

Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова

ОГУРЦОВА ТЕТЯНА МИКОЛАЇВНА

УДК 537.86

**МЕТАЛЕВІ РАМКИ З ФЕРИТОВИМ СТРИЖНЕМ
ЯК ПРИЙМАЛЬНІ АНТЕНИ НАДШИРОКОСМУГОВИХ
ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ**

01.04.03 – радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
фізико-математичних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис
Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Почанін Геннадій Петрович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України,
завідувач відділу радіофізичної інтроскопії

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Горобець Микола Миколайович,
Харківський національний університет імені
В. Н. Каразіна,
завідувач кафедри прикладної електродинаміки;

доктор технічних наук, професор
Сухаревський Олег Ілліч,
Науковий центр Повітряних Сил
Харківського національного університету
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба МО України,
провідний науковий співробітник

Захист відбудеться 23 вересня 2021 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12

Автореферат розісланий «19» серпня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



І.В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Перші публікації про використання в радіолокації та зв'язку надширокосмугових (НШС) сигналів з'явилися більше тридцяти років тому. Використання часово- та просторово обмежених електромагнітних (ЕМ) полів із різноманітними видами обвідної та шириною спектра значно розширило можливості традиційної радіолокації. Розробка та впровадження надширокосмугових систем стали якісним кроком у розвитку радіолокації.

Сигнали у вигляді НШС імпульсних ЕМ полів нано- та субнаносекундного діапазонів тривалостей використовуються в радіолокаційних системах різного цільового призначення, особливо в задачах підповерхневого зондування. Серед цих задач слід відзначити як найбільш важливу для України - пошук мін під час гуманітарного розмінування (території Донбасу), а також неруйнівний моніторинг і визначення стану підповерхневої частини інженерних споруд – дорожнього одягу, мостів, гребель, тощо. Ці задачі піддаються розв'язанню шляхом застосування методів НШС радіолокації, але можливості сучасних засобів радіолокації не дають використати їх повною мірою.

Використання НШС імпульсів у підповерхневій радіолокації сформувало особливі вимоги до приймальних антен радарів: неспотворене приймання сигналів; висока чутливість; малі розміри та вага.

Умовою виявлення та розпізнавання підповерхневих об'єктів у першу чергу є висока точність реєстрації та відтворення часових залежностей (форми) прийнятих сигналів, розсіяних середовищем із підповерхневими об'єктами. Завдяки формі відбитого сигналу можна визначити об'єкт радіолокаційного зондування.

Для неспотвореного приймання НШС імпульсних сигналів, як у задачах електромагнітної сумісності, так і при вимірюванні параметрів потужних імпульсних ЕМ полів ядерного вибуху або блискавок використовувалися малогабаритні датчики імпульсних електричних і магнітних полів.

Але на відміну від згаданих задач, де амплітуди напруженості ЕМ полів дуже великі та чутливість антени може бути незначною, в задачах підповерхневої радіолокації сигнали, які треба реєструвати, мають малу амплітуду. Для реєстрації таких сигналів чутливість елементарних антен є недостатньою.

Тому основними задачами, що вимагають свого розв'язання на сучасному етапі розвитку методів і засобів НШС відеоімпульсного підповерхневого зондування, є підвищення якості первинної радіолокаційної інформації, для чого необхідно якомога точніше відтворювати форму навіть слабких сигналів.

Ця задача особливо актуальна тоді, коли необхідно ідентифікувати об'єкти в середовищі, електрофізичні параметри якого майже не відрізняються від параметрів самого об'єкта (слабоконтрастні об'єкти). Якість первинних даних дуже важлива при глибинному зондуванні середовища, а також при дослідженні середовищ, що характеризуються великими поглинанням і дисперсією.

За приймання та реєстрацію радіолокаційних сигналів відповідає приймальна антена радара. Саме на її удосконалення направлена ця робота. Антена має бути

малогабаритною, чутливою, та не спотворювати форму сигналу, що приймається. Ці три вимоги є загальними для будь-яких НШС імпульсних радіолокаторів.

