

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-02>

УДК 537.86

## НАДШИРОКОСМУГОВИЙ КОМБІНОВАНИЙ ВІБРАТОРНО-ЩІЛИННИЙ ВИПРОМІНЮВАЧ ТИПУ КЛЕВІНА

**О. М. Думін, В. А. Плахтій, П. Г. Фомін, М. В. Нестеренко**

*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна*

*E-mail: [dumin@karazin.ua](mailto:dumin@karazin.ua)*

Надійшла до редакції 9 жовтня 2020 р.

**Актуальність.** Надширокосмуговий зв'язок є перспективним способом передавання інформації, який використовує короткі електромагнітні імпульси. Він має великий потенціал завдяки більшій, порівняно з іншими способами передавання інформації, пропускній здатності. Це дозволяє створювати надшвидкі бездротові комунікаційні мережі. Але реалізація надширокосмугового зв'язку потребує використання компактних та ефективних імпульсних випромінювачів.

**Мета роботи.** Створити компактну імпульсну комбіновану антену електричного та магнітного типу, надширокосмуговий аналог випромінювача Клевина, в якому необхідні характеристики забезпечуються сильною взаємодією його складових частин. Також необхідно проаналізувати напрямлені, частотні та часові характеристики такого випромінювача.

**Методи.** Використовується числовий метод кінцевих різниць у часовому просторі (FDTD) для остаточного розрахунку та оптимізації випромінювача. Початкова конструкція розрахована у вузькому діапазоні частот методом електро- та магніторухливих сил.

**Результати.** Проведена багатопараметрична оптимізація антени з метою знаходження оптимальної взаємодії між електричним та магнітним випромінювачем при одночасному забезпеченні потрібних напрямлених та частотних характеристик. Отримані діаграми напрямленості в H і E площинах для низки частот, побудовані часові залежності випроміненого поля в цих площинах.

**Висновки.** Аналог випромінювача Клевина може концентрувати енергію випромінювання в заданому напрямку та забезпечувати широкий діапазон робочих частот, що досягає в даній реалізації антени 1 ГГц. Треба відмітити компактність даної структури та наявність низки геометричних параметрів, зміна яких може дозволити покращити часові параметри випромінюваного поля. Надширокосмугова комбінована вібраторно-щілинна структура має декілька напрямків для подальшої оптимізації часових, частотних і напрямлених характеристик відповідно до вимог конкретних застосувань.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** випромінювач Клевина; надширокосмугова щілина; надширокосмугова комбінована вібраторно-щілинна структура; ідеально провідний конус.

## ULTRAWIDEBAND COMBINED VIBRATOR-SLOT CLAVIN TYPE RADIATOR

**O.M. Dumin, V.A. Plakhtiy, P.G. Fomin, M.V. Nesterenko**

*V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine*

**Background.** Ultrawideband communication is a promising way of transmitting information that uses short electromagnetic pulses. It has great potential due to higher bandwidth than other methods of information transfer. This allows you to create ultra-fast wireless communication networks. But the implementation of ultra-wideband communication requires the use of compact and efficient pulsed emitters.

**Object.** Create a compact pulsed combined antenna of electric and magnetic type, ultra-wideband analogue of the Clavin radiator, in which the necessary characteristics are provided by a strong interaction of its components. It is also necessary to analyze the directional, frequency and time characteristics of such a radiator.

**Methods:** The numerical method of finite differences in time domain (FDTD) is used for the final calculation and optimization of the radiator. The initial design is calculated in a narrow frequency range by the method of electric and magnetomotive forces.

**Results.** The multiparameter optimization of the antenna is carried out in order to find the optimal interaction between the electric and magnetic emitter while providing the required directional and frequency characteristics. The radiation patterns in the H and E planes for a number of frequencies are obtained, and the time dependences of the radiated field in these planes are constructed.

**Conclusions.** The analog of the Clavin radiator can concentrate the energy of the radiation in a given direction and provide a wide range of operating frequencies, which in this implementation of antenna reaches 1 GHz. It should be noted the compactness of this structure and the presence of a number of geometric parameters, the change of which can improve the time parameters of the radiated field. The ultra-wideband combined vibrator-slot structure has several directions for further optimization of time, frequency and directional characteristics in accordance with the requirements of specific applications.

**KEY WORDS:** Clavin radiator; ultrawideband slot; ultrawideband combined vibrator-slot structure; perfectly conducting cone.

## ШИРОКОПОЛОСНЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ВИБРАТОРНО-ЩЕЛЕВОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ТИПА КЛЕВИНА

О. Н. Думин, В. А. Плахтий, Ф. Г. Фомин, М. В. Нестеренко

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина*

**Актуальность.** Сверхширокополосная связь является перспективным способом передачи информации, который использует короткие электромагнитные импульсы. Она имеет большой потенциал благодаря большей по сравнению с другими способами передачи информации пропускной способности. Это позволяет создавать сверхбыстрые беспроводные коммуникационные сети. Но реализация сверхширокополосной связи требует использования компактных и эффективных импульсных излучателей.

**Цель работы.** Создать компактную импульсную комбинированную антенну электрического и магнитного типа, сверхширокополосный аналог излучателя Клевина, в котором необходимые характеристики обеспечиваются сильным взаимодействием его составных частей. Также необходимо проанализировать направленные, частотные и временные характеристики такого излучателя.

**Методы.** Используется численный метод конечных разностей во временной области (FDTD) для окончательного расчета и оптимизации излучателя. Начальная конструкция рассчитана в узком диапазоне частот методом электро- и магнитодвижущих сил.

**Результаты.** Проведена многопараметрическая оптимизация антенны с целью нахождения оптимального взаимодействия между электрическим и магнитным излучателем при одновременном обеспечении нужных направленных и частотных характеристик. Полученные диаграммы направленности в Н и Е плоскостях для ряда частот, построенные временные зависимости излученного поля в этих плоскостях.

**Выводы.** Аналог излучателя Клевина может концентрировать энергию излучения в заданном направлении и обеспечивать широкий диапазон рабочих частот, который достигает в данной реализации антенны 1 ГГц. Надо отметить компактность данной структуры и наличие ряда геометрических параметров, изменение которых может позволить улучшить временные параметры излучаемого поля. Сверхширокополосная комбинированная вибраторно-щелевая структура имеет несколько направлений для дальнейшей оптимизации временных, частотных и направленных характеристик в соответствии с требованиями конкретных приложений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** излучатель Клевина; сверхширокополосная щель; сверхширокополосная комбинированная вибраторно-щелевая структура; идеально проводной конус.

### ВСТУП

Перехідні процеси в природі та техніці відіграють важливу роль як ключові особливості процесу передачі інформації. Поширення потужних перетворювачів на основі ширинно-імпульсної модуляції та випрямлячів на сонячних електростанціях та сучасних електромобілях вимагає вивчення його завад, що діють на інші пристрої [1]. Перехідні процеси можуть спричинити помилки в лініях передачі цифрових сигналів та переривати роботу пристроїв радіочастотної ідентифікації (RFID) через їх надширокопосмуговий характер [2]. Ймовірно, найпотужнішою завадою для сучасних електронних пристроїв, таких як бортові системи, є блискавка [3]. Швидке вмикання величезного струму може вплинути на екрановані кабелі літаків і пошкодити бортові системи [4], а також захищені кабелі, що закопані в землю [5] - [7].

Класичні вібратори та щілини є вузькопосмуговими випромінювачами внаслідок резонансних процесів, що супроводжують їхнє збудження, хоча існують широкопосмугові конструкції вібраторів [8] та щілин [9]. Взаємодія між ними вже використовувалась для підвищення загальної ефективності випромінювання комбінованих структур. Дослідження взаємного впливу вимагає знань про ближнє поле випромінювачів для перехідного збудження. Короткий електричний диполь може забезпечити досить гладку частотну характеристику випромінювання, як відомо з [8]. Крім того, це підтверджується загальновідомим фактом, що діаграма напрямленості (ДН) короткого диполя має форму, подібну до ДН напівхвильового диполя. Також існують різні конструкції широкопосмугових щілин.

Мета даної статті – побудувати надширокопосмуговий аналог випромінювача Клевина [10]. Для покращення характеристик комбінованого випромінювача будемо використовувати сильну взаємодію між щілиною і вібраторами. Треба забезпечити взаємодію в широкому діапазоні частот, застосовуючи оптимальне розміщення широкопосмугових диполів у ближній зоні щілини. Пропонується використати кінчну форму диполів для розширення діапазону робочих частот. Існуючі аналітичні розв'язки рівнянь Поклінгтона та Халлена [11] не можуть бути застосовані безпосередньо у випадку плавної зміни перерізу диполя для поліпшення його частотних параметрів. Отже, для зручності будемо використовувати числовий підхід до розв'язання задачі. Як приклад магнітного випромінювача, ми розглянемо

