

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Харківський національний університет  
імені В.Н. Каразіна  
Факультет радіофізики, біомедичної електроніки і комп'ютерних систем  
Кафедра прикладної електродинаміки  
**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри



підпис

Горобець М.М.

ініціали, прізвище

“\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**Кваліфікаційна робота магістра**

на тему: НАДШИРОКОСМУГОВІ АНТЕННІ РЕШІТКИ НА  
ВИПРОМІНЮВАЧАХ КЛЕВІНА

Виконав: студент II курсу магістратури,  
групи РР-67, спеціальності 105 –  
прикладна фізика та наноматеріали,  
освітньо-професійна програма  
«Радіофізика і електроніка» П. Г. Фомін



Керівник: старший викладач кафедри  
прикладної електродинаміки

В. А. Плахтій



Науковий консультант: науковий  
співробітник, доктор фізико-  
математичних наук, доцент, лауреат  
Державної премії в галузі науки і техніки  
О. М. Думін

Рецензент: доктор. фіз. - мат. наук,  
професор С. Л. Бердник

Харків – 2023 рік

**РЕФЕРАТ**

Дипломний проект містить 27 рисунків, 40 сторінок, 36 бібліографічних посилань.

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 Н і Е площинах для низки частот, побудовані часові залежності випроміненого поля в цих площинах.

Для випадку використання вібраторно-щілинної структури в якості елемента антенної решітки була покращена форма щілини, конусів і їх положення, що дозволило забезпечити краще узгодження випромінювача з джерелом в широкому діапазоні частот.

Наведено часові залежності під різними кутами для різних антенних решіток.

**ВИПРОМІНЮВАЧ КЛЕВІНА; НАДШИРОКОСМУГОВА ЩІЛИНА;  
НАДШИРОКОСМУГОВА КОМБІНОВАНА ВІБРАТОРНО-ЩІЛИННА  
СТРУКТУРА; ІДЕАЛЬНО ПРОВІДНИЙ КОНУС; НЕСТАЦІОНАРНЕ  
ВИПРОМІНЮВАННЯ; АНТЕННА РЕШІТКА.**

## **ABSTRACT**

The diploma project contains 27 figures, 40 pages, and 36 bibliographic references.

A multiparametric optimization of the antenna has been conducted to find the optimal interaction between the electric and magnetic radiators while simultaneously ensuring the required directional and frequency characteristics.

Directional diagrams in the H and E planes have been obtained for a range of frequencies, and time dependencies of the radiated field in these planes have been constructed. In the case of using the vibrator-slot structure as an element of the antenna array, the shape of the slots, cones, and their positions have been improved, allowing for better matching of the radiator with the source over a wide frequency range.

Time dependencies under different angles for various antenna arrays are provided.

**KLEVEN RADIATOR, WIDE-SLOT, WIDE-SLOT COMBINED VIBRATOR-SLOT STRUCTURE, PERFECTLY CONDUCTING CONE, NON-STATIONARY RADIATION, ANTENNA ARRAY.**

## ЗМІСТ

ЗМІСТ .....	4
1. Вступ .....	5
2. Надширокосмуговий комбінований вібраторно-щілинний випромінювач типу Клевіна.....	10
2.1. Постановка задачі .....	10
2.2. Числове моделювання .....	12
3. Надширокосмугові антенні решітки на випромінювачах Клевіна .....	23
3.1. Постановка задачі .....	23
3.2 Числове моделювання .....	25
4. Висновки .....	35
ЛІТЕРАТУРА.....	36

## 1. ВСТУП

Історію розвитку різноманітних конструкційних рішень широкосмугових та надширокосмугових антен можна прослідкувати практично з самого виникнення радіозв'язку. Тобто з кінця XIX століття. Ще починаючи з експериментів Г. Герца та патентів О. Лоджа, які стали свого роду попередниками таких надширокосмугових антен, як краватка-метелик та біконічна антена.[1] – [4]. З того часу різними дослідниками було винайдено велику кількість конструкцій. Їх різноманітність насамперед впливала від необхідності покращення характеристик ширини робочих частот, спрямованості випромінювання та доцільності рішення відносно певної окремої обраної задачі. До тих, які представляють реальний науковий інтерес можна віднести такі конструкції як конусні антени Картера (рис. 3), антени Лоджа (рис. 1 та рис. 2), елементи Лінденблада, сферичний диполь Щелкунова, всеспрямований та спрямований рупори Бріллюена, широкосмугова щілинна антена Марі (рис. 4).

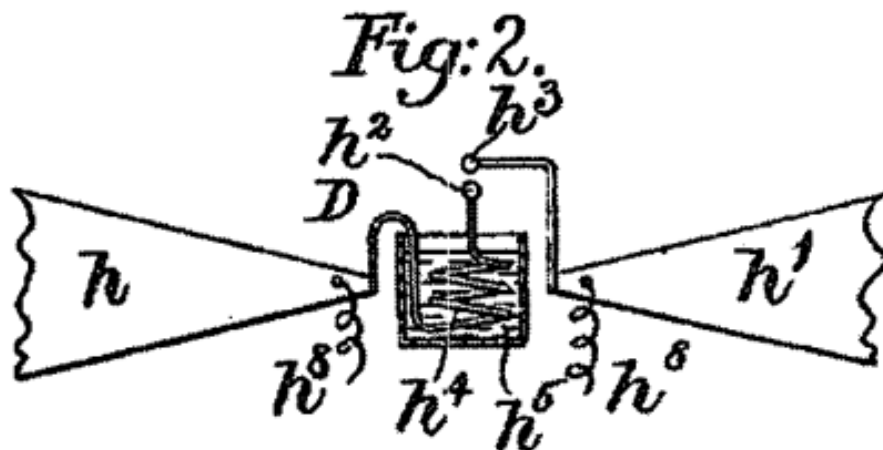


Рисунок 1 – Лодж надавав перевагу антенам, що складаються з трикутних «областей пропускну́ї спроможності», явним попередникам антени «метелик»

(1989) [1]

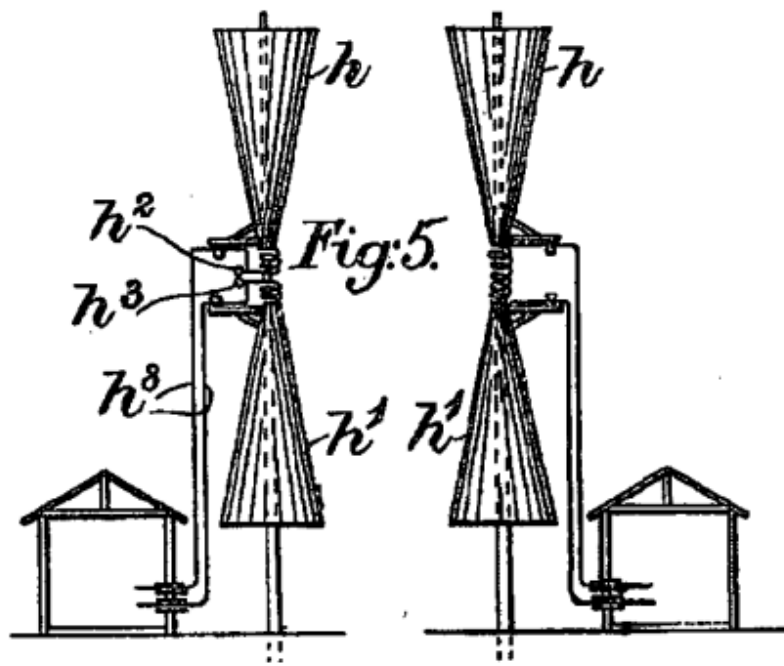
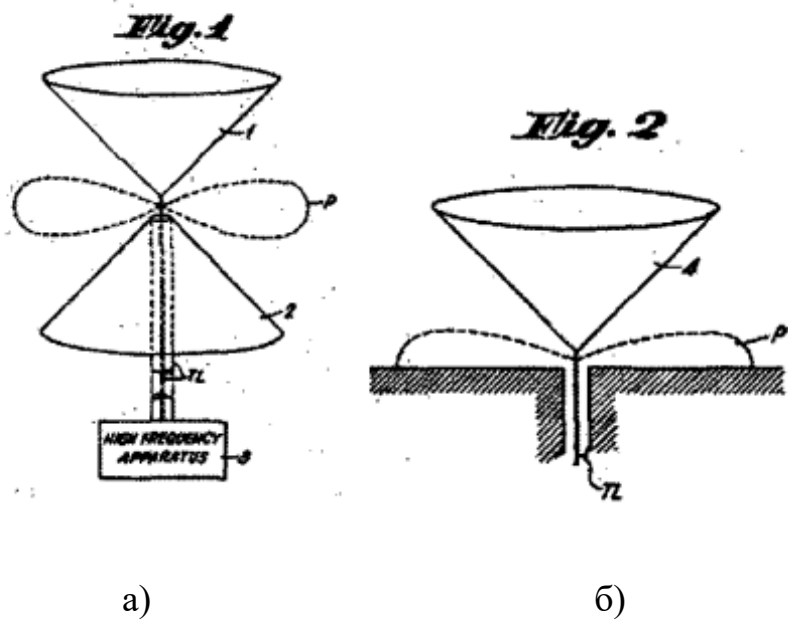


Рисунок 2 – Біконічні антени Лоджа (1998) [1]



а)

б)

Рисунок 3 – Біконічна антена Картера (1939) (а) Конічний монополь Картера (1939) (б) [1]

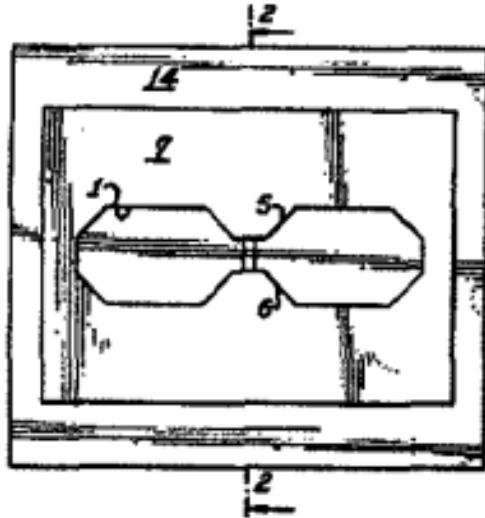


Рисунок 4 – Широкопсмугова щілинна антена Марі (1962) [1]

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 спричиняти помилки в лініях передачі цифрових сигналів та переривати роботу пристроїв радіочастотної ідентифікації (RFID) через їх надширокопсмуговий характер [6]. Ймовірно, найпотужнішою завадою для сучасних електронних пристроїв, таких як бортові системи, є блискавка [7]. Швидке вмикання величезного струму може вплинути на екрановані кабелі літаків і пошкодити бортові системи [8], а також захищені кабелі, що закопані в землю [9] - [11].

Класичні вібратори та щілини є вузькопсмуговими випромінювачами внаслідок резонансних процесів, що супроводжують їхнє збудження, хоча існують широкопсмугові конструкції вібраторів [12] та щілин [13]. 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 [12]. Крім того, це підтверджується

загальновідомим фактом, що діаграма напрямленості (ДН) короткого диполя має форму, подібну до ДН напівхвильового диполя. Також існують різні конструкції ширококутових щілин.

Наприклад, існують системи зв'язку МІМО, які потребують розробки надширококутових антенних решіток [17] - [19].

Надширококутові (НШС) імпульсні випромінювачі також є невід'ємною частиною імпульсних георадарів. Розробка та оптимізація таких пристроїв є складним завданням, оскільки їх основне призначення – реєстрація сигналів малої потужності, відбитих від прихованих об'єктів. Тому прийняті сигнали повинні мати мінімальний шум і бути стійкими до зовнішніх перешкод [20].

Іншим можливим застосуванням НШС-георадарів є дистанційне вимірювання товщини шарів такого шаруватого середовища для оцінки якості дорожніх покриттів. [21]. Надширококутові радари дають можливість слідкувати за об'єктами, які знаходяться за стіною за допомогою багатошляхового алгоритму [22] Існує також дуже важливе застосування радарів у задачах гуманітарного розмінування, де наносекундні імпульси допомагають ідентифікувати приховані вибухонебезпечні об'єкти [23].

Також з'явилася остання тенденція у використанні надширококутового сигналу для додатків Інтернету речей. Надширококутові випромінювачі знайшли застосування і в медицині. Так, розроблено антенні решітки для виявлення ракових пухлин у грудній клітці людини [24], [25]. Такі системи потребують ефективних НШС випромінювачів [26].

Вищезазначені застосування НШС-випромінювачів також потребують використання антенних решіток. Отже, розробка та оптимізація надширококутових антенних решіток є окремим важливим напрямком [27] - [29].

Розміри елемента антенної решітки можна зменшити за рахунок використання сильної взаємодії між випромінювачами електричного та

магнітного типів. Прикладом такої антени є випромінювач Клевіна, який складається з вузької прямокутної щілини та двох короткозамкнених монополей [14], [30].

Надширокосмуговий аналог такого випромінювача представлено в роботах [31], [32].

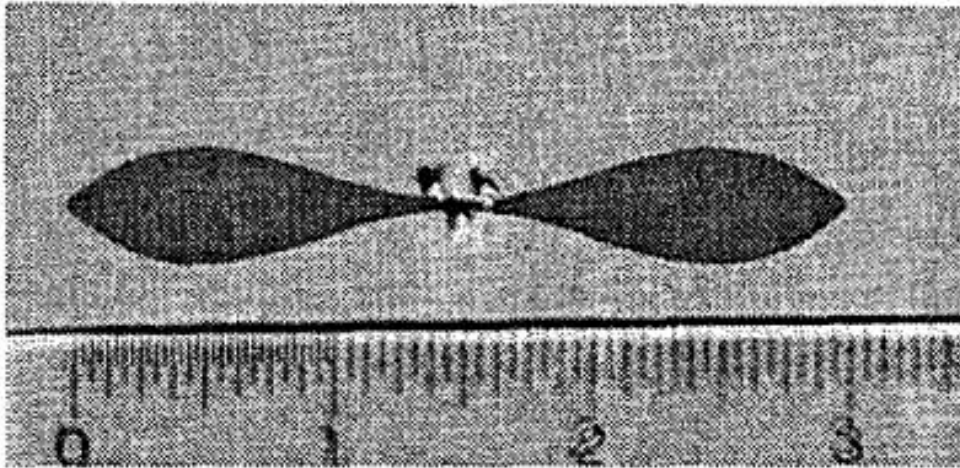


Рисунок 5 – Щілинна антена UWB Барнса (2000) [16]

В якості магнітного випромінювача використовується надширокосмугова щілина Барнса [16], а два ідеально провідних конуса є надширокосмуговими монополями. Завдяки сильній взаємодії конусів з щілиною вдалося поліпшити випромінювання в області низьких частот і збільшити спрямованість цього випромінювача.

## **2. НАДШИРОКОСМУГОВИЙ КОМБІНОВАНИЙ ВІБРАТОРНО-ЩІЛИННИЙ ВИПРОМІНЮВАЧ ТИПУ КЛЕВІНА**

Розділ присвячено задачі створенню компактної імпульсної комбінованої антени електричного та магнітного типу, надширокосмуговий аналог випромінювача Клевіна, в якому необхідні характеристики забезпечуються сильною взаємодією його складових частин. Також необхідно проаналізувати напрямлені, частотні та часові характеристики такого випромінювача. 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 даного розділу опубліковані в тезах міжнародної конференції [31] та у фаховому виданні України [35].

