001–28007. doi:10.1109/ACCESS.2018.2838062.
- [3] Sung, J., Anshuman, S., Benito, S., David, B., Alan, M. (2018). Investigation of Antennas Integrated Into Disposable Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, Iss. 1, pp. 1–8. doi: 10.1109/TVT.2018.2882791.
- [4] Zhang, W., Yang, J. (2018). Design of L-Shaped Open-Slot Antenna Used in UAV Airborne Communication System. *International Journal of Antennas and Propagation*, Vol. 2018, Article ID 6846193. doi: 10.1155/2018/6846193.
- [5] Faiyaz, A., Mohanta, J. C., Keshari, A., Yadav, P. S. (2022). Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 4, pp. 7963–7984. doi:10.1007/s13369-022-66738-0.
- [6] Nunez, J., Orgeira-Crespo, P., Ulloa, C., Garcia-Tunon, I. (2021). Analysis of the operating conditions for UAV-based on-board antenna radiation pattern measurement systems. *PLoS ONE*, Vol. 16, No. 2, pp. 1–21. doi: 10.1371/journal.pone.0245004.
- [7] Kelechi A. H., Alsharif, M. H., Oluwole, D. A., Achimugu, P., Ubadike, O., et al. (2021). Advancement in Unmanned Aerial Vehicle Tracking Antenna: A Review. *Sensors*, Vol. 21, Iss.16, pp. 56–62. doi: 10.3390/s21165662.
- [8] Gray D., Xin, X., Zhu, Y., Kernec, J. le (2014). Structural slotted waveguide antennas for multirotor UAV radio altimeter. *IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, pp.819–824. doi: 10.1109/ICSPCC.2014.6986311.
- [9] Zhang, Z., et al (2021). Design of Multi-band Compatible Trigeminal Monopole Array Antenna for Unmanned Aerial Vehicle. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2209, pp. 1 – 4. doi:10.1088/1742-6596/2209/1/012019.
- [10] Nosrati, M., Jafarholi, A., Pazoki, R., Tavassolian, N. (2018). Broadband Slotted Blade Dipole Antenna for Airborne UAV Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 66, Iss. 8, pp. 3857–3864. doi: 10.1109/TAP. 2018.2835524.
- [11] Artiushyn L. M., Kolos Yu. O., Karashchuk N. M., Avsiievych R. O., Koval D. V. (2020). Improved Calculation Method of Antenna in a Form of Open End of a Rectangular Waveguide with Partial Dielectric Filling and an Excitation Pin. *Visnyk NTUU "KPI".Seriiia Radio-tekhnika, Radioaparotobuduvannia*, Kyiv, Vol. № 82. pp. 5–13. doi:10.20535/RADAP.2020.82.5-13.
- [12] Karashchuk N. M. (2016). Design procedure of electrodynamic characteristics of arbitrary sizes and position slot slitting in rectangular waveguide walls. *Zbirnyk naukovykh prats*, Zhytomyr, ZhVI, Vol. 13, pp. 73–84. [In Ukrainian].
- [13] Karashchuk N. M., Cherkes O. P., Sydorчук O. L. (2017). Research of dependence of electrodynamic characteristics of the crack which have been cut in the rectangular wave guide, from change of its sizes and position. *The Journal of Zhytomyr State Technological University. Engineering*, Vol. 1(79), pp. 63–74. doi: 10.26642/tn-2017-1(79)-63-74.
- [14] Zhakyn A. Y., Katrych V. A., Martynenko S. A., Pshenychnaia S. V. (2002). Radiation pattern of a curved slot in a rectangular waveguide [Dyahramma napravlennosti kryvolyneinoi shchely v priamouholnom volnovode]. *Visnyk Kharkiv. nats. un-tu. Radiofizyka ta elektronika*, Iss. 544, pp. 50–55. [In Russian].