надширококуглову щілину спеціально оптимізованої форми, що вирізана у нескінченному ідеальнопровідному екрані [12]. Щоб зменшити затінення щілини диполями, кінцевий короткозамкнений вібратор приєднано основою до нескінченного ідеальнопровідного екрану. Отже, запропоновано тривимірний аналог діамантового диполя (diamond dipole) [9] для комбінованого вібраторно-щілинного випромінювача.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай надширококуглову щілину [12] вирізано у нескінченному ідеальнопровідному екрані кінцевої товщини, як показано на рис. 1. Щілина збуджується джерелом електричної напруги, прикладеної до обох сторін щілини в її центрі. Для поліпшення характеристик щілини додано два ідеальнопровідні конуси у вигляді надширококуглових короткозамкнених на екран диполів, як показано на рис. 2 та 3. Задача полягає у пошуку розмірів випромінюючої конструкції для оптимізації її характеристик.

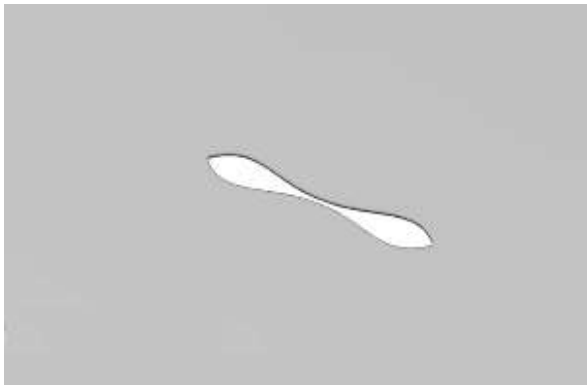


Рис. 1. Надширококуглова щілина в ідеальнопровідному екрані [12]

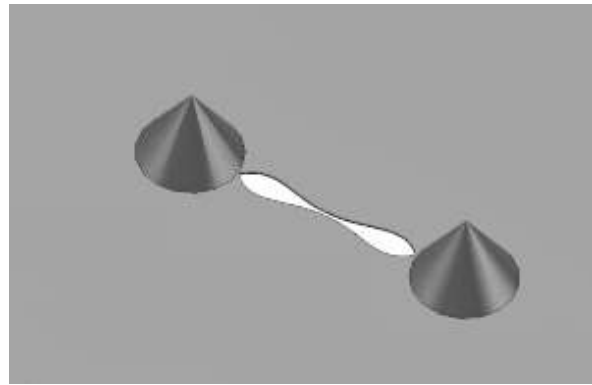


Рис. 2. Надширококугловий вібраторно-щілинний випромінювач

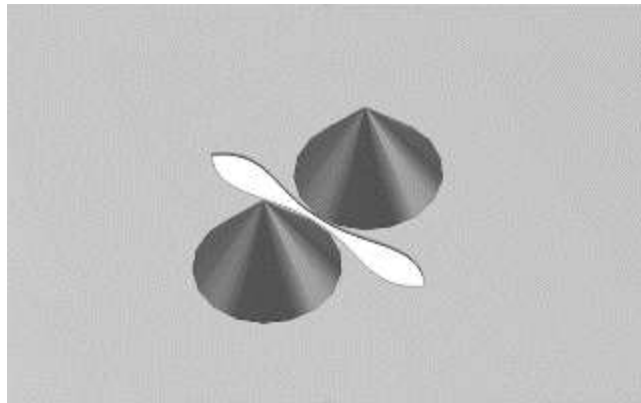


Рис. 3. Надширококугловий аналог випромінювача Клевїна

### ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Як зазначено вище, для криволінійних структур зручно використовувати прямий числовий розрахунок у часовій області. Нескінченний екран товщиною 1 мм моделюється пластиною із довжиною та шириною у п'ять довжин щілини. Всі границі простору обчислення є поглинаючими. Числове моделювання, що проведено методом скінченних різниць у часовому просторі, показало, що збільшення розмірів екрану від початкового майже не змінює результати обчислення. Коефіцієнт стоячої хвилі напруги як функція частоти для щілини та комбінованих структур представлений на Рис. 4. Відсутність строгої періодичності мінімумів можна пояснити криволінійною формою щілини та складними траєкторіями поверхневих струмів навколо щілини [12].