### **2.1. Постановка задачі**

Нехай надширокосмугову щілину [16] вирізано у нескінченному ідеальнопровідному екрані кінцевої товщини, як показано на рис. 6. Щілина збуджується джерелом електричної напруги, прикладеної до обох сторін щілини в її центрі. Для поліпшення характеристик щілини додано два ідеальнопровідні конуси у вигляді надширокосмугових короткозамкнених на екран монополів, як показано на рис. 7 та 8. Задача полягає у пошуку розмірів випромінюючої конструкції для оптимізації її характеристик.

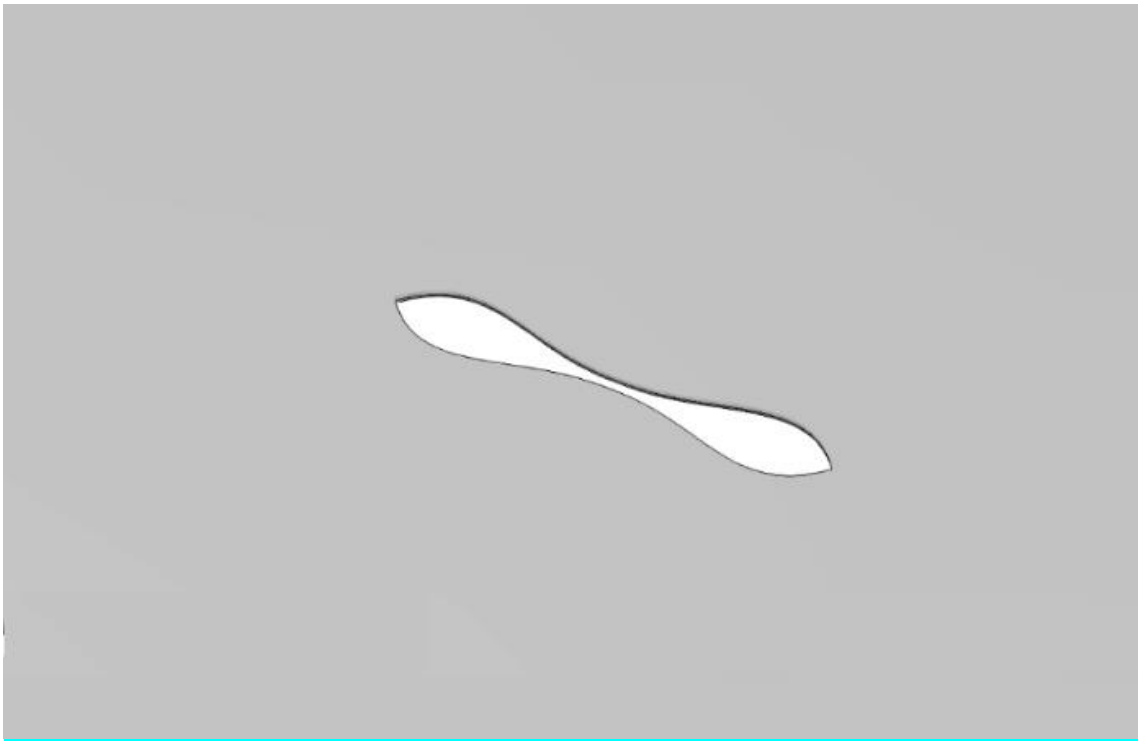


Рисунок 6 – Надширокосмугова щілина в ідеальнопровідному екрані [16]

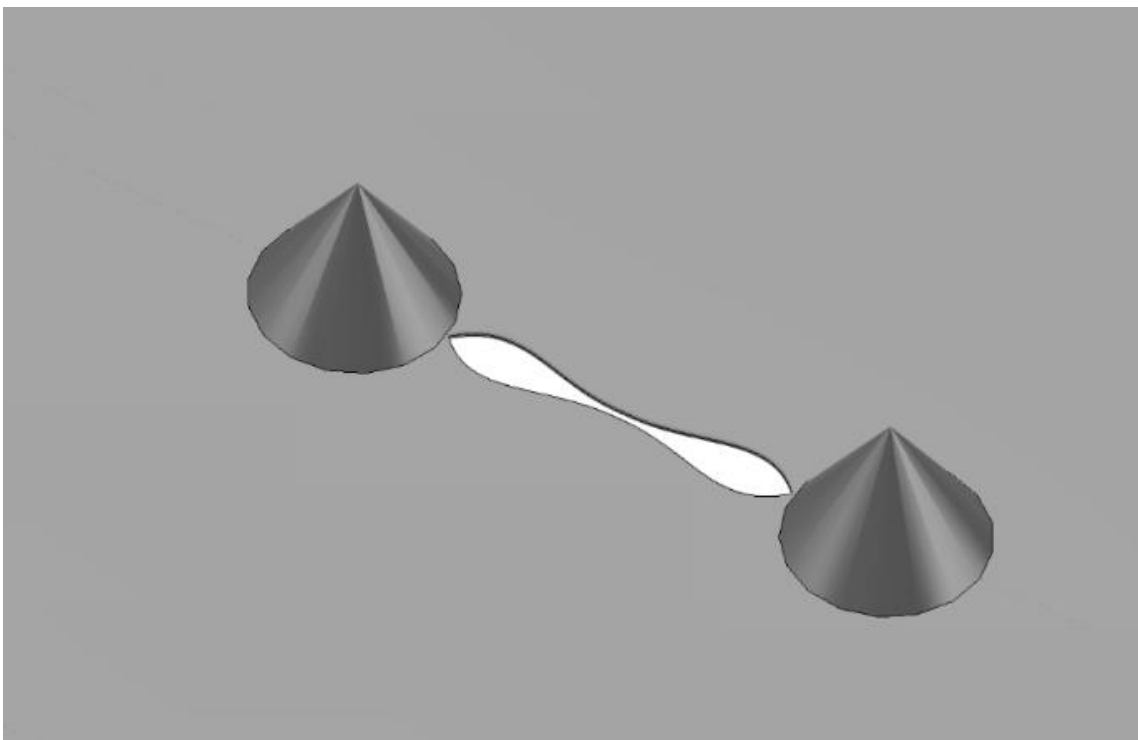


Рисунок 7 – Надширокосмуговий вібраторно-щілинний випромінювач

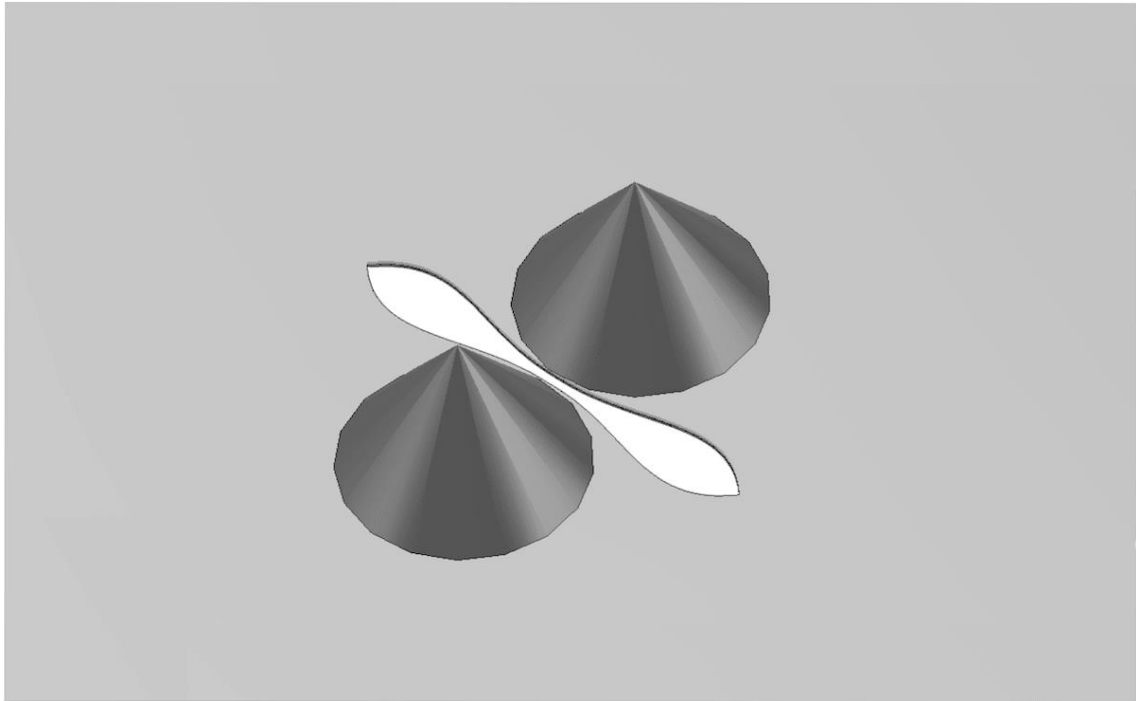


Рисунок 8 – Надширокосмуговий аналог випромінювача Клевіна

## 2.2. 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. 9. Відсутність строгої періодичності мінімумів можна пояснити криволінійною формою щілини та складними траєкторіями поверхневих струмів навколо щілини [16].

Для підвищення ефективності її випромінювання на низьких частотах два конічні диполі, прилеглі до криволінійної межі щілини, розташовувались симетрично відносно центру щілини як в конструкції надширокосмугової структури (рис. 7), так і аналога випромінювача Клевіна (рис. 8). Було з'ясовано, що радіус основи конуса впливає на якість його резонансів. Наприклад, мінімум при  $f = 1,3$  ГГц (крива 2 на рис. 9) забезпечується класичним співвідношенням  $L/\lambda = 0.25$ . Ці вдосконалення помітно розширюють діапазон частот випромінювача Клевіна (рис. 8). Вплив конусів на частотні характеристики випромінювача (рис. 7) менший через їх розташування у мінімумі ДН щілини.

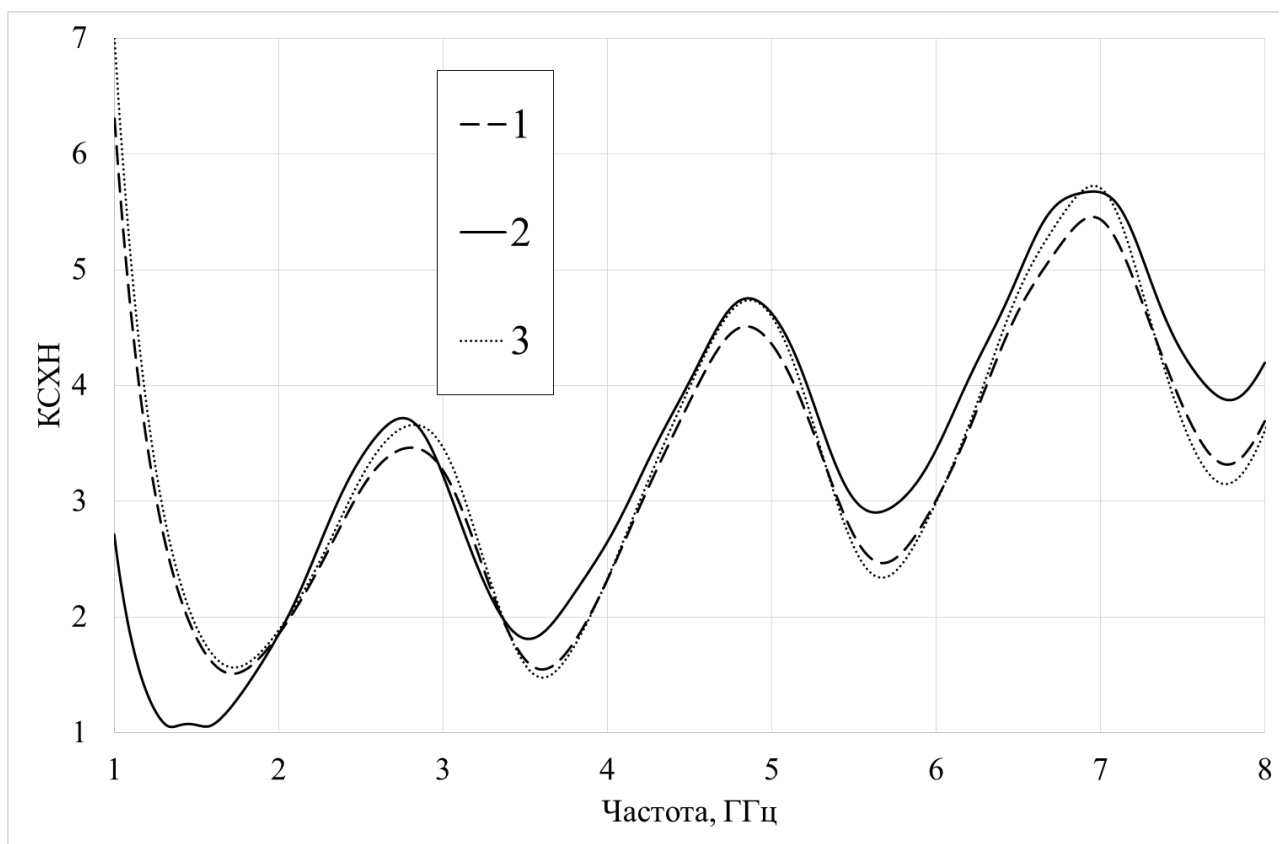
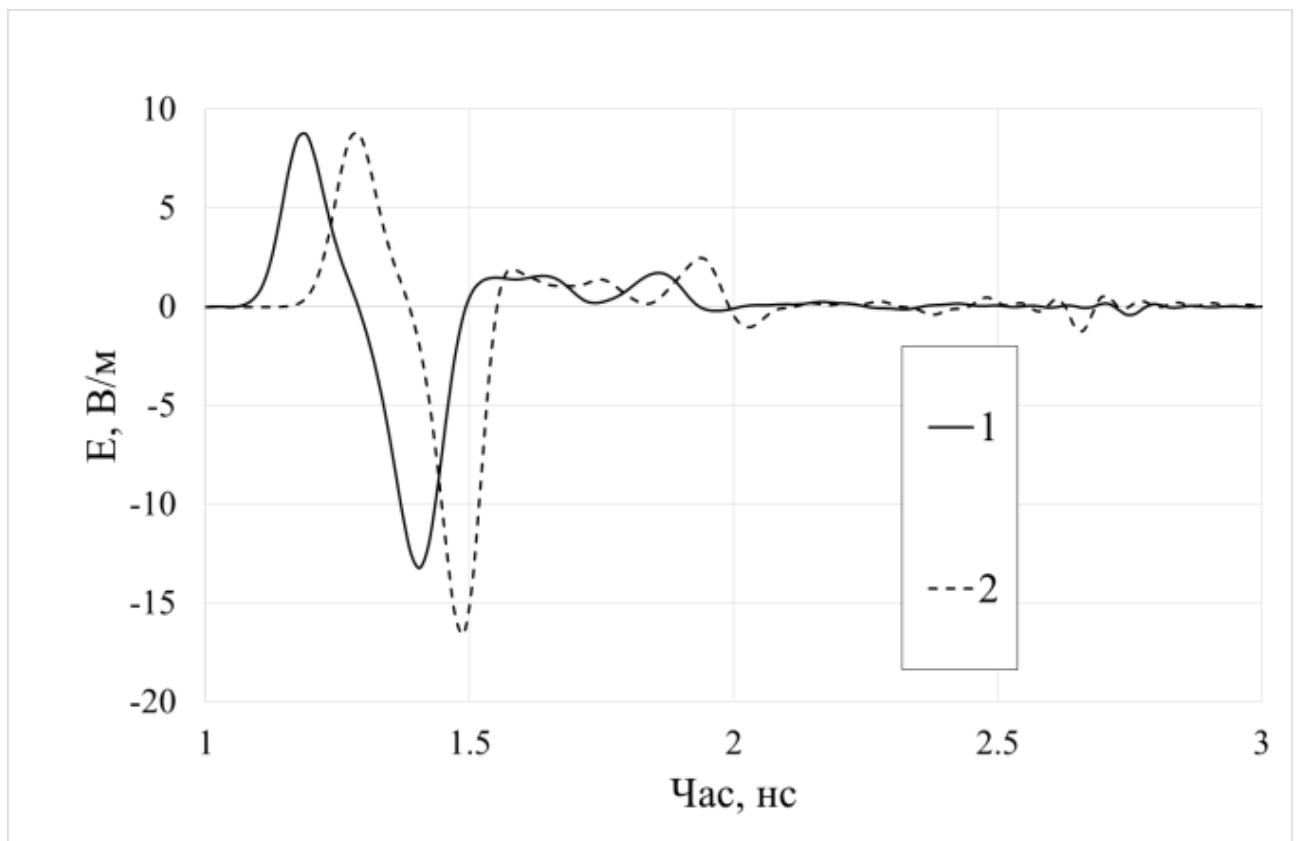