Розв'язати задачу чутливого неспотвореного приймання сигналів зондування у вигляді НШС імпульсних ЕМ полів нано- та субнаносекундного діапазонів тривалостей можна, використовуючи феритові рамкові антени. Наявність фериту суттєво впливає на процеси, які відбуваються в антені при прийманні НШС імпульсів. Виявляються задіяними одразу два механізми. З одного боку, рамка є елементом, який більш чутливий до швидких змін магнітного поля. Повільні зміни індукують в ній дуже малий струм. З іншого – феритовий стрижень, який намагнічується повільніше та концентрує в собі магнітне поле, що збуджує антену, дозволяє значно збільшити магнітну індукцію та, відповідно, струм, що індукується частиною сигналу, яка змінюється повільно. Таким чином, використання феритових стрижнів у приймальних антенах дає змогу підвищити їх чутливість, незважаючи на малі габарити антени, та розширити їхню робочу смугу частот у бік низьких частот.

Отже, дослідження фізичних закономірностей процесу трансформації імпульсного ЕМ поля нано- та субнаносекундного діапазонів тривалості в імпульсний сигнал на виході приймальної феритової антени є важливими та багатообіцяючими для практики. Результати цих досліджень стануть основою для створення малогабаритних антен, призначених для чутливого неспотвореного приймання НШС імпульсів ЕМ поля.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу виконано у відділі радіофізичної інтроскопії Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України відповідно до планів 6-ти науково-дослідних робіт відомчої тематики в період з 2003 року до 2021 року (номери держреєстрації 0100U006571, 0103U002265, 0107U001083, 0111U010474, 0117U004035, 0118U003035); 2-х НДР програмно-конкурсної тематики НАН України (номери держреєстрації 0112U004264 та 0117U003178).

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є виявлення та дослідження фізичних закономірностей процесу взаємодії імпульсного ЕМ поля нано- та субнаносекундного діапазонів тривалості з феритовими стрижнями та використання цих закономірностей для побудови малогабаритних приймальних антен для чутливого неспотвореного приймання ЕМ імпульсів.

Для досягнення поставленої у дисертації мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- розробити математичні моделі приймальних феритових антен;
- розв'язати задачу дифракції монохроматичного H – поляризованого ЕМ поля на нескінченному магнітодіелектричному циліндрі як моделі приймальної феритової антени;
- розв'язати задачу дифракції імпульсного H – поляризованого ЕМ поля у вигляді імпульсів із гауссовою обвідною та високочастотним заповненням на нескінченному магнітодіелектричному циліндрі;
- виконати чисельне моделювання задачі дифракції імпульсних ЕМ полів без несучої у вигляді функції Гауса, 1-ї та 2-ї похідних функції Гауса на феритовій антені;

- за результатами моделювання проаналізувати амплітудно-часові залежності розрахованих полів дифракції та імпульсів на виході антени;
- розробити спосіб вимірювання магнітної проникності феритових стрижнів довільної довжини та довільного перерізу та експериментально визначити магнітну проникність феритових стрижнів;
- розвинути методику підвищення чутливості неспотвореного приймання імпульсних ЕМ полів шляхом підсумовування сигналів, прийнятих кількома рамками, для феритових антен;
- дослідити перехідні характеристики феритових рамкових антен, до складу яких входять кілька рамок.

Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси, що виникають при дифракції НШС імпульсних електромагнітних полів на магнітодіелектричних стрижнях і стрижнях з електропровідними рамками на них.

Предметом дослідження є взаємозв'язок параметрів збуджуючого імпульсного електромагнітного поля, електродинамічних параметрів феритової антени та результатів перетворення поля, що опромінює антену, в струм або напругу на виході антени.

Методи дослідження

Для розв'язання поставлених задач у дисертації було використано наступні методи: метод Фур'є (відокремлення змінних); метод інтегрального перетворення Фур'є; метод скінченних різниць у часовій області (FDTD); метод прямих вимірювань електричних параметрів сигналів.