Для підвищення ефективності її випромінювання на низьких частотах два кінцеві диполі, прилеглі до криволінійної межі щілини, розташовувались симетрично відносно центру щілини як в конструкції надширококуглової структури (Рис. 2), так і аналога випромінювача Клевїна (Рис. 3). Було з'ясовано, що радіус основи конуса впливає на якість його резонансів. Наприклад, мінімум при  $f = 1,3$  ГГц (крива 2 на Рис. 4) забезпечується класичним співвідношенням  $L/\lambda = 0,25$ . Ці вдосконалення помітно розширюють

діапазон частот випромінювача Клевина (Рис. 3). Вплив конусів на частотні характеристики випромінювача (Рис. 2) менший через їх розташування у мінімумі ДН щілини.

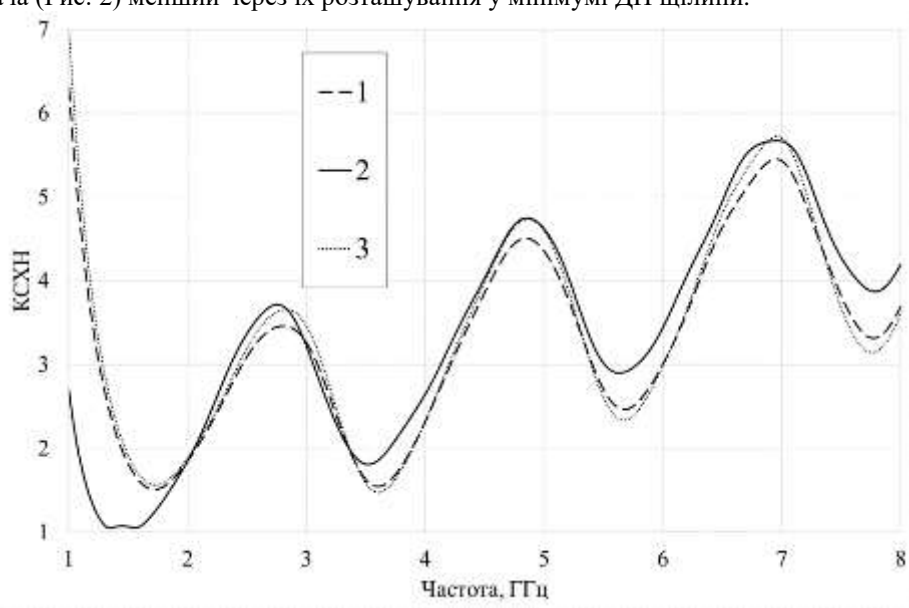


Рис. 4. КСХН в залежності від частоти збудження надширокопосмугової щілини на Рис. 1 (крива 1), надширокопосмугового аналога випромінювача Клевина, показаного на Рис. 3 (крива 2) та вібраторно-щілинного випромінювача на Рис. 2 (крива 3).

Цікаво дослідити часові форми амплітуд випромінюваної імпульсної електромагнітної хвилі у випадку збудження щілини гаусовим імпульсом. Електрична складова хвилі на відстані 0,3 м від центру випромінювачів представлена на Рис. 5 для кута  $\Theta = 0^\circ$  в Н- та Е-площинах, коли випромінювачі збуджуються гаусовим імпульсом тривалістю 0,08 нс. Як видно з Рис. 5, пасивні конуси збільшують амплітуду випромінюваних хвиль уздовж нормалі до площини щілини і подовжують перехідний процес у структурі. Важливо пояснити незвичну затримку імпульсу у часі, спричинену наявністю конусів. Ці конуси служать неоднорідною лінією передачі, яка породжує відбиту імпульсну хвилю в початковий момент її збудження. Ця хвиля інтерферує з хвилею, яка вже існує, в центрі щілини породжуючи нуль електричного поля. Далі амплітуда відбитої хвилі неоднорідної лінії зменшується, змінює свій знак, отже загальне електричне поле, що розподілене по щілині, збільшується, і щілина починає випромінювати, отримуючи додаткову енергію від відбитої хвилі конусів.