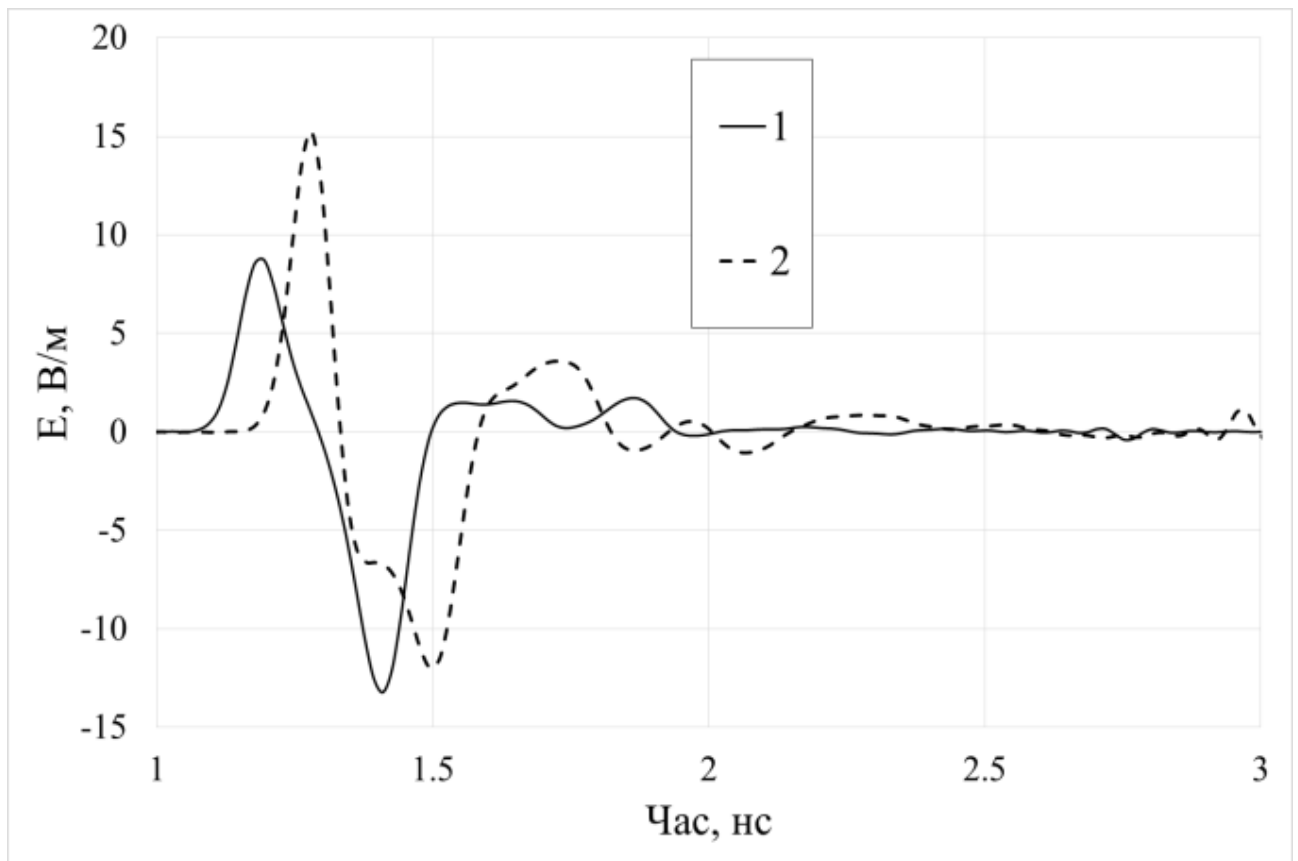
Рисунок 9 – КСХН в залежності від частоти збудження надширокосмугової щілини на рис. 6 (крива 1), надширокосмугового аналога випромінювача Клевіна, показаного на рис. 8 (крива 2) та вібраторно-щілинного випромінювача на рис. 7 (крива 3).

Цікаво дослідити часові форми амплітуд випроміненої імпульсної електромагнітної хвилі у випадку збудження щілини гаусовим імпульсом.

Електрична складова хвилі на відстані 0,3 м від центру випромінювачів представлена на рис. 10 для кута  $\Theta = 0^\circ$  в Н- та Е-площинах, коли випромінювачі збуджуються гаусовим імпульсом тривалістю 0,08 нс. Як видно з рис. 10, 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.



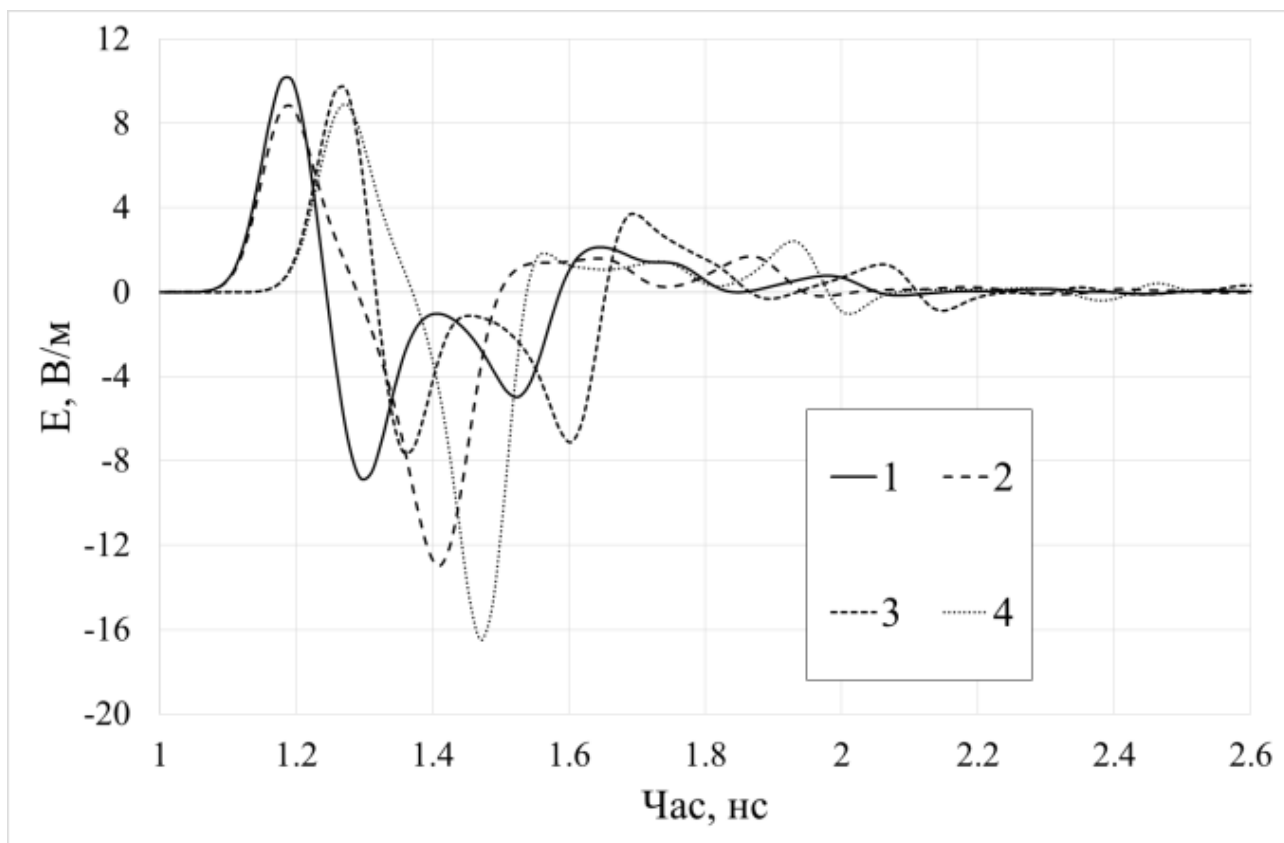
a)



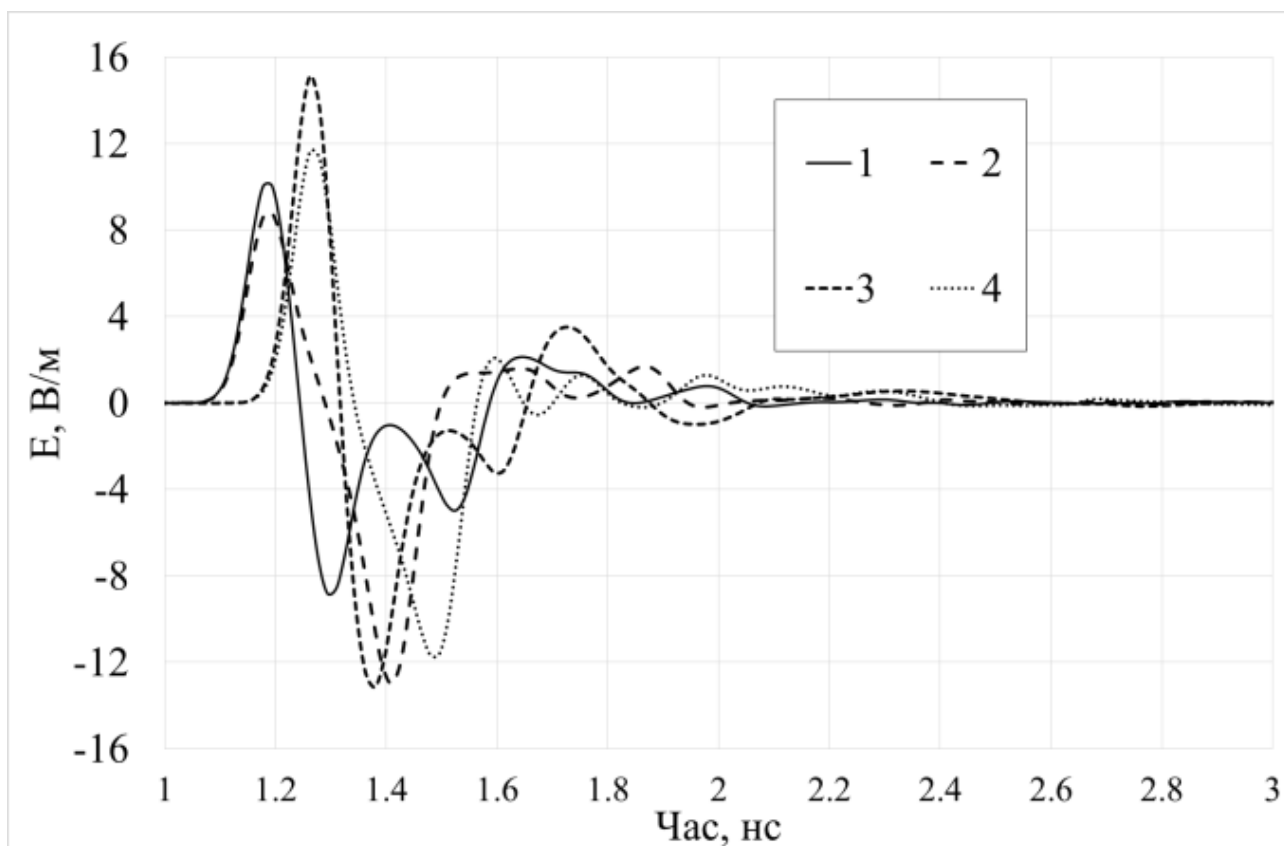
б)

Рисунок 10 – 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 Клевіна (б).

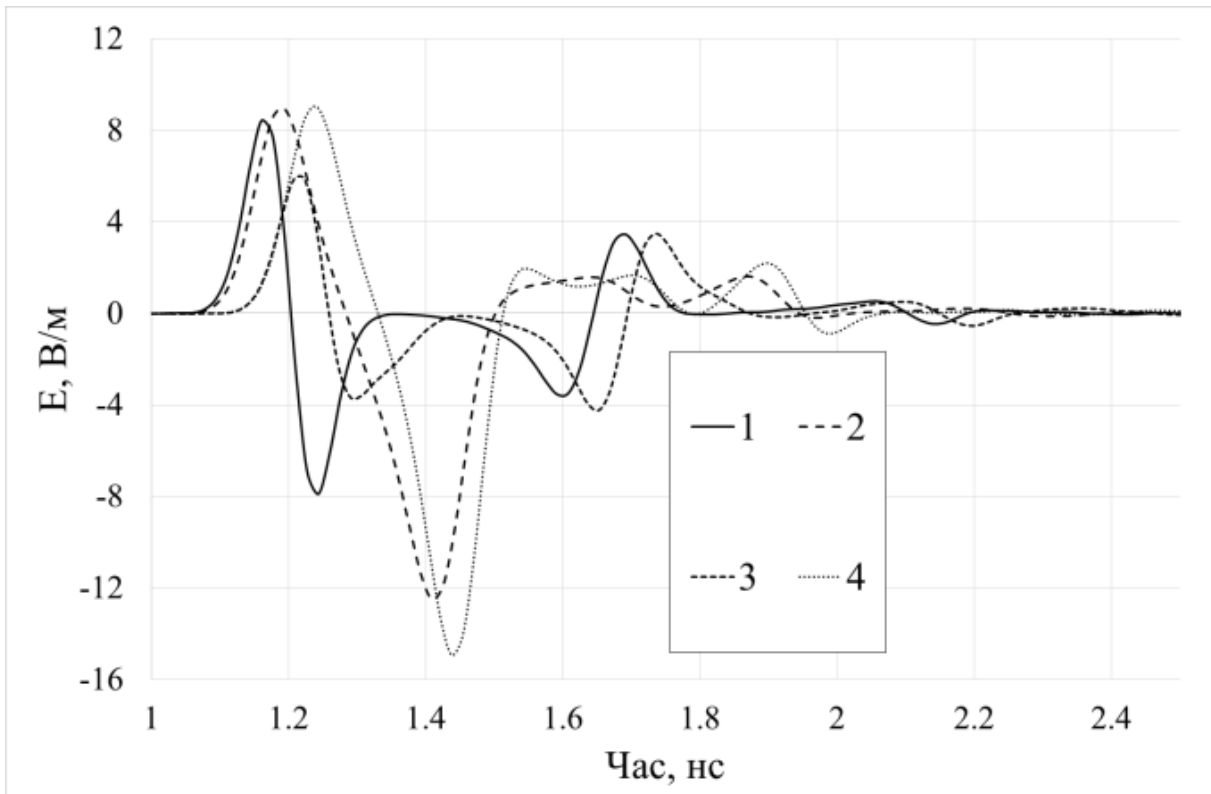
Кутова залежність випромінювання в площині Н представлена на рис. 11. Вона демонструє зменшення амплітуд для щілини (крива 1), а також для комбінованих випромінювачів (крива 3) відповідно для всіх кривих на рис. 11. Можна помітити, що перший максимум кривої 1 на рис. 11 (б) більший за максимум кривої 1 на рис. 10, але треба зважити на високе значення наступного мінімуму кривої 1 на рис. 11 (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.