## References

- [15] Katrych V. A., Yatsuk L. P., Nosenko O. N. (2004). Conductivity of a narrow irregular slot in a wide wall of a rectangular waveguide [Provodymosty uzkoj neregularnoi shchely v shyrokoj stenke priamouholnogo volnovoda]. *Visnyk Kharkiv. nats. un-tu. Radiofizyka ta elektronika*, Iss. 646, pp. 150–154. [In Russian].
- [16] Katrych V. A. (2005). Excitation and radiation of the electromagnetic fields of regular and irregular waveguide-crack structures.: diss. of doct. of physical and mathematical sciences [Vozbuzhdenie i izluchenie elektromagnitnykh polej reguljarnykh i neregulyarnykh volnovodno-shchelevykh struktur]. Kharkov, The Kharkov national university of the name V. N. Karazyna, 535 p. [In Russian].
- [17] Karashchuk N. M., Sobolenko S. O., Grigoriev I. S. (2022). Experimental Research on VSWR of a Rectangular Waveguide with a Longitudinal Slot with a Change in its Dimensions and Excitation Pin Length. *Visnyk VPI*, Vol. 2, pp. 108–113. doi: 10.31649/1997-9266-2022-161-2-108-113. [In Ukrainian].
- [18] Katrych V. O. (2005). Excitation and radiation of the electromagnetic fields by regular and irregular wavy-slit structures: abstract of the thesis. dis. dr. fiz.-mat. Sciences: 01. 04. 03. [Zbudzhennia ta vyprominiuvannia elektromagnitnykh poliv rehuliarnykh i neregularnykh khvylevidno-shchilynnykh strukturamy: avtoref. dys. dra. fiz.-mat. nauk: 01. 04. 03.]. *Kharkivskij natsionalnyj universytet imeni V. N. Karazina*, 33 p. [In Ukrainian].
- [19] Voltage radio meter V8-7. Technical description and instruction manual [Izmeritel otnosheniya napryazhenij V8-7. Tehnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii]. 1984, 99 p. [In Russian].
- [20] RF Signal Generators G4-111, G4-111/a, G4-111/b. Technical description and instruction manual 3.260.080 TD [Generatoryi signalov vyisokochastotnyie G4-111, G4-111/a, G4-111/b. Tehnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii 3.260.080 TO]. 1988, 131 p. [In Russian].
- [21] Ftoroplast F-4 sheet 6-05-810-88. *PP «Standart Komplekt»*.

## Experimental Study of Antenna Patterns for On-board Antennas with Extremely Narrow Radiation Patterns

*Levchenko O. V., Karashchuk N. M.*

The publication presents the results of an experimental study of antenna pattern (AP) for a slit cut in a rectangular waveguide with a cross section of  $23 \times 10$  mm, which was excited by a pin in E- and H- planes at a frequency of 10 GHz. It was experimentally discovered that AP width in the E- plane was  $84^\circ$ . The AP level decreased to 20% in the directions  $\pm 90^\circ$ . AP had a width of  $54^\circ$  in the H-plane. The AP level decreased to 5% in the directions  $\pm 90^\circ$ . The experimental AP obtained in the E- and H- planes were consistent with the theoretically calculated ones, while the discrepancy did not exceed 7%. The publication includes as well the results of AP experimental study for a slit cut in a rectangular waveguide with a cross section of  $23 \times 10$  mm, which was excited by a pin in E- and H- planes at a frequency of 7 GHz. Fluoroplastic plates (fluoroplast F4) were inserted into a rectangular waveguide near narrow walls, which sizes were:  $79 \times 10 \times 2$  mm (L $\times$ W $\times$ H) with a relative dielectric constant  $\epsilon_r = 2$ . It was experimentally discovered that AP width was  $72^\circ$  in the E- plane, AP level decreased to 25% in the directions  $\pm 90^\circ$ . For the H-plane  $43^\circ$ , AP level decreased to 7% in the directions  $\pm 90^\circ$ . Partial loading with dielectric material when used in a rectangular waveguide makes it possible to reduce its geometrical sizes without changing the electrical ones.

The research results can be applied to design and develop on-board antennas with extremely narrow radiation patterns used for centimeter wavelength radio channels.

*Keywords:* conformal antennas; longitudinal slit; partial dielectric loading; antennas with extremely narrow radiation patterns; excitation pin