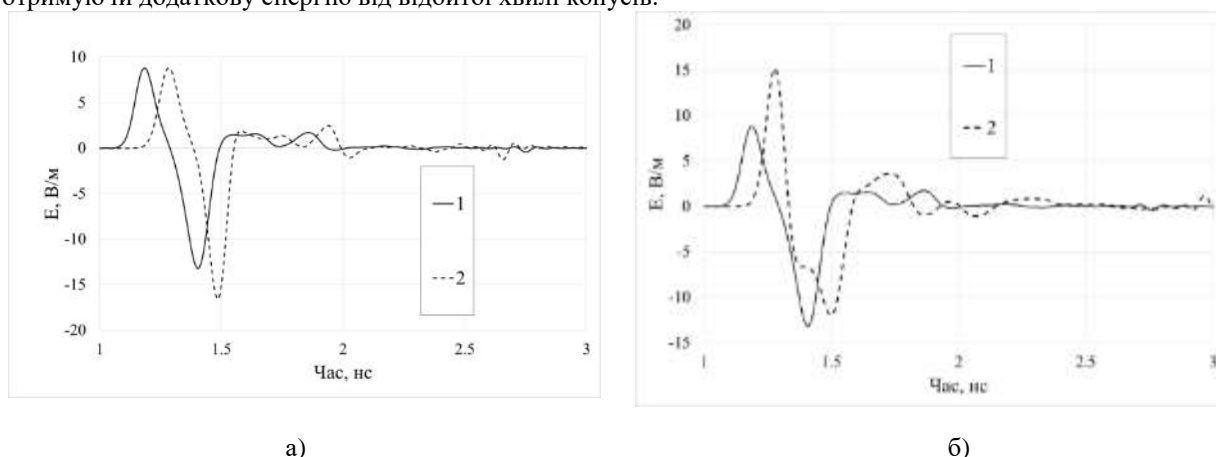


Рис. 5. Залежність амплітуди електричної складової поля випромінювання від часу на відстані спостереження  $r = 0,3$  м,  $\Theta = 0^\circ$  для випромінювачів: 1–щілина, 2–вібраторно-щілинний випромінювач (а) або випромінювач Клевина (б).

Кутова залежність випромінювання в площині Н представлена на Рис. 6. Вона демонструє зменшення амплітуд для щілини (крива 1), а також для комбінованих випромінювачів (крива 3) відповідно для всіх кривих на Рис. 6. Можна помітити, що перший максимум кривої 1 на Рис. 6 (б) більший за максимум кривої 1 на Рис. 5, але треба зважити на високе значення наступного мінімуму

кривої 1 на Рис. 6 (б). Подібну поведінку ми можемо спостерігати в площині Е для випромінювача Клевіна (крива 4). У той же час, випромінювання щілини в площині Е (крива 2) є ізотропним згідно класичних параметрів щілини.