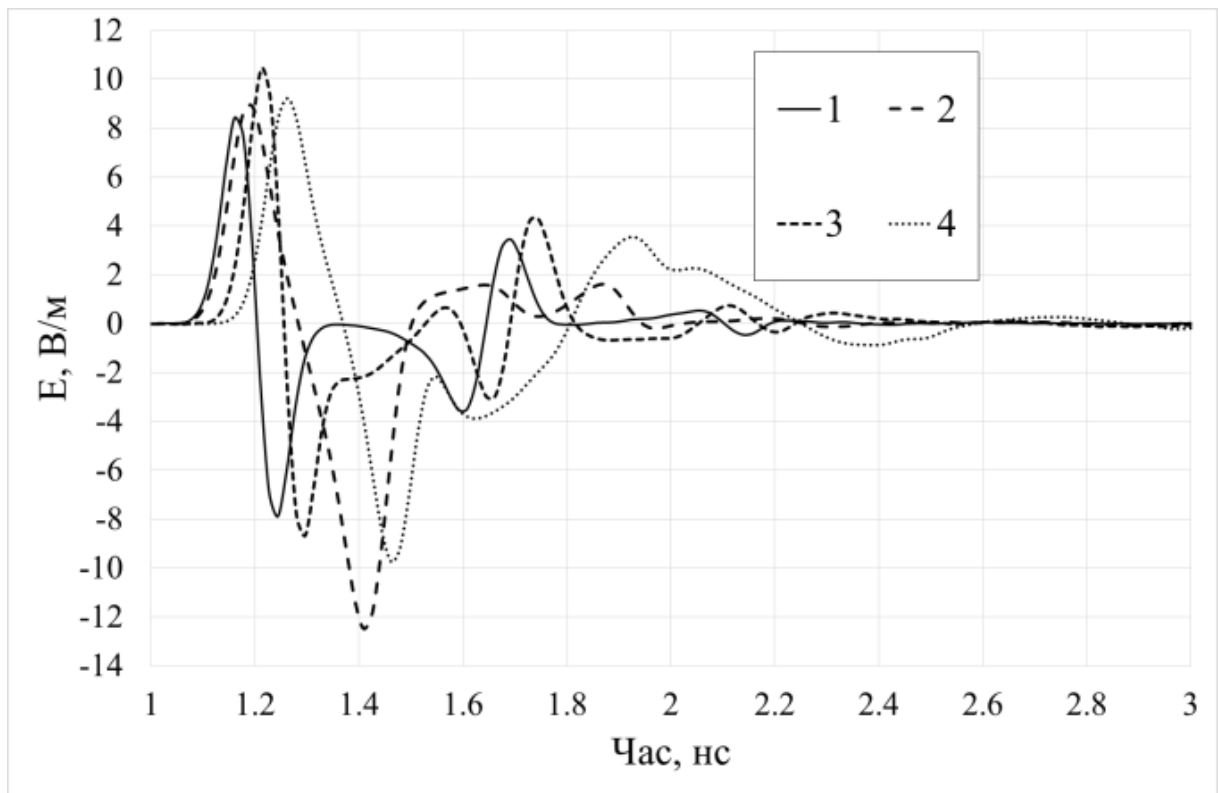
a)



б)



в)



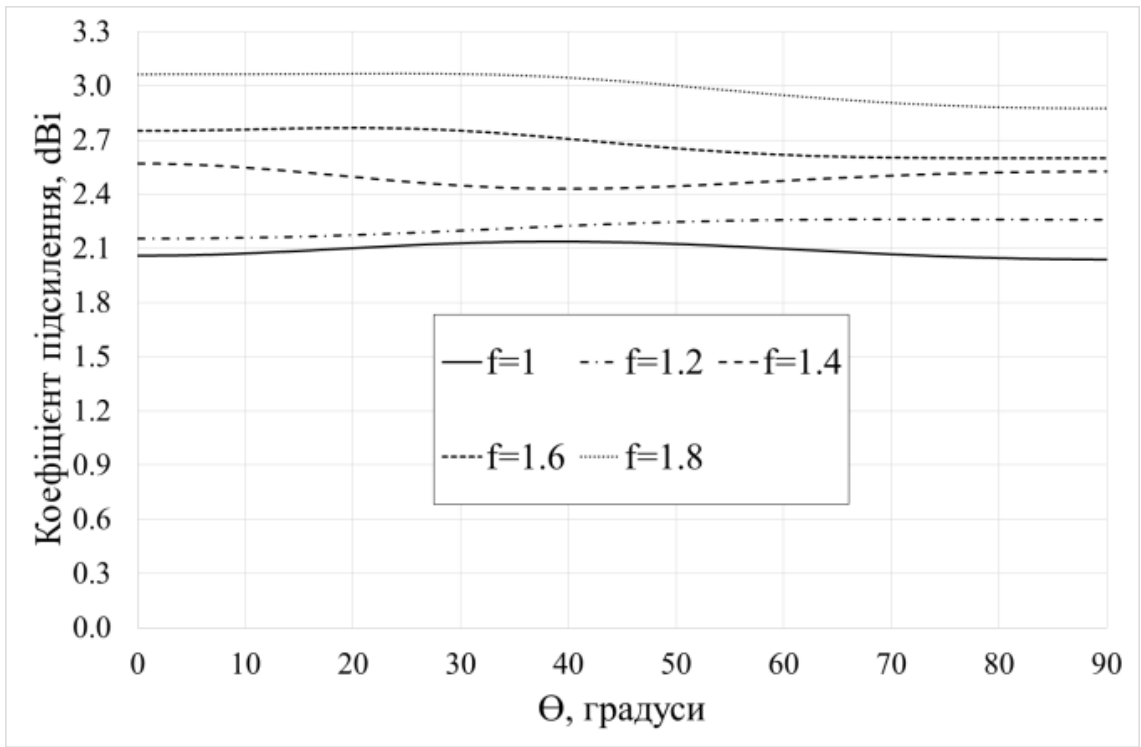
г)

Рисунок 11 – Залежність амплітуди електричної складової поля випромінювання від відстані спостереження  $r = 0,3$  м,  $\Theta = 30^\circ$  (а, б) та  $\Theta = 60^\circ$

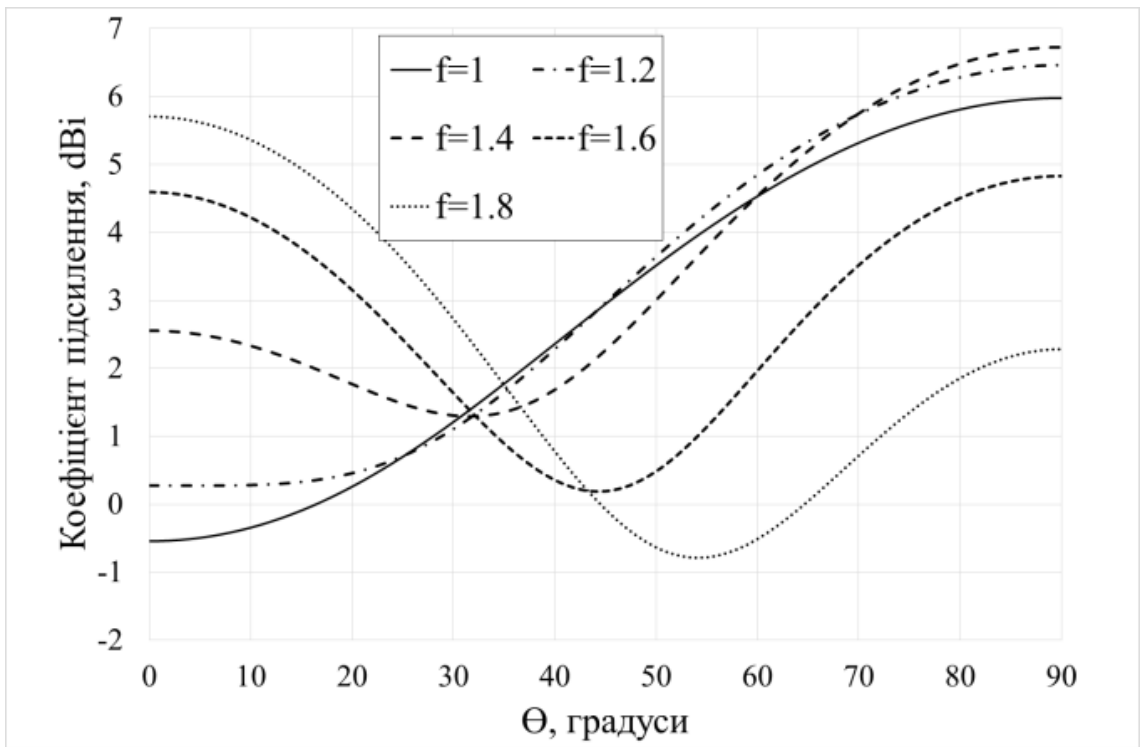
(в, г), де криві позначають випромінювання: 1 – щілини у площині Н, 2 – щілини у площині Е, 3 –комбінованого випромінювача у площині Н, 4 – комбінованого випромінювача у площині Е

Видно, що комбінований випромінювач на рис. 7 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. 12. Можна помітити, що діаграми напрямленості щілини є ізотропними з плавним збільшенням їхньої спрямованості на вищих частотах (рис. 12 а, в). Випромінювач Клевіна демонструє більш спрямоване випромінювання (рис. 12 г), але з небажаними максимумами при  $\Theta = 90^\circ$  для частот нижче, ніж 1,8 ГГц (рис. 12 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.

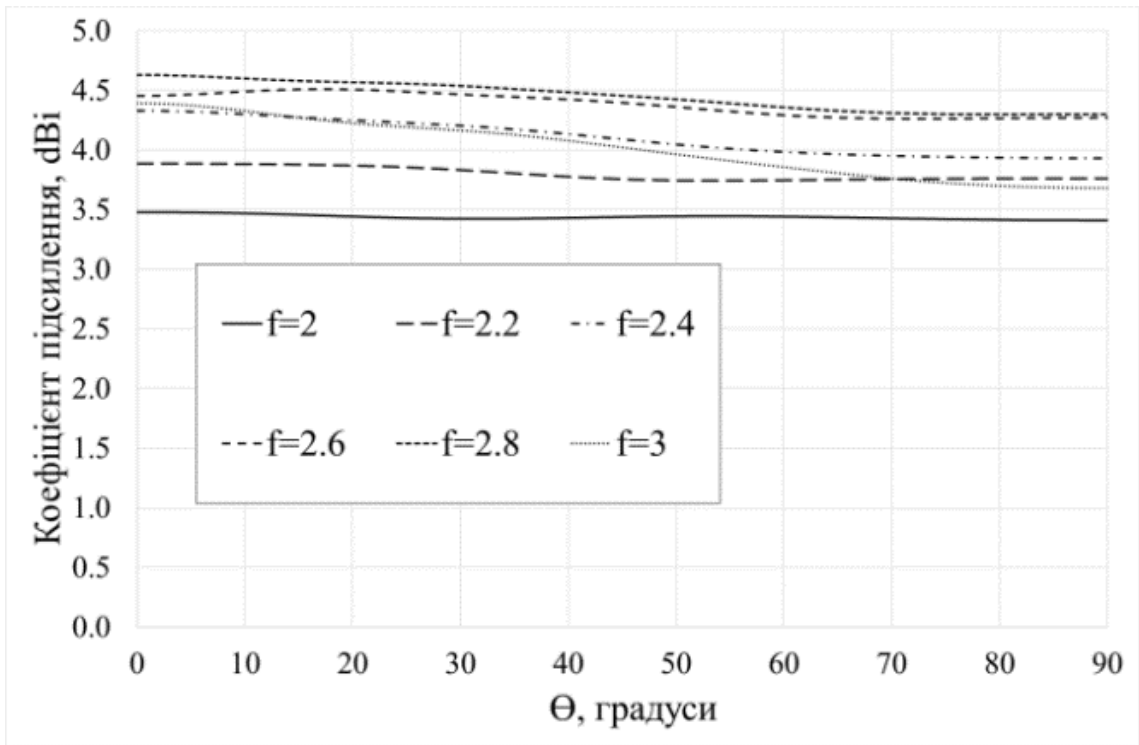
ДН прямокутної щілини у Н-площині завжди має максимум по нормалі до її площини і нулі у її площині. Коефіцієнти підсилення надширокосмугової щілини та випромінювача Клевіна мають схожий вигляд, що показано на рис. 13. Складний розподіл амплітуди магнітного струму на щілині генерує більш рівномірний розподіл спрямованості на високих частотах, як показано на рис. 13 (в). Слабкий вплив конусів (рис. 13 б, г) можна пояснити взаємно протилежним знаком струмів збудження кожного конуса центром щілини. Це спричиняє взаємну компенсацію результуючого поля в Н-площині.



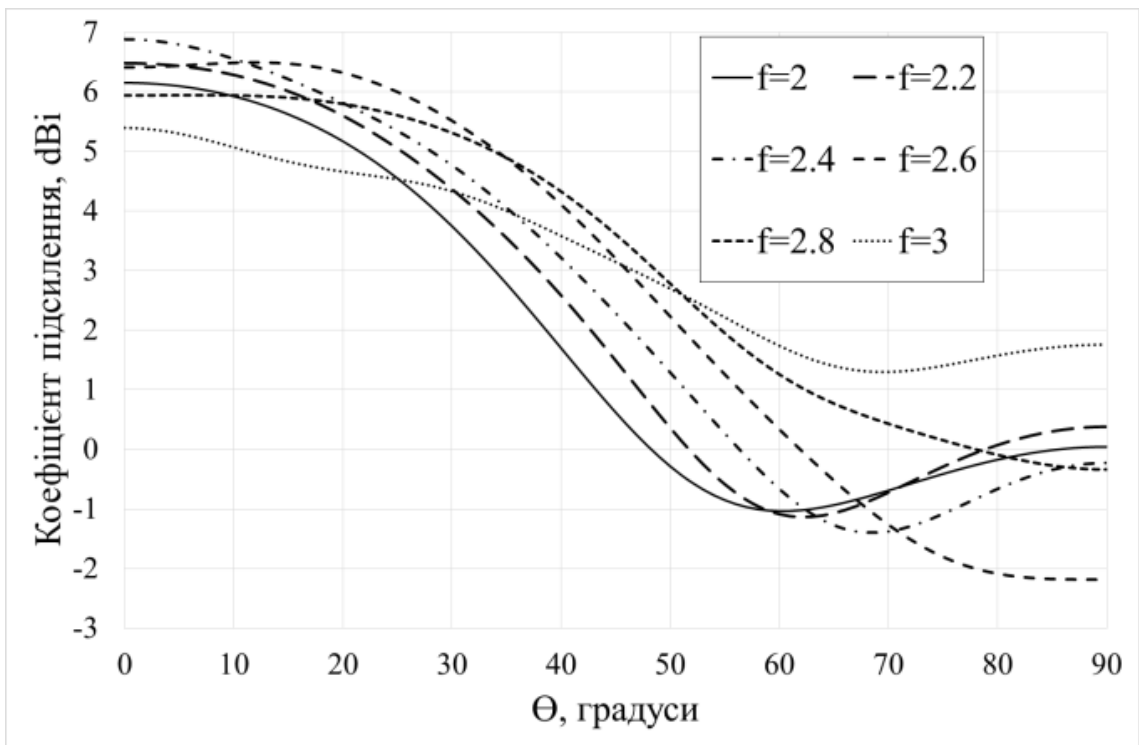
а)