Наукова новизна одержаних результатів

- Визначено критерії чутливого неспотвореного приймання феритовою антеною НШС сигналів у вигляді імпульсів із гауссовою обвідною та високочастотним заповненням, а також гауссового імпульсу й імпульсів у формі 1-ї та 2-ї похідних функції Гауса без несучої, що сприяє створенню практичних конструкцій приймальних антен. Критерії пов'язують частотні та часові параметри імпульсів, що збуджують, із геометричними й електрофізичними параметрами феритового стрижня.
- Вперше запропоновано спосіб вимірювання частотної залежності магнітної проникності феритових стрижнів із застосуванням коротких імпульсів електромагнітного поля, що дозволяє визначати ефективну магнітну проникність стрижнів довільних розмірів і довільного перерізу та, завдяки спостереженню в обмеженому часовому вікні, усунути вплив відбиттів від оточуючого середовища на результати вимірювань.
- Розвинуто для феритових антен методику підвищення чутливості неспотвореного приймання НШС імпульсів шляхом підсумовування сигналів, які прийнято кількома рамками. Експериментально показано, що використання двох рамок приводить до збільшення чутливості антени у 1,5 раза, а трьох – у 1,77 раза у порівнянні з однорамковою антеною.
- Вперше виявлено, що використання у феритовій антені кількох рамок приводить до зменшення часу наростання перехідної характеристики антени і, як наслідок, до розширення її робочої смуги частот у бік високих частот, що дозволяє

реєструвати сигнали коротшої тривалості з підвищеною точністю. Для антени з двома рамками час наростання зменшується з 3,6 нс до 2,7 нс, а для антени з трьома рамками – з 3,6 нс до 2,3 нс у порівнянні з однорамковою антеною.

Практичне значення одержаних результатів полягає у використанні досліджених у роботі закономірностей при створенні феритових НШС імпульсних антен, особливо для систем підповерхневої радіолокації. Такі антени забезпечать чутливе неспотворене приймання імпульсних сигналів, і тим самим сприятимуть підвищенню точності результатів радіолокаційних вимірювань. Зокрема, феритові антени планується використовувати при розробці багатоелементних антенних систем для радіолокаторів підповерхневого зондування, що створюються в рамках програми НАТО "Наука заради миру та безпеки" у проєкті G5731 "Multi-sensor cooperative robots for shallow buried explosive threat detection".

Публікації

Результати дисертації опубліковано в 15 наукових роботах, у тому числі в 4 статтях у фахових виданнях України [1-4], в 1 статті у профільному закордонному науковому журналі з імпаکت-фактором, який входить до наукометричної бази Scopus [5], у 1 патенті України [6], та в 7 збірниках доповідей на міжнародних конференціях [7-15], які входять до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science.

Особистий внесок здобувача

У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в участі при формулюванні завдань, проведенні чисельних і натурних експериментів, обговоренні отриманих результатів і підготовці наукових матеріалів до публікацій.

У роботах [1, 7, 8] автору належать самостійний розв'язок рівнянь та системи диференційних рівнянь для знаходження струму у рамкових антенах, самостійна реалізація обчислювальних алгоритмів. В роботах [2, 5, 11] автор самостійно розв'язала задачі дифракції та реалізувала обчислювальні алгоритми. Робота [3] виконана здобувачем одноосібно. В роботі [4] дисертант самостійно сформулювала критерії чутливого неспотвореного приймання феритовою антеною імпульсів поля у вигляді основних функцій без несучої. В роботі [6] автор самостійно виконала патентний пошук і запропонувала формулу винаходу. В роботах [9, 10] автору належить самостійна реалізація обчислювальних алгоритмів. В роботах [12, 13, 14, 15] автор самостійно обробляла експериментальні дані.