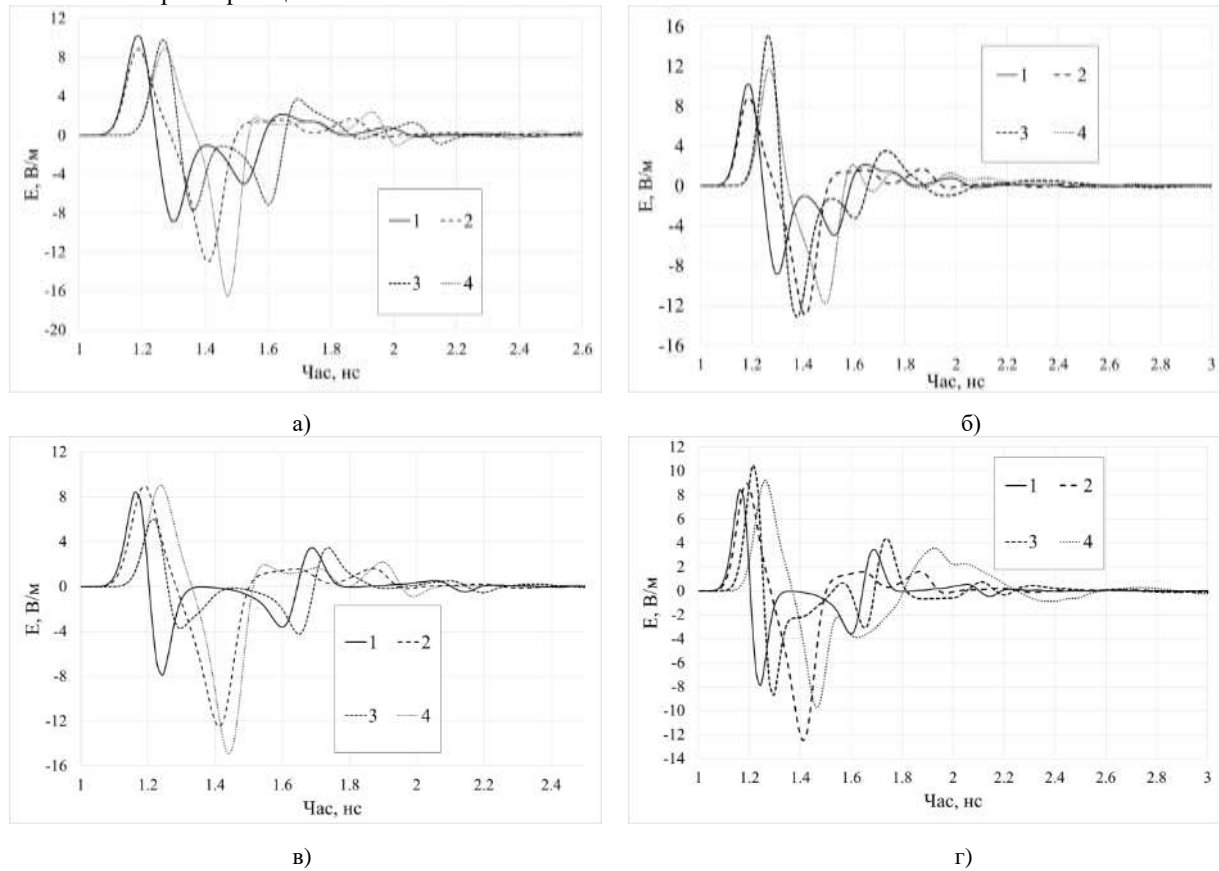


Рис. 6. Залежність амплітуди електричної складової поля випромінювання від відстані спостереження  $r = 0,3$  м,  $\Theta = 30^\circ$  (а, б) та  $\Theta = 60^\circ$  (в, г), де криві позначають випромінювання: 1 – щілини у площині Н, 2 – щілини у площині Е, 3 – комбінованого випромінювача у площині Н, 4 – комбінованого випромінювача у площині Е

Видно, що комбінований випромінювач на Рис. 2 не дає поліпшення характеристик випромінювання у порівнянні з надширокосмуговим аналогом випромінювача Клевіна. Давайте розглянемо його напрямленість на різних частотах. Відомо, що випромінювання прямокутної щілини в площині Е близьке до ізотропного. Коефіцієнти підсилення надширокосмугової щілини та випромінювача Клевіна в площині Е зображені на різних частотах на Рис. 7. Можна помітити, що діаграми напрямленості щілини є ізотропними з плавним збільшенням їхньої спрямованості на вищих частотах (Рис. 7 а, в). Випромінювач Клевіна демонструє більш спрямоване випромінювання (Рис. 7 г), але з небажаними максимумами при  $\Theta = 90^\circ$  для частот нижче, ніж 1,8 ГГц (Рис. 7 б). Це можна пояснити ефективним збудженням конусів на низьких частотах завдяки їхній висоті та відстані між ними, що робить їхнє випромінювання подібним до випромінювання антени біжної хвилі.

ДН прямокутної щілини у Н-площині завжди має максимум по нормалі до її площини і нулі у її площині. Коефіцієнти підсилення надширокосмугової щілини та випромінювача Клевіна мають схожий вигляд, що показано на Рис. 8. Складний розподіл амплітуди магнітного струму на щілині генерує більш рівномірний розподіл спрямованості на високих частотах, як показано на Рис. 8 (в). Слабкий вплив конусів (Рис. 8 б, г) можна пояснити взаємно протилежним знаком струмів збудження кожного конуса центром щілини. Це спричиняє взаємну компенсацію результуючого поля в Н-площині.