б)

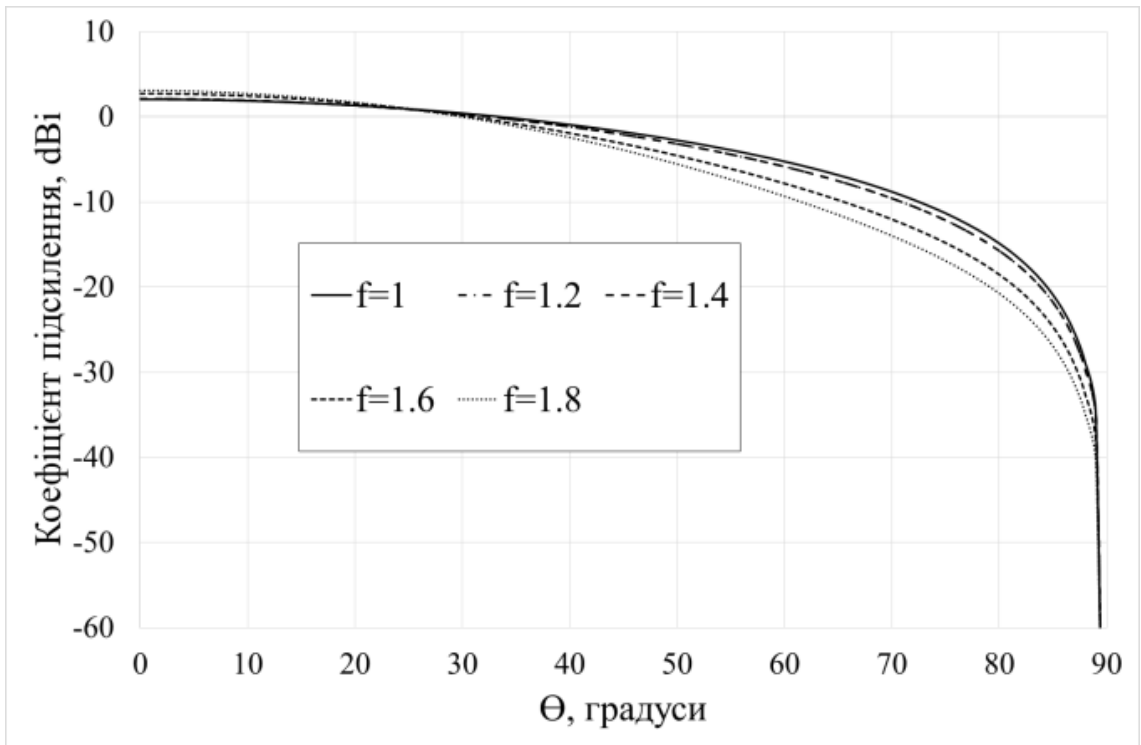


в)

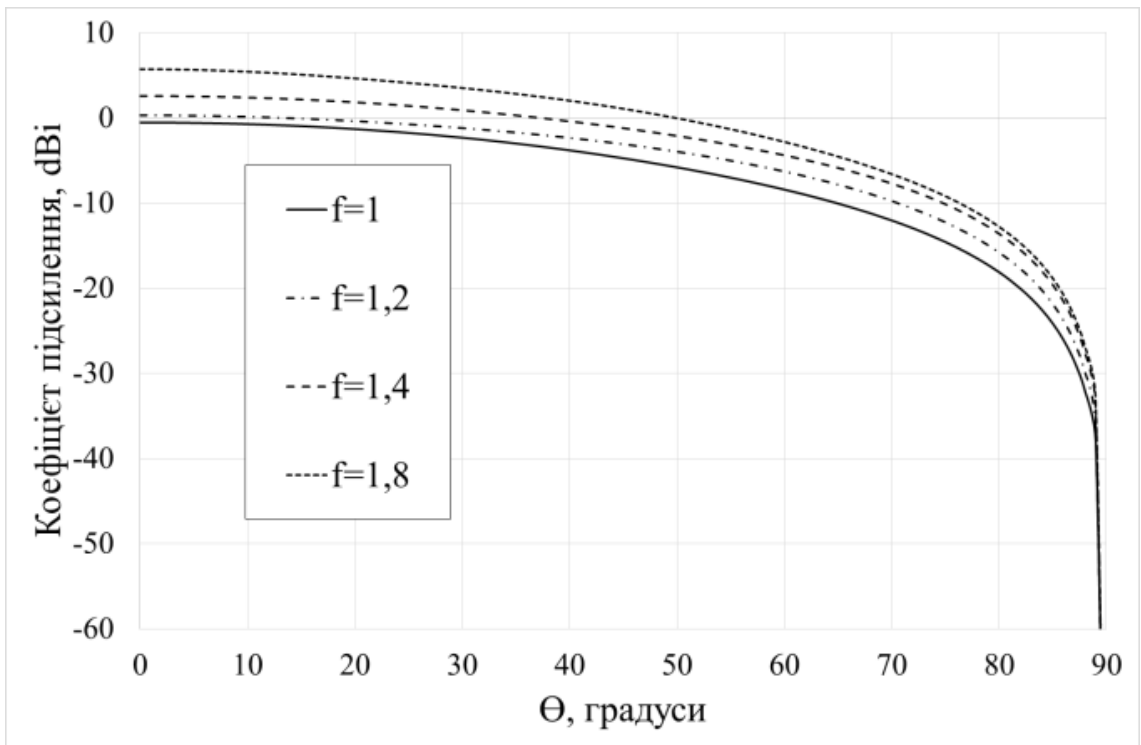


г)

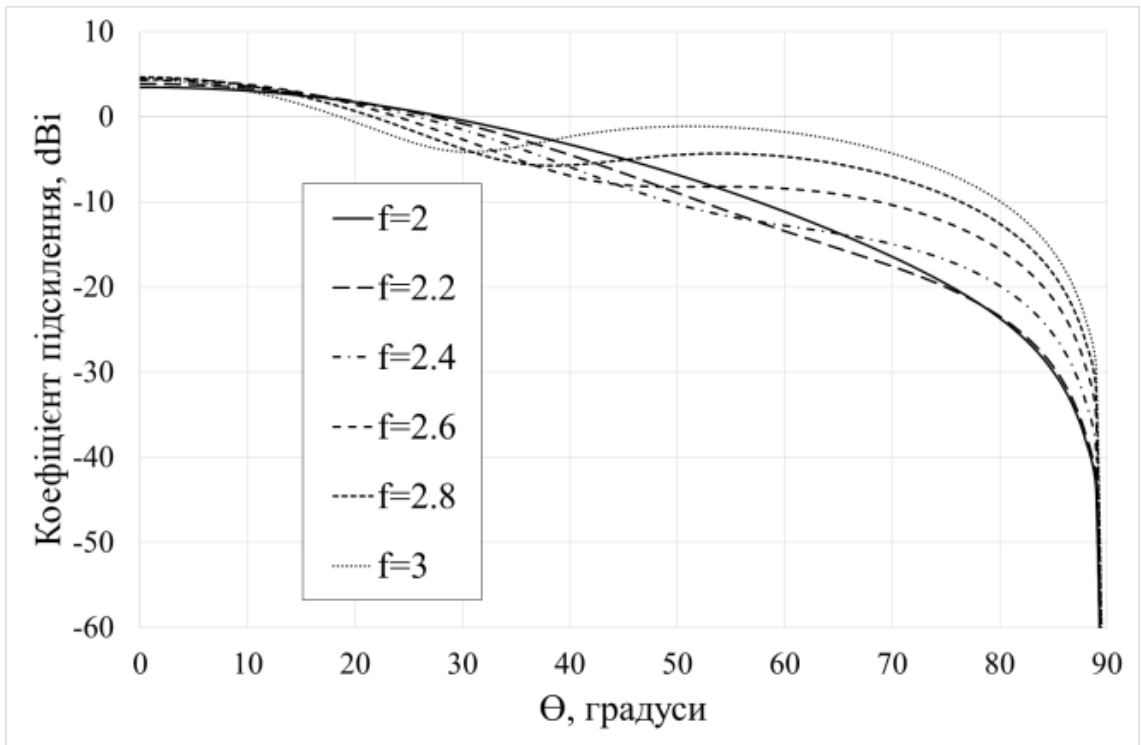
Рисунок 12 – Коефіцієнти підсилення у площині Е надширокосмугової щілини (а, в) та випромінювача Клевіна (б, г) на різних частотах (ГГц)



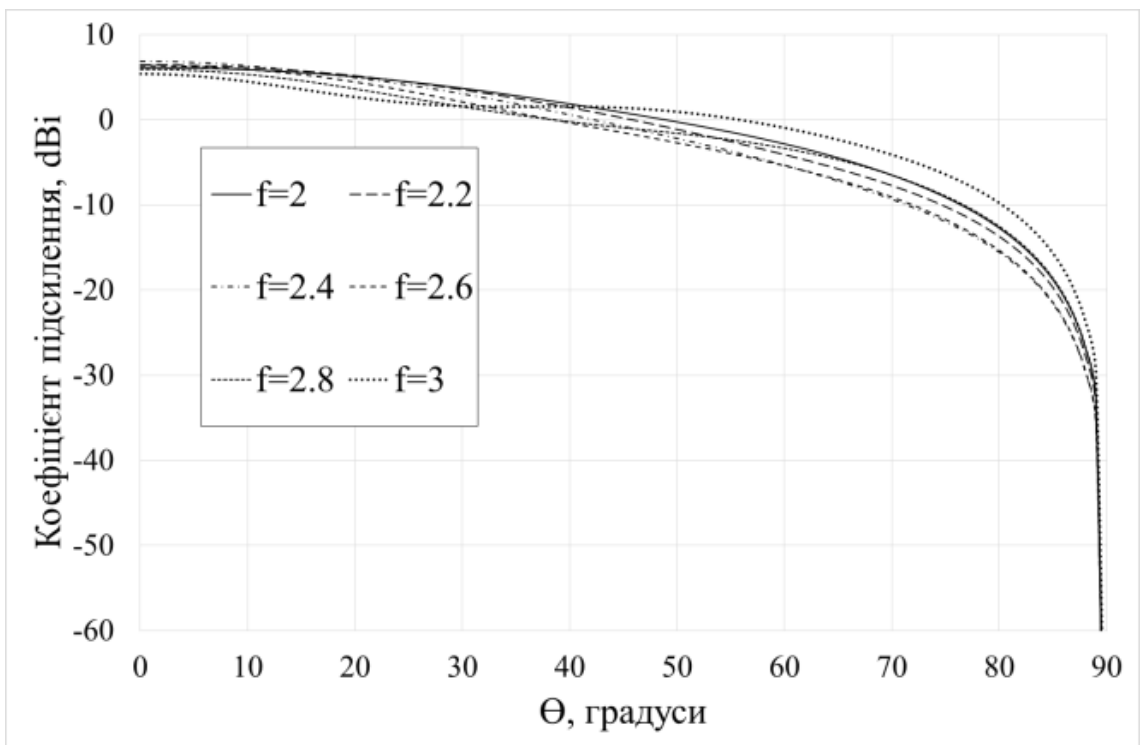
а)



б)



в)



г)

Рисунок 13 – Коефіцієнти підсилення у Н-площині надширокосмугової щілини (а, в) та випромінювача Клевіна (б, г) на різних частотах (ГГц)

### 3. НАДШИРОКОСМУГОВІ АНТЕННІ РЕШІТКИ НА ВИПРОМІНЮВАЧАХ КЛЕВІНА

У цьому розділі буде розглянуті декілька варіантів конструкцій антенних решіток в основі яких були використані надширокосмугові аналоги випромінювача Клевіна. Будуть результати оптимізації для отримання широкого діапазону робочих частот зі збереженням часової форми випроміненого електромагнітного імпульсу. Результати розділу опубліковані в працях конференції, на якій була виконана усна доповідь [36]

#### 3.1. Постановка задачі

Перехідне електромагнітне поле випромінюється з щілини, форма якої задається рівнянням (1), представленим в [16]

$$y(x) = \frac{\cos[\pi x](1 - \cos[\pi x])}{4}, \quad (1)$$

де  $y(x)$  – графік кривої в залежності від координати  $x$ . Щілину прорізано в металевому екрані з розмірами 540x440x1 мм.

Для роботи в діапазоні частот 2-10 ГГц щілина, що зображена на рис. 14, має бути розміщена у прямокутнику 140x17,6 мм із зазором 0,5 мм у центрі, де розташований генератор із внутрішнім опором 70 Ом.

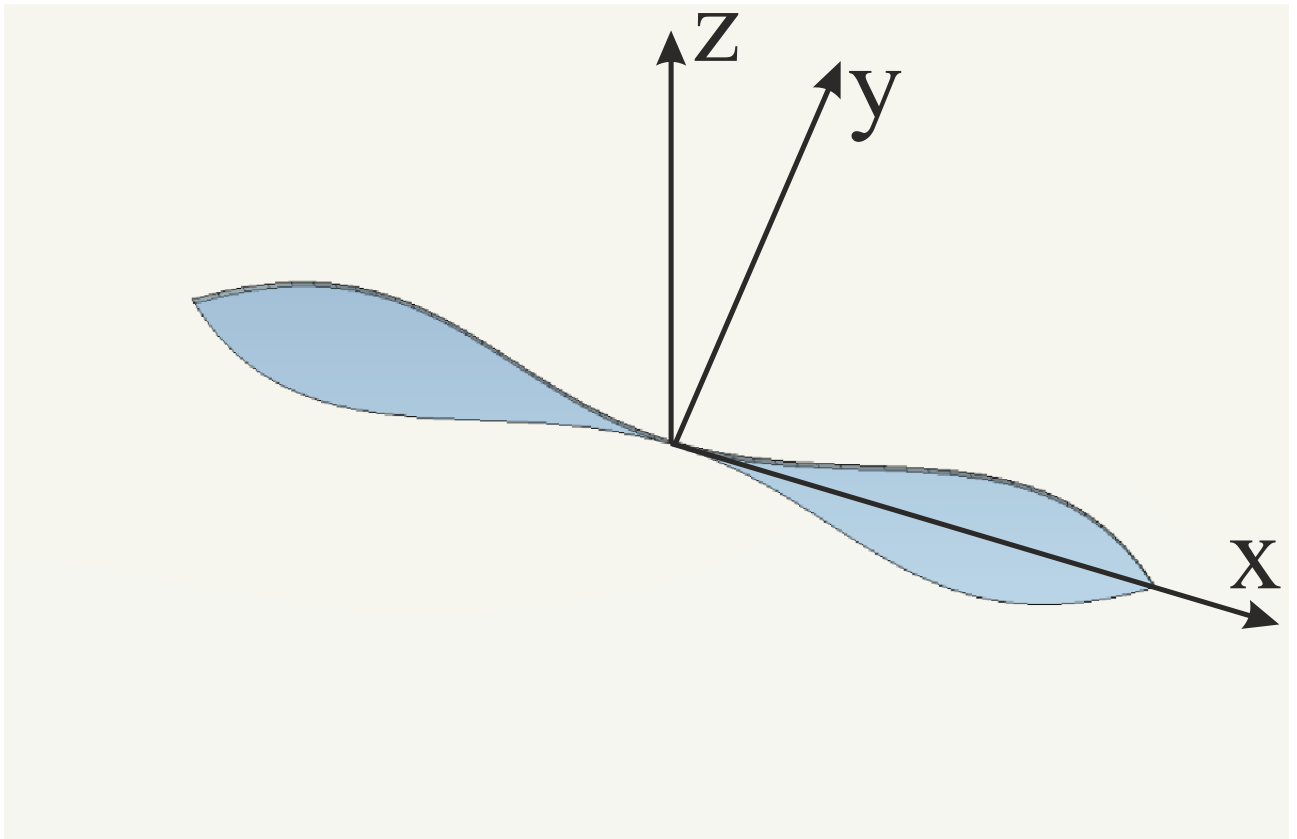


Рисунок 14 – Надширокосмугова щілина та координатна система

Підхід, який полягає в покращенні характеристик вузькосмугових щілин монополями [14], [30], використовувався в наших попередніх роботах [31], [32] для розширення робочого діапазону частот. Більш точне застосування формули (1) та багатопараметричне електродинамічне моделювання привело до зміни оптимальних геометричних параметрів конусів та їх положення порівняно з наведеними в [31], [32]. Вигляд вдосконаленого випромінювача представлено на рис. 15.