Апробація результатів дисертації

Результати досліджень за темою дисертації доповідались на наукових семінарах Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, а також на міжнародних наукових конференціях: the IV-th International Conference on Antenna Theory and Techniques (Sevastopol', Ukraine, 2003); the 2-nd International Conference on Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals (Sevastopol', Ukraine, 2004); the 3-rd International Conference on Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals (Sevastopol', Ukraine, 2006); the 6-th International Conference on Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals (Sevastopol', Ukraine, 2012); the 8-th International Conference on Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals (Odesa, Ukraine, 2016); the XI-th International

conference on Antenna Theory and Techniques (Kyiv, Ukraine, 2017); the 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (Kharkiv, Ukraine, 2020).

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається із анотації, вступу, 5-х розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку А. Обсяг дисертації становить 155 сторінок. Дисертація ілюстрована 51 рисунком і 3-ма таблицями. Список використаних джерел містить 132 бібліографічних посилання.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, наведено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та кількість публікацій за темою дисертації.

У розділі 1 наведено огляд літератури за темою дисертаційної роботи. Представлено короткий опис моделей НШС сигналів та їх застосування для вирішення сучасних завдань радіолокації, в тому числі підповерхневої радіолокації. Проведено аналіз існуючих НШС антен, описано їх переваги та недоліки для застосування в радарях для підповерхневого зондування. Визначено вимоги до приймальних антен НШС імпульсних радіолокаторів підповерхневого зондування. Проаналізовано існуючі шляхи забезпечення чутливого неспотвореного приймання сигналів антенами радарів. Зокрема, використання феритових стрижнів у рамкових антенах сприяє підвищенню чутливості неспотвореного приймання імпульсних сигналів приймальними антенами, при цьому антена залишається малогабаритною. Проведено аналіз існуючих способів вимірювання магнітної проникності феритових виробів, визначено необхідність винайдення нового способу вимірювання магнітної проникності феритових стрижнів довільних довжини та перерізу. Проведено аналіз основних методів розв'язання задач дифракції нестационарних полів на об'єктах. Сформульовано напрямок подальшого дослідження.

У розділі 2 наведено розв'язок задачі дифракції плоскої монохроматичної H - поляризованої ЕМ хвилі на нескінченному круговому ізотропному магнітодіелектричному циліндрі довільного радіуса, який є моделлю стрижня феритової рамкової антени. На рис. 1 представлені фото феритової рамкової антени (а), її теоретична модель та взаємна орієнтація напрямку падіння поля, що збуджує, та циліндра, на якому відбувається дифракція поля (б).

Задачу розв'язано методом Фур'є (розділення змінних). Цей строгий метод можна застосовувати, коли поверхня тіла, що розглядається, повністю збігається з якою-небудь координатною поверхнею ортогональної системи координат, в якій можливо розділення змінних у рівнянні Гельмгольца. Поверхня нескінченного циліндра повністю збігається з однією з координатних поверхонь циліндричної системи координат, тому природно, що задачу дифракції необхідно формулювати та розв'язувати в цій системі координат.

Поставлена задача є двовимірною ($\frac{\partial}{\partial z} = 0$), тому компоненти поля $E_{\rho}^{(p)}$, $E_{\varphi}^{(p)}$ (де

$p = 0, 1, 2$ для тієї, що опромінює, відбитої та тієї, що пройшла всередину циліндра, хвиль), відповідно до рівнянь Максвелла й обраної орієнтації векторів хвилі, що опромінює, можуть бути виражені в циліндричній системі координат через єдину компоненту поля $H_z^{(p)}$.