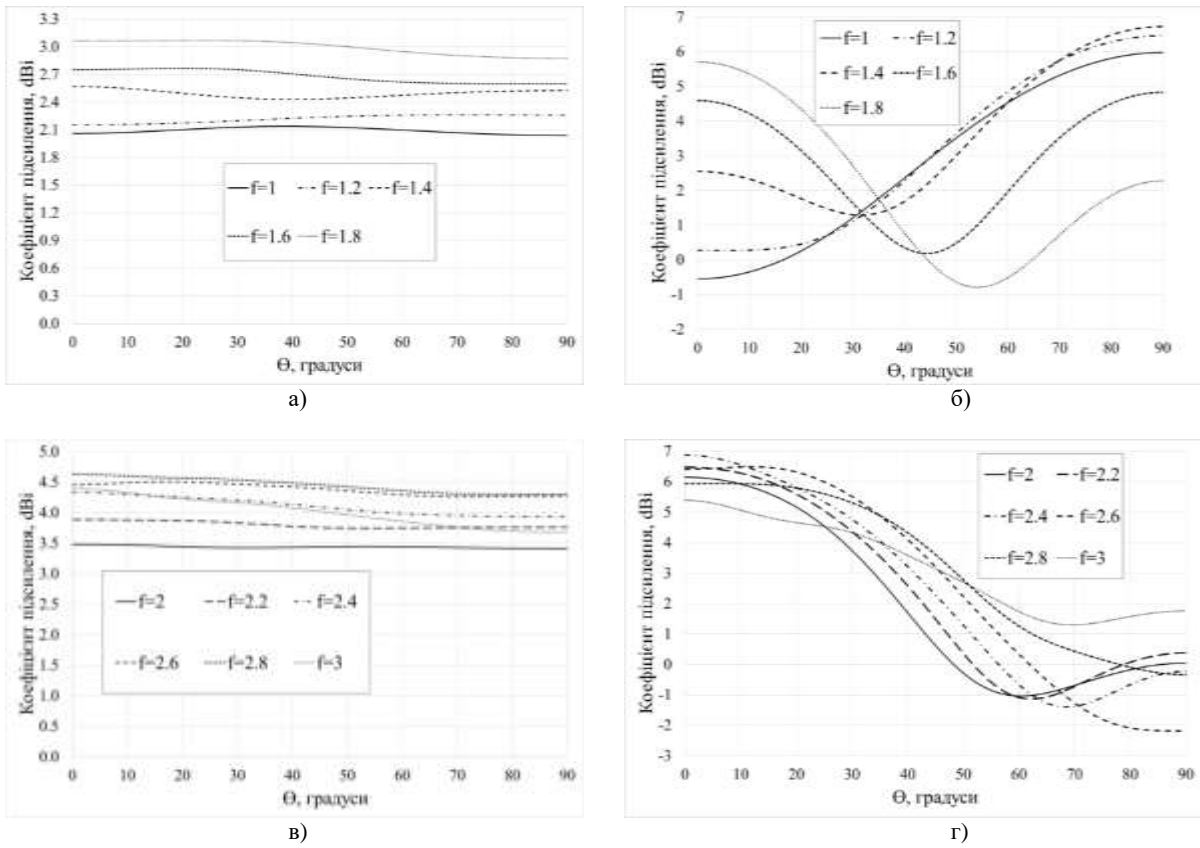


Рис. 7. Коефіцієнти підсилення у площині Е надширококумової щілини (а, в) та випромінювача Клевїна (б, г) на різних частотах (ГГц)