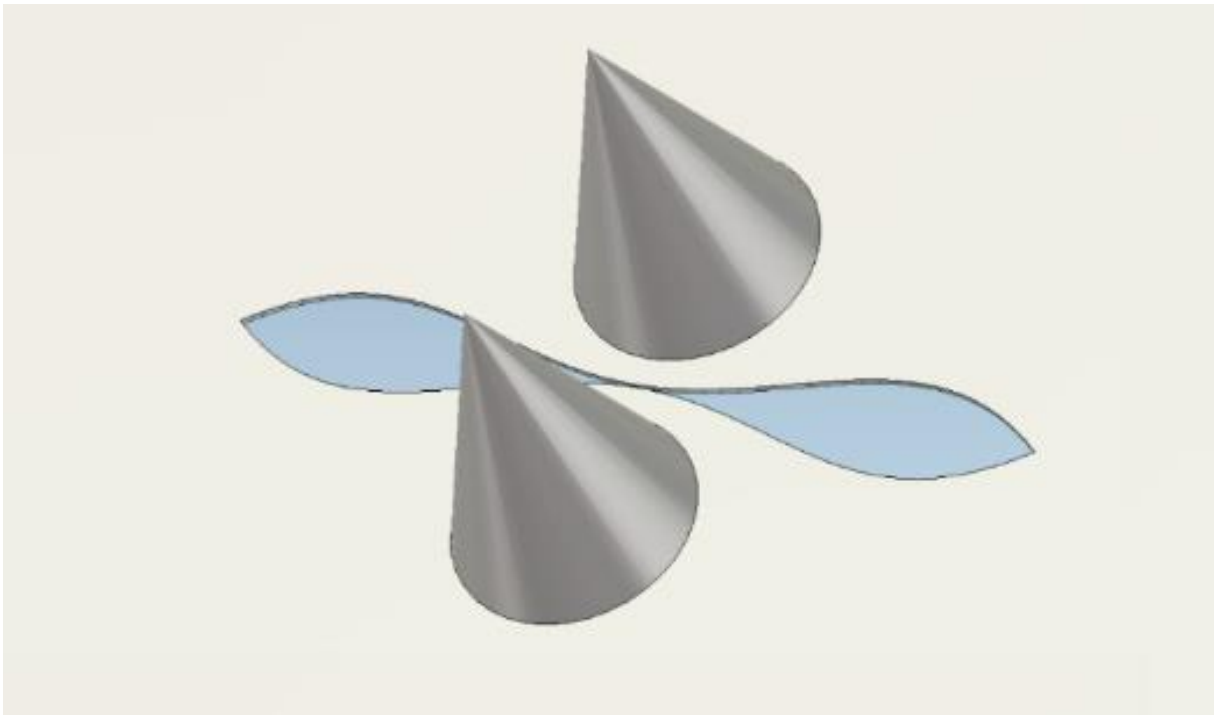


Рисунок 15 – Надширокосмуговий аналог випромінювача Клевіна

Тут оптимальними геометричними параметрами окремого випромінювача є висота провідних конусів 55,5 мм, радіус основи 20 мм, відстань від геометричного центру щілини до краю конуса 5 мм, тривалість імпульсу збудження 0,08 нс.

### 3.2 Числове моделювання

Усі числові розрахунки електродинамічної задачі виконуються за допомогою методу скінченних різниць у часовому просторі (FDTD). Розрахований коефіцієнт стоячої хвилі напруги (КСХН) демонструє краще узгодження щілини з конусами (рис. 15) у порівнянні з однією щілиною (рис. 14)

у широкому діапазоні робочих частот, як показано на рис. 16. Резонансні властивості конусів дозволяють майже вдвічі знизити нижню частоту робочого діапазону випромінювача.

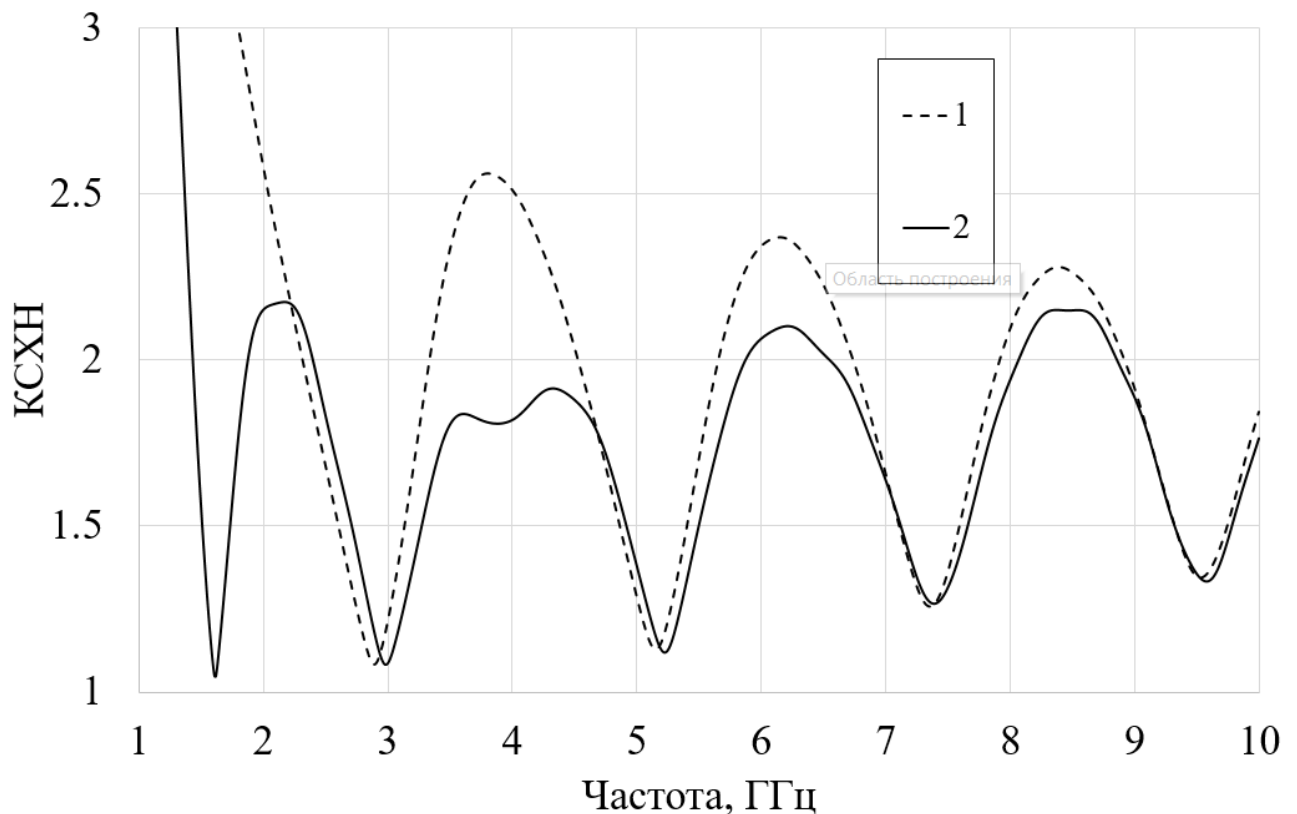


Рисунок 16 – Залежність КСХН від частоти надширокосмугової щілини (крива 1), надширокосмугового аналога випромінювача Клевіна, показаного на рис. 15 (крива 2)

Часові залежності електричних компонент полів випромінювання вздовж нормалі до екрана для цих двох випромінювачів порівнюються на рис. 17. Напруженість електричного поля розрахована на відстані 0,3 м, що відповідає дальній зоні даного випромінювача. Застосування конусів збільшує амплітуду випромінюваного електромагнітного імпульсу в півтора рази і викликає

затримку його появи [32]. Перехідний процес обумовлений появою додаткової ємності та індуктивності між конусами і щілиною.

Часові залежності напруженості електричного поля для різних кутів спостереження наведено на рис. 18 та рис. 19. Лише на рис. 18 для щілини спостерігаємо невеликі спотворення випромінюваного імпульсу та малу різницю амплітуди під кутами  $\varphi = 0^\circ$  та  $\varphi = 90^\circ$  (криві 1 та 3). Розглядаючи надширокосмуговий варіант випромінювача Клевіна (криві 2 і 4) на тому ж рисунку, можна відзначити, що напруженість електричного поля має більші амплітуди порівняно з випромінюваним однією щілиною. Однак при куті  $\varphi = 90^\circ$  амплітуда стає меншою. Провідні конуси, які перекривають або, можна сказати, затіняють собою напрямки, далекі від нормалі, і загалом збільшують спрямованість випромінювання. Проте, в той же час, помітна кутова залежність форми випромінюваного імпульсу може бути використана в системах імпульсного позиціонування [33], [34].

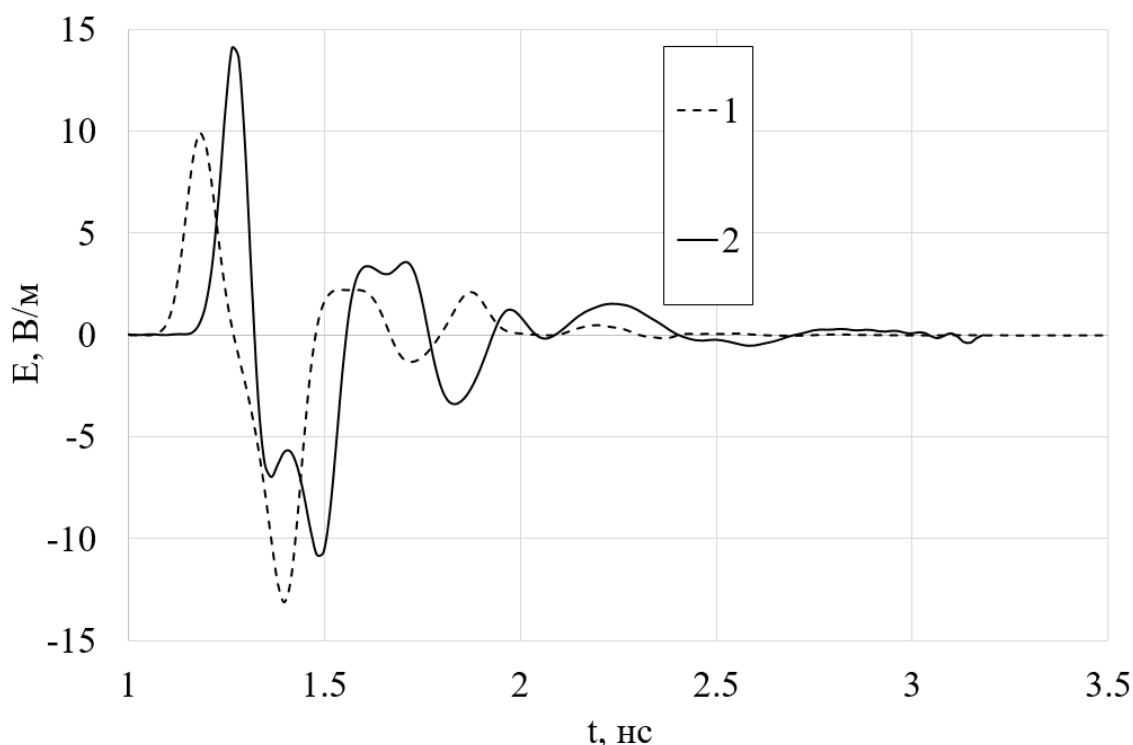


Рисунок 17 – Часові залежності амплітуди електричної компоненти випроміненого поля на відстані спостереження  $r=0.3$  м для  $\theta = 0^\circ$  та  $\varphi = 0^\circ$ , де 1 – щілина, 2 – випромінювач Клевіна на рис. 15 ( $\varphi$  – компонента поля)

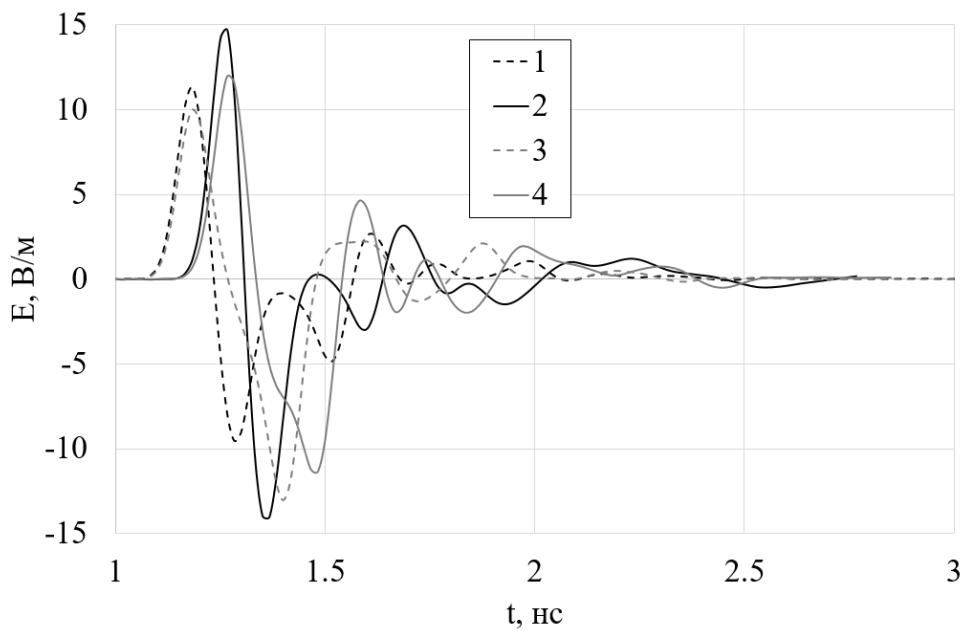


Рисунок 18 – Часові залежності амплітуди електричної компоненти випроміненого поля на відстані спостереження  $r=0.3$  м, де 1 - щілина, 2 – випромінювач Клевіна ( $\theta = 30^\circ$  та  $\varphi = 0^\circ$ ) ( $\varphi$  - компонента), 3 – щілина, 4 – випромінювач Клевіна ( $\theta = 30^\circ$  та  $\varphi = 90^\circ$ ) ( $\theta$  - компонента)

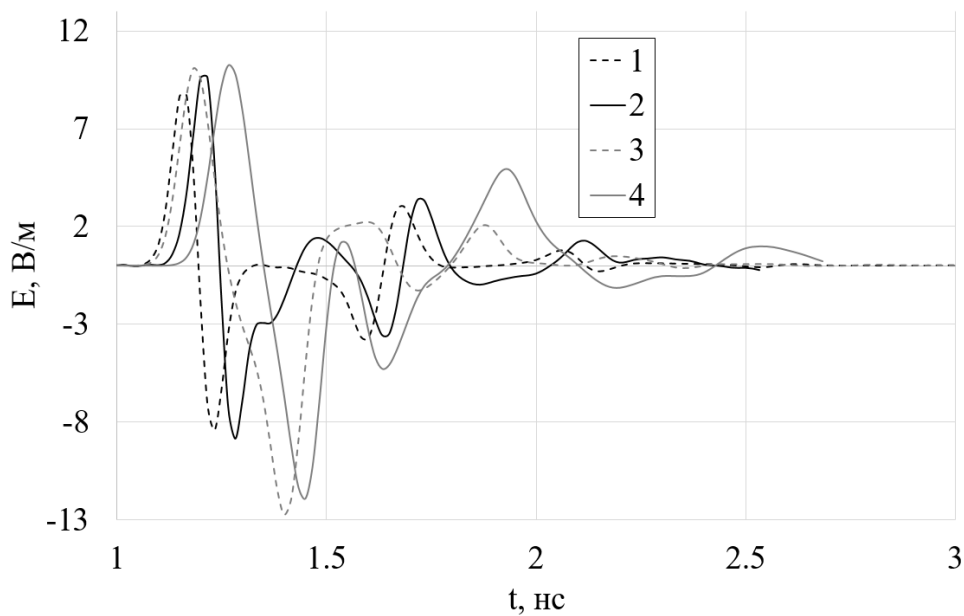


Рисунок 19 – Часові залежності амплітуди електричної компоненти випроміненого поля на відстані спостереження  $r=0.3$  м, де 1 – щілина, 2 – випромінювач Клевіна ( $\theta = 60^\circ$  та  $\varphi = 0^\circ$ ) ( $\varphi$  - компонента), 3 – щілина, 4 – випромінювач Клевіна ( $\theta = 60^\circ$  та  $\varphi = 90^\circ$ ) ( $\theta$  – компонента)

Однак, коли кут  $\theta$  збільшується до 60 градусів, як показано на рис. 19, випромінювач Клевіна генерує сильніші коливання в області хвоста імпульсу, ніж одна щілина.