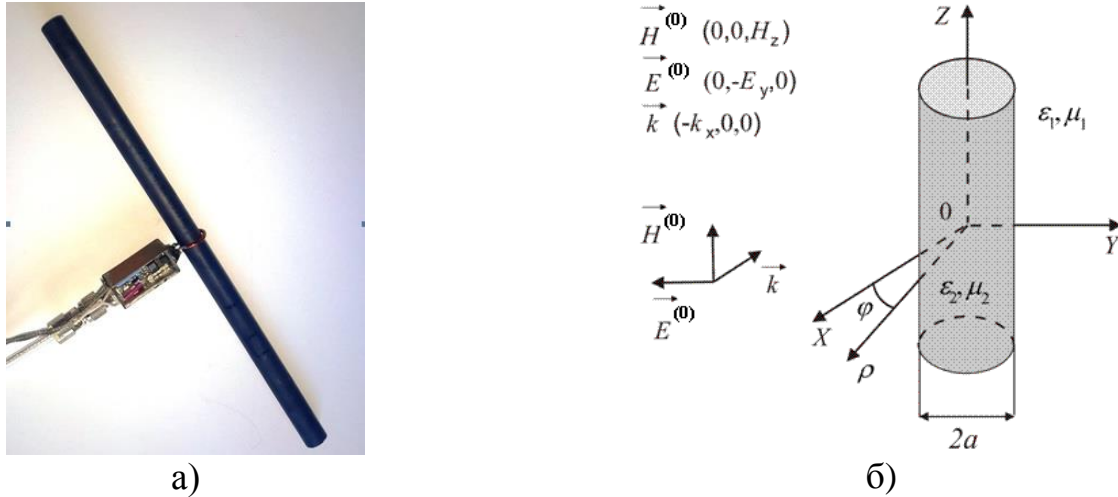


Рисунок 1 - а) – фото феритової антени; б) – теоретична модель

Для хвилі, що збуджує, використано розкладання плоскої хвилі за циліндричними функціями:

$$e^{-ikx} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n J_n(k\rho) e^{in\varphi},$$

де $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$; ω - кругова частота монохроматичної хвилі; λ - її довжина; c - швидкість світла у вільному просторі; $J_n(k\rho)$ - функції Бесселя першого роду n -го порядку, n - ціле.

Зокрема, для магнітної компоненти розсіяного поля всередині циліндра отримано:

$$H_z^{(2)} = H_0 \left[a_0 J_0(k_2 \rho) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} a_n J_n(k_2 \rho) \cos n\varphi \right],$$

де H_0 - амплітуда поля, що збуджує; $k_2 = k \sqrt{\epsilon_2 \mu_2}$; a_n - коефіцієнти розкладу, які визначаються із граничних умов і дорівнюють:

$$a_n = (-i)^n \frac{J_n(ka) H_n^{(1)'}(ka) - J_n'(ka) H_n^{(1)}(ka)}{J_n(k_2 a) H_n^{(1)'} - \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} H_n^{(1)}(ka) J_n'(k_2 a)},$$

де штрих означає похідну по аргументу функції.

На рис. 2 показані розподіли модуля та фази магнітного поля всередині та поза циліндром при $a = 1 \text{ см}$, $\mu_2 = 5$, $\epsilon_2 = 5$, $\lambda = 30 \text{ см}$ (а) та $a = 3 \text{ см}$, $\mu_2 = 5$, $\epsilon_2 = 5$, $\lambda = 30 \text{ см}$ (б). У першому випадку відношення діаметра циліндра до

довжини хвилі в речовині $2a\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}/\lambda \approx 0,3$, вектори напруженості магнітного поля у всіх точках циліндра синфазні. У другому випадку $2a\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}/\lambda = 1$, вектори напруженості магнітного поля в точках циліндра протифазні, що призводить до зменшення потоку магнітної індукції через площу рамки.

Назвемо частотні залежності модуля магнітної компоненти поля всередині циліндра спектральними функціями циліндра та позначимо їх як $\varphi^{(2)}(\omega, x, y)$, тобто $\varphi^{(2)}(\omega, x, y) = |H_z^{(2)}(\omega, x, y)|$. На рис. 3 представлено графіки спектральних функцій $\varphi^{(2)}(\omega, 0, 0)$ при деяких параметрах радіуса циліндра a та відносної магнітної проникності μ_2 . Чим більша відносна магнітна проникність фериту при фіксованій величині радіус циліндра, тим частіші коливання функції. Аналогічна залежність спостерігається при збільшенні радіуса циліндра та фіксованій величині відносної магнітної проникності.