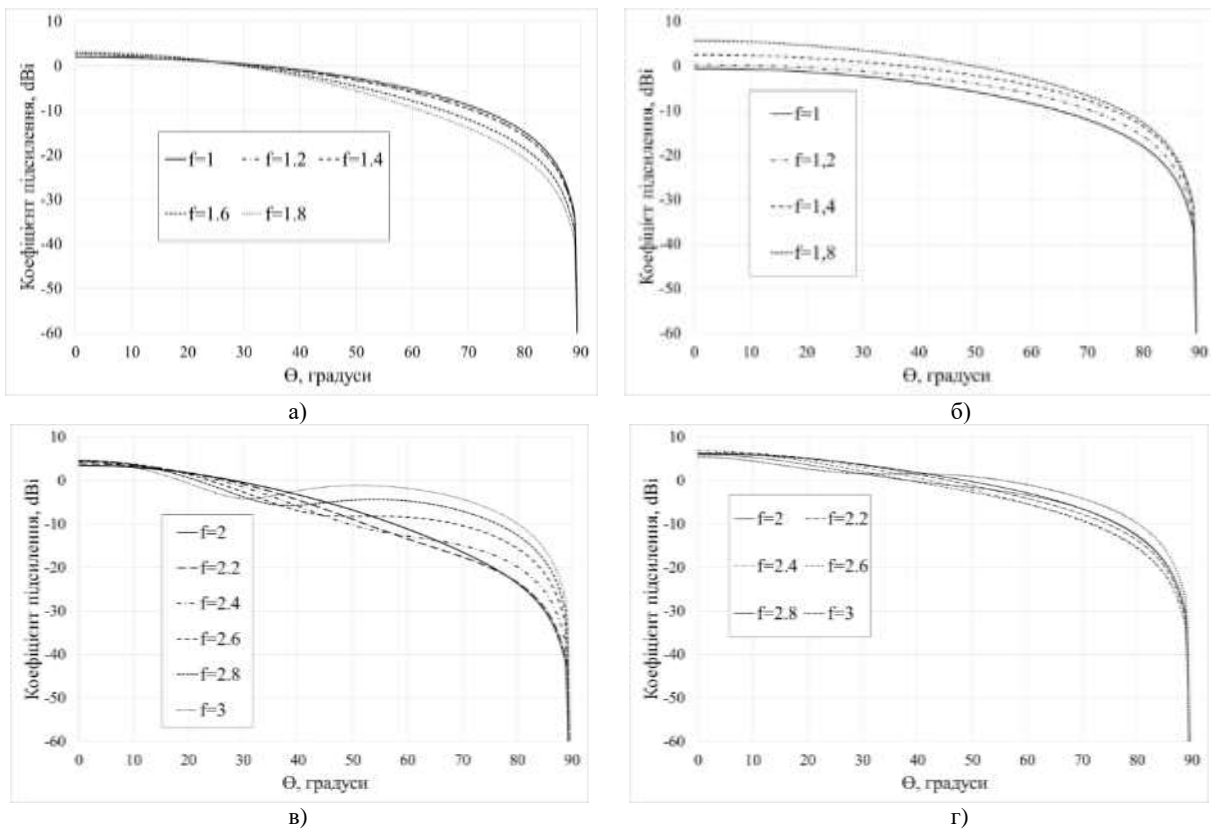


Рис. 8. Коефіцієнти підсилення у Н-площині надширококумової щілини (а, в) та випромінювача Клевїна (б, г) на різних частотах (ГГц)

### ВИСНОВКИ

Аналог випромінювача Клевіна може концентрувати енергію випромінювання в заданому напрямку та забезпечувати широкий діапазон робочих частот, що досягає в даній реалізації антени 1 ГГц. Треба відмітити компактність даної структури та наявність низки геометричних параметрів, зміна яких може дозволити покращити часові параметри випромінюваного поля. Надширокопосмугова комбінована вібраторно-щільна структура має декілька напрямків для подальшої оптимізації часових, частотних і напрямлених характеристик відповідно до вимог конкретних застосувань.

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

### Authors' ORCID ID

О. М. Dumin  <http://orcid.org/0000-0001-5067-9689>

V. A. Plakhtii  <http://orcid.org/0000-0002-0442-2716>

P. G. Fomin  <https://orcid.org/0000-0002-6346-4270>

M.V. Nesterenko  <https://orcid.org/0000-0002-1297-9119>

### REFERENCES

1. Luszcz J, Smolenski R. Low frequency conducted emissions of grid connected static converters. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*; 2015;4(1):86-100.
2. Pous M, Silva F. Prediction of the impact of transient disturbances in real-time digital wireless communication system. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. 2014;3(3):76-82.
3. Keibel R, Stadler T, Rouquette J-A, Flourens F, Avenet A, Rouvrais N. Numeric Lightning Protection Prediction for Wires in an Aircraft Wing Raceway. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. 2016; 5(4):71-79.
4. Vogel MH. Impact of lightning and high-intensity radiated fields on cables in aircraft. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. 2014; 3(2):56- 61.
5. Grcev LD, Menter FE. Transient electromagnetic fields near large earthing systems. *IEEE Trans. on Magnetics*. 1996; 32(3):1525-1528.
6. Tanaka H, Baba Y, Barbosa CF. Effect of shield wires on the lightning-induced currents on buried cables. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2016; 58(3):738-746.
7. Rachidi F, Janischewskyj W, Hussein AM, Nucci CA, Guerrieri S, Kordi B, Chang Jen-Shih. Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*. 2001; 43(3):356-367.
8. Harmuth H. *Nonsinusoidal Waves for Radar and Radio Communications*. Academic Press, New York; 1981.
9. Schantz HG. *The art and science of ultrawideband antennas*. Artech House, London; 2005.
10. Penkin YuM, Semenikhin VA, Yatsuk LP. Investigation of the internal and external characteristics of radiators such as a Clavin radiator. *Radio Eng.* 1987; 83:3-10. (in Russian)
11. Tijhuis AG, Zhongqiu P. Transient excitation of a strait thin-wire segment: a new look at an old Problem. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1992; 40(10):1132-1146.
12. Barnes MA. Ultra-wideband magnetic antenna. US patent 6,091,374, 2000 Jul. 18; 16 p.