Одиничний випромінювач Клевіна, описаний вище, використовується для побудови надширокосмугових антенних решіток. Прикладами розглянутих антенних решіток є комбінація двох випромінювачів Клевіна із спільною Н-площиною (рис. 20), комбінація двох випромінювачів із спільною площиною Е (рис. 21) та їх комбінація для 4 випромінювачів (рис. 22). Усі розрахунки проведені на відстані спостереження  $r = 0,6$  м.

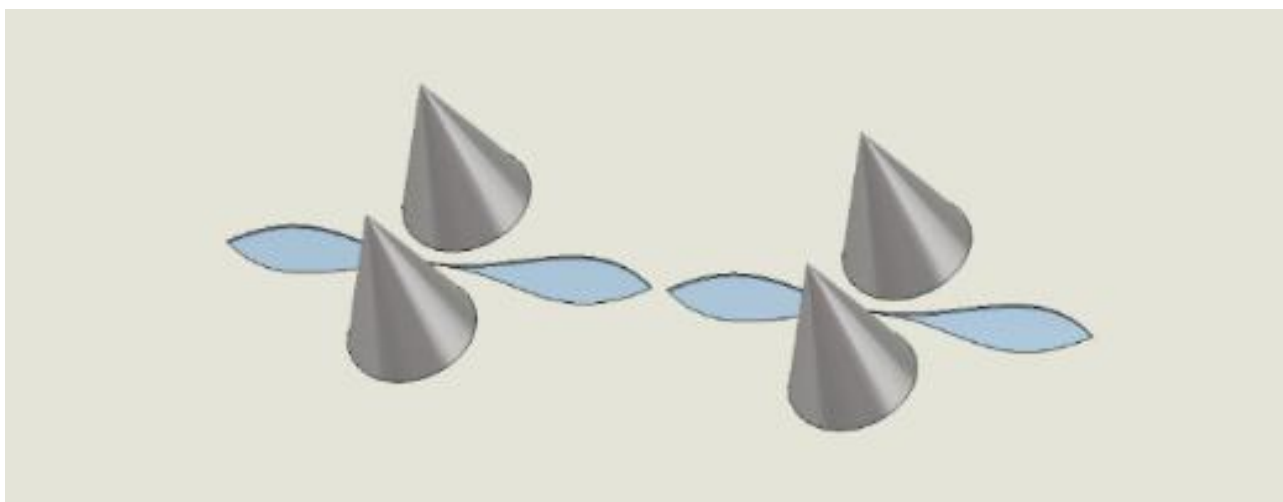


Рисунок 20 – Антенна решітка з двома НШС випромінювачами зі спільною Н площиною

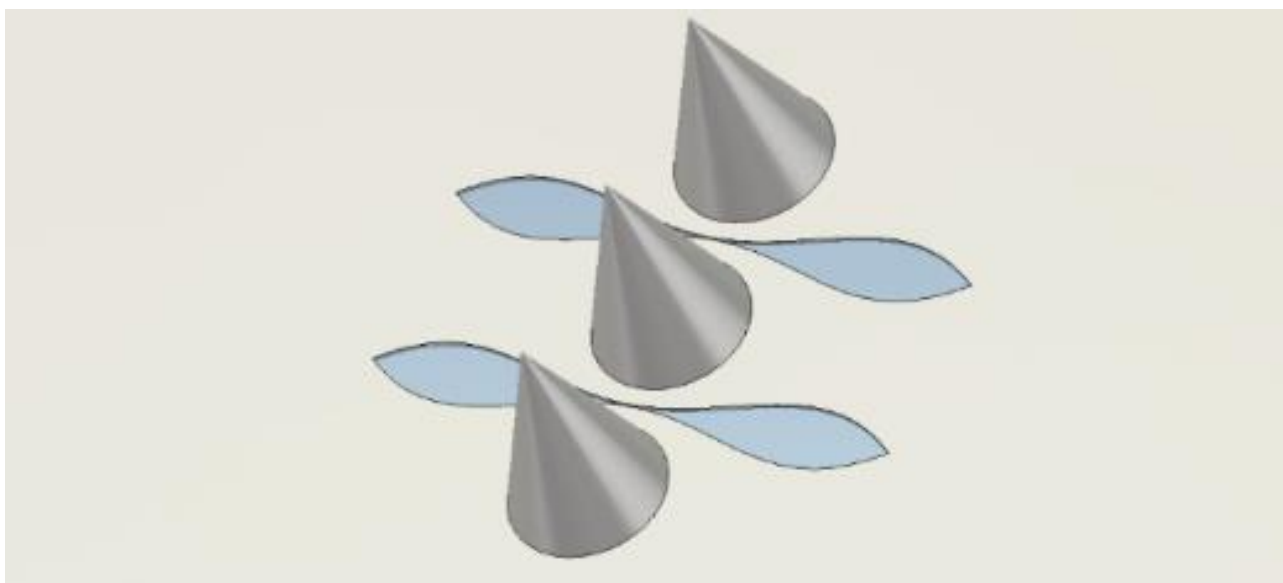


Рисунок 21 –Антенна решітка з двома НШС випромінювачами зі спільною Е  
ПЛОЩИНОЮ

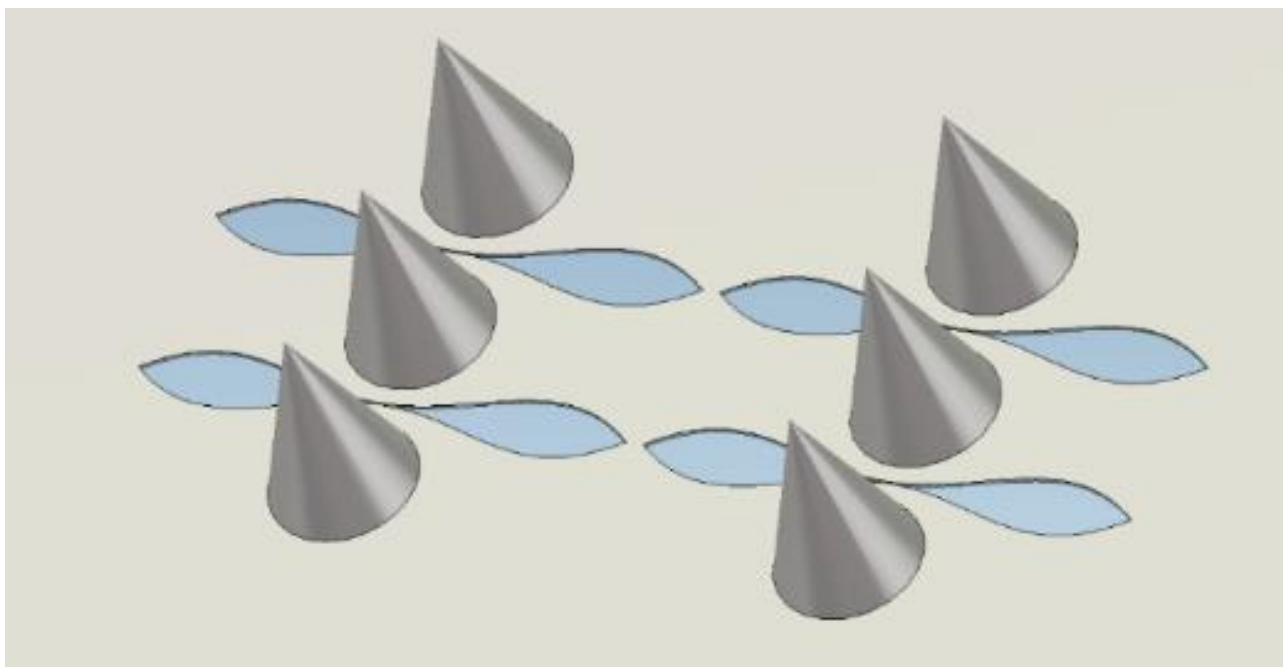


Рисунок 22 –Антенна решітка з чотирьох поєднаних НШС випромінювачів

По-перше, цікаво проаналізувати характер випромінюваного електромагнітного поля в напрямку нормалі до площини екрана. Часові залежності  $\varphi$  - компоненти випромінюваного поля по нормалі наведено на рис 15.

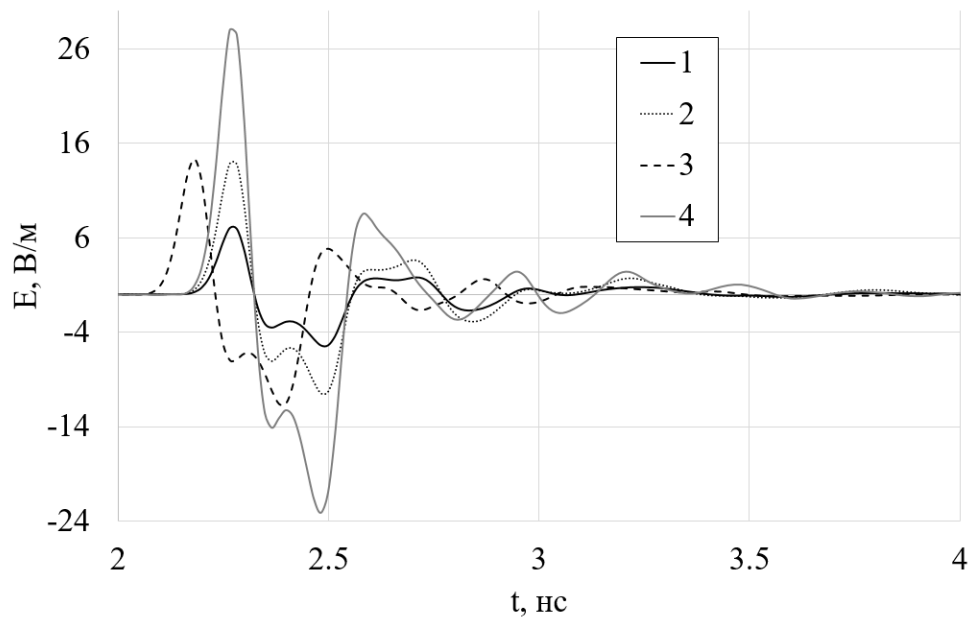


Рисунок 23 –Часові залежності амплітуди електричної компоненти випроміненого поля на відстані спостереження  $r=0.6$  м, де 1 – одиничний випромінювач, 2 – АР в площині Н, 3 – АР в площині Е, 4 –  $2 \times 2$  АР ( $\theta = 0^\circ$  та  $\varphi = 0^\circ$ )( $\varphi$  – компонента)

Видно, що при подвоєнні кількості випромінювачів (криві 2 і 3), амплітуда поля збільшується вдвічі. У випадку антенної решітки з чотирьох випромінювачів можна відзначити пропорційне збільшення амплітуди випромінюваного поля в порівнянні з іншими варіантами. До особливостей антенної решітки  $2 \times 2$  можна віднести те, що зі збільшенням амплітуди фронту імпульсу, амплітуда його хвоста істотно не збільшується, хоча тривалість затухаючих коливань більша в порівнянні з одиночним випромінювачем і АР, наведеними на рис. 20 та рис. 21.

Важливою характеристикою надширокосмугових випромінювачів є залежність від кута спостереження. Таким чином, рис. 22-27 демонструють різні випадки для різних компонент поля та кутів. Помітно, що при різних кутах спостереження, відмінних від нормалі, антенна решітка  $2 \times 2$  дійсно формує

максимальну амплітуду в будь-який момент часу. Наприклад, на рис. 24 показано, що для АР з 4 елементами імпульс розбивається на два, які йдуть один за одним. Це явище також можна спостерігати для деяких кутів та інших АР: на рис. 25 для АР в Н-площині та 2x2 АР, на рис. 26 для всіх АР. З іншого боку, на рис. 25 і 27 показано сильну зміну форми випромінюваного імпульсу для АР. Це вказує на покращену спрямованість випромінювання АР.

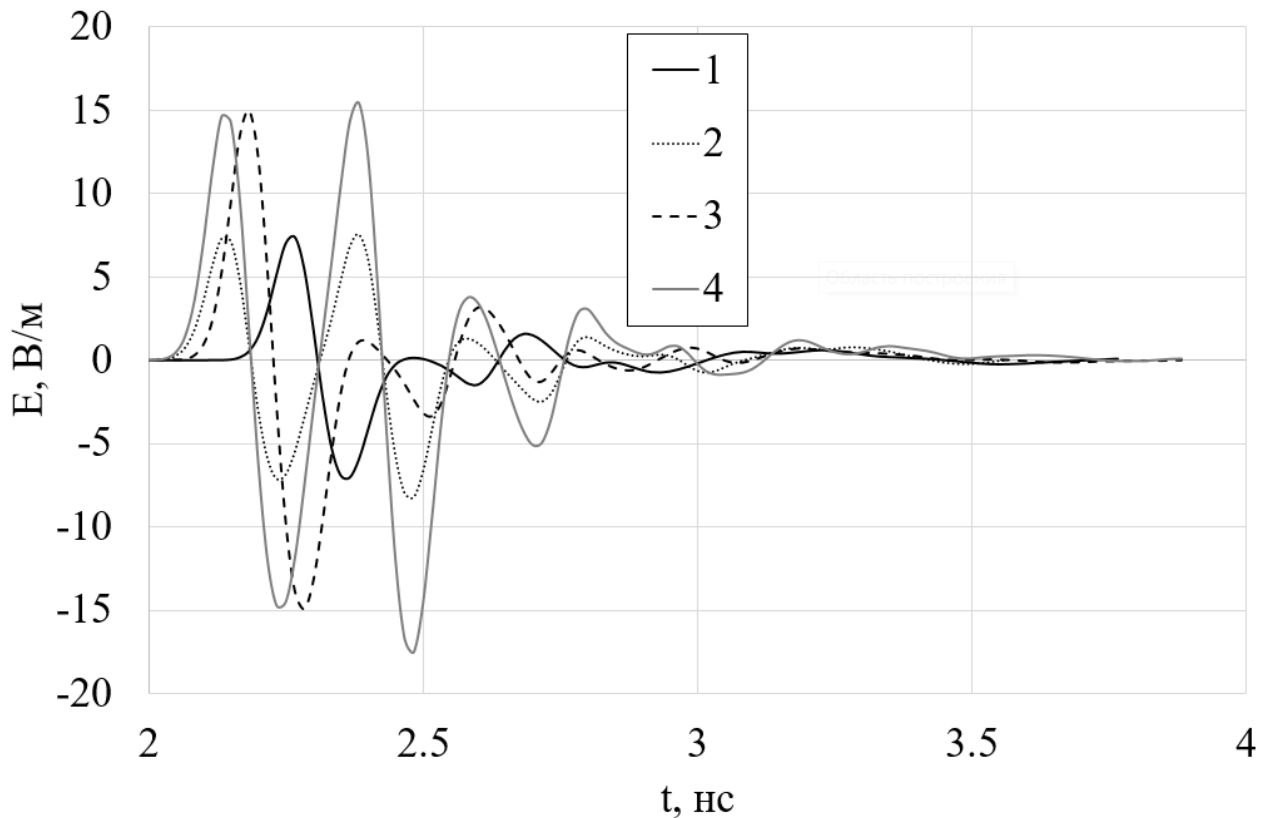


Рисунок 24 –Часові залежності амплітуди електричної компоненти випроміненого поля на відстані спостереження  $r=0.6$  м, де 1 – одиничний випромінювач, 2-АР в площині Н, 3 – АР в площині Е, 4 – 2x2 АР ( $\theta = 30^\circ$  та  $\varphi = 0^\circ$ ) ( $\varphi$  – компонента)

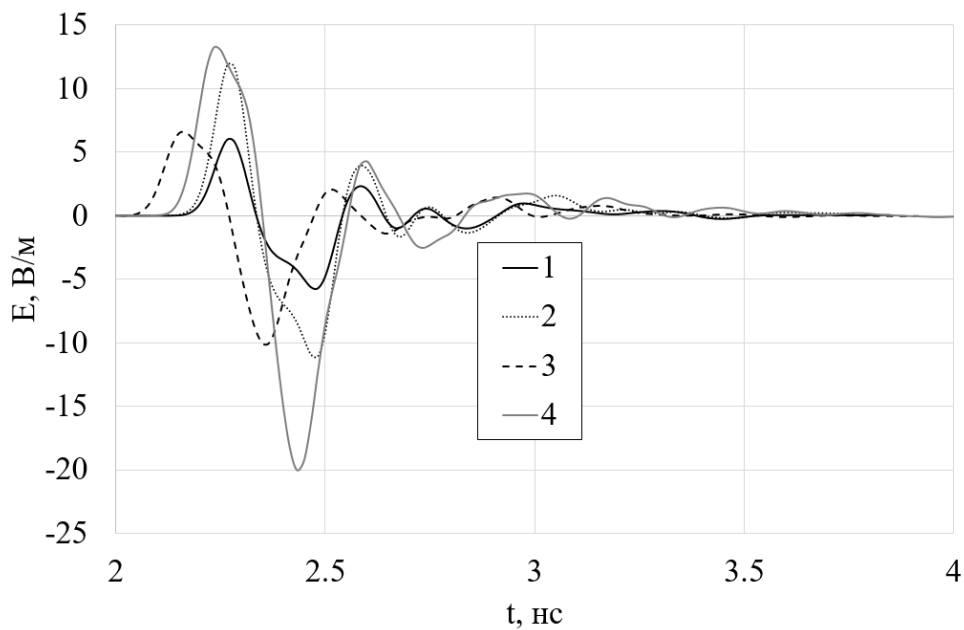


Рисунок 25 – Часові залежності амплітуди електричної компоненти випроміненого поля на відстані спостереження  $r=0.6$  м, де 1 – одиничний випромінювач, 2 – АР в площині Н, 3 – АР в площині Е, 4 –  $2 \times 2$  АР ( $\theta = 30^\circ$  та  $\varphi = 90^\circ$ ) ( $\theta$  – компонента)

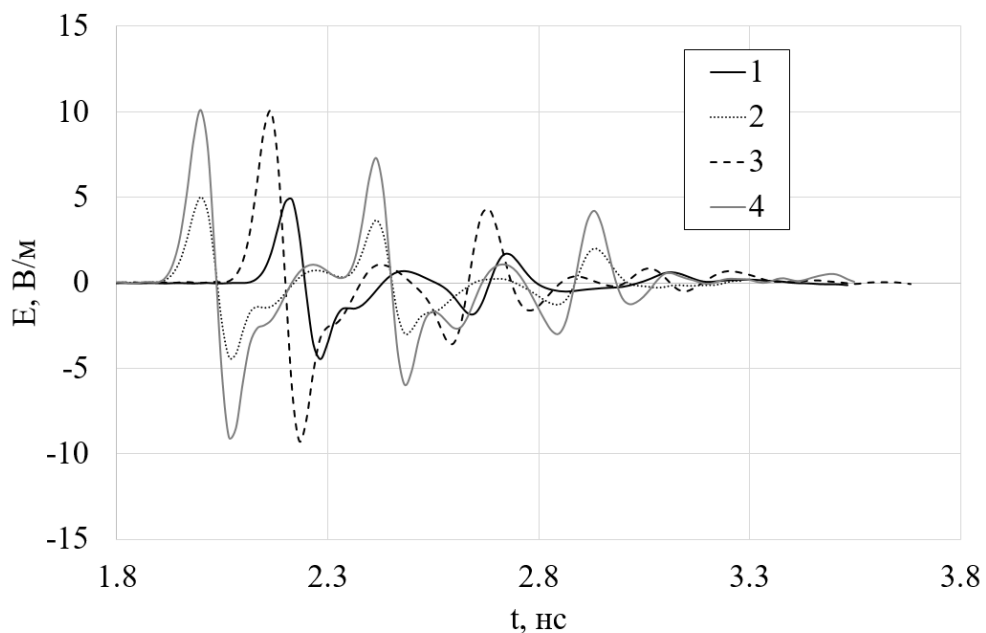


Рисунок 26 – Часові залежності амплітуди електричної компоненти випроміненого поля на відстані спостереження  $r=0.6$  м, де 1 – одиничний випромінювач, 2 – АР в площині Н, 3 – АР в площині Е, 4 –  $2 \times 2$  АР ( $\theta = 60^\circ$  та  $\varphi = 0^\circ$ ) ( $\varphi$  – компонента)

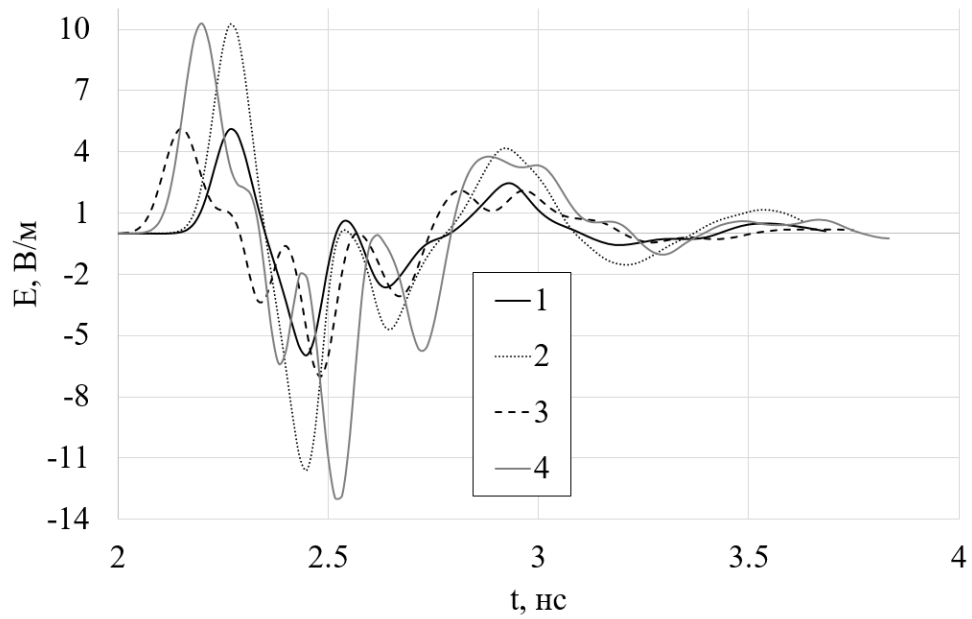


Рисунок 27 – Часові залежності амплітуди електричної компоненти випроміненого поля на відстані спостереження  $r=0.6$  м, де 1 – одиничний випромінювач, 2 – АР в площині Н, 3 – АР в площині Е, 4 –  $2 \times 2$  АР ( $\theta = 60^\circ$  та  $\varphi = 90^\circ$ ) ( $\theta$  – компонента)

#### 4. 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. Крім компактності варто відмітити невелику парусність даної конструкції, що можна використати для розташування випромінювача на безпілотних літальних апаратах для реалізації надширокосмугового стійкого до завад зв'язку.

Показана можливість використання надширокосмугового аналога випромінювача Клевіна для побудови антенних решіток. Кутова залежність основних випромінювальних характеристик показує здатність ефективно направляти надширокосмугові хвилі без сильних змін їхньої часової форми імпульсу. Більш сильна зміна форми випромінюваного імпульсу розглянутих антенних решіток може покращити параметри системи імпульсного позиціонування [33].

## ЖИТЕПАТҮПА

1. Schantz H. G. A brief history of UWB antennas. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2004. Vol. 19, no. 4. P. 22–26. URL: <https://doi.org/10.1109/maes.2004.1301770>
2. Schantz H. G. A brief history of UWB antennas. *IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003*, Reston, Virginia, USA. URL: <https://doi.org/10.1109/uwbst.2003.1267834>
3. Schantz H. G. Three centuries of UWB antenna development. *2012 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB2012)*, Syracuse, NY, USA, 17–20 September 2012. 2012. URL: <https://doi.org/10.1109/icuwb.2012.6340483>
4. Schantz H. G., Beeler W., Dickson D. UWB planar bulbous dipole antennas. *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Washington, DC, USA. URL: <https://doi.org/10.1109/aps.2005.1551848>
5. Luszcz J, Smolenski R. Low frequency conducted emissions of grid connected static converters. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*; 2015;4(1):86-100.
6. 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.
7. Kebel R, Stadtler 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.
8. Vogel MH. Impact of lightning and high-intensity radiated fields on cables in aircraft. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. 2014; 3(2):56- 61.
9. Grcev LD, Menter FE. Transient electromagnetic fields near large earthing systems. *IEEE Trans. on Magnetics*. 1996; 32(3):1525-1528.
10. 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.

11. 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.
12. Harmuth H. *Nonsinusoidal Waves for Radar and Radio Communications*. Academic Press, New York; 1981.
13. Schantz HG. *The art and science of ultrawideband antennas*. Artech House, London; 2005.
14. 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)
15. 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.
16. Barnes MA. Ultra-wideband magnetic antenna. US patent 6,091,374, 2000 Jul. 18; 16 p.
17. Muhammad Saeed Khanl, M. Farhan Shafique, A.D. Capobianco, E. Autizi, Imran Shoaib, "Compact UWB-MIMO Antenna Array with a Novel Decoupling Structure", In Proceedings of 2013 10th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST) Islamabad, Pakistan, 15th - 19th January, 2013, pp. 347-350.
18. D. Sipal, M. P. Abegaonkar and S. K. Koul, "Easily Extendable Compact Planar UWB MIMO Antenna Array," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2328-2331, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2717496.
19. X. Yang, J. Salmi, A. F. Molisch, S. Qiu, S. Sangodoyin and B. Wang, "Trapezoidal monopole antenna and array for UWB-MIMO applications," 2012

- International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICMMT.2012.6229937.
20. O. A. Orlenko, G. P. Pochanin and V. G. Korzh, "Radiation of Electromagnetic Field Pulses by Active and Passive UWB Slot Antennas," 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 2020, pp. 1056-1060, doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252604.
21. D. O. Batrakov, M. S. Antyufeyeva, A. G. Batrakova and S. N. Urdzik, "The Effect of Secondary Reflections on the Quality of Layers Thickness Assessment Using UWB GPR Signals," 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 2020, pp. 1132-1135, doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252812.
22. Through-Wall Moving Target Tracking Algorithm in Multipath Using UWB Radar / J. Dong et al. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2021. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/lgrs.2021.3050501>
23. G. Pochanin, L. Capineri, T. Bechtel, V. Ruban, P. Falorni, F. Crawford, T. Ogurtsova, L. Bossi, "Radar Systems for Landmine Detection : Invited Paper," 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 2020, pp. 1118-1122, doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252789.
24. F. Foroutan and N. K. Nikolova, "UWB Active Antenna for Microwave Breast Imaging Sensing Arrays," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 10, pp. 1951-1955, Oct. 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2929016.
25. T. Sugitani, S. Kubota, A. Toya and T. Kikkawa, "Compact planar UWB antenna array for breast cancer detection," *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2012, pp. 1-2, doi: 10.1109/APS.2012.6348794.
26. R. Akhmedov, "Neural Radio in DS-UWB IoT Applications," 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 2020, pp. 1073-1078, doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252611.

27. B. Huang and Y. Xu, "Analysis and design of a novel UWB antenna array," 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2010, pp. 313-316, doi: 10.1109/ICMMT.2010.5524947.
28. Xuan Hui Wu, A. A. Kishk and Zhi Ning Chen, "A linear antenna array for UWB applications," 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005, pp. 594-597 Vol. 1A, doi: 10.1109/APS.2005.1551389.
29. A. Revna, L. I. Balderas and M. A. Panduro, "4D Antenna Array of UWB Vivaldi Elements with Low Side Lobes and Harmonic Suppression," 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2018, pp. 1505-1506, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609420.
30. S. L. Berdnik, N. K. Blinova, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko and Y. M. Penkin, "Spherical antenna with a Clavin radiator," 2015 XXth IEEE International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), 2015, pp. 75-77, doi: 10.1109/DIPED.2015.7324256.
31. O. Dumin, P. Fomin, V. Plakhtii, M. Nesterenko, "Ultrawideband Combined Monopole-Slot Radiator of Clavin Type", 2020 IEEE XXVth International Seminar/Workshop Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), 2020. pp. 32–36.
32. M.V. Nesterenko, V.A. Katrich, Y.M. Penkin, S.L. Berdnik, O.M. Dumin, "Combined Vibrator-Slot Radiators in Antenna Arrays. In: Combined Vibrator-Slot Structures: Theory and Applications.", Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 689. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60177-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60177-5_8)
33. Dumin O., Plakhtii V., Persanov I., Shuaishuai C. Positioning System Using Classification of Ultra Short Electromagnetic Pulse Forms by ANN // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET – 2020) – Lviv-Slavske (Ukraine, February 25-29). – 2020.

34. Persanov I., Plakhtii V., Pryshchenko O., Dumin O., Fomin P.. Noise Immunity of UWB Positioning System on ANN // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). – Kharkiv, (Ukraine, September 21-25). – 2020. – P. 1083-1088
35. Думін О.М., Плахтій В.А., Фомін П.Г., Нестеренко М.В. Надширокосмуговий комбінований вібраторно-щілинний випромінювач типу Клевіна // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2020. № 32. С. 18-24.
36. UWB Antenna Arrays with the Monopole-Slot Radiator of Clavin Type / P. Fomin et al. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 26–28 August 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/ukrcon53503.2021.9575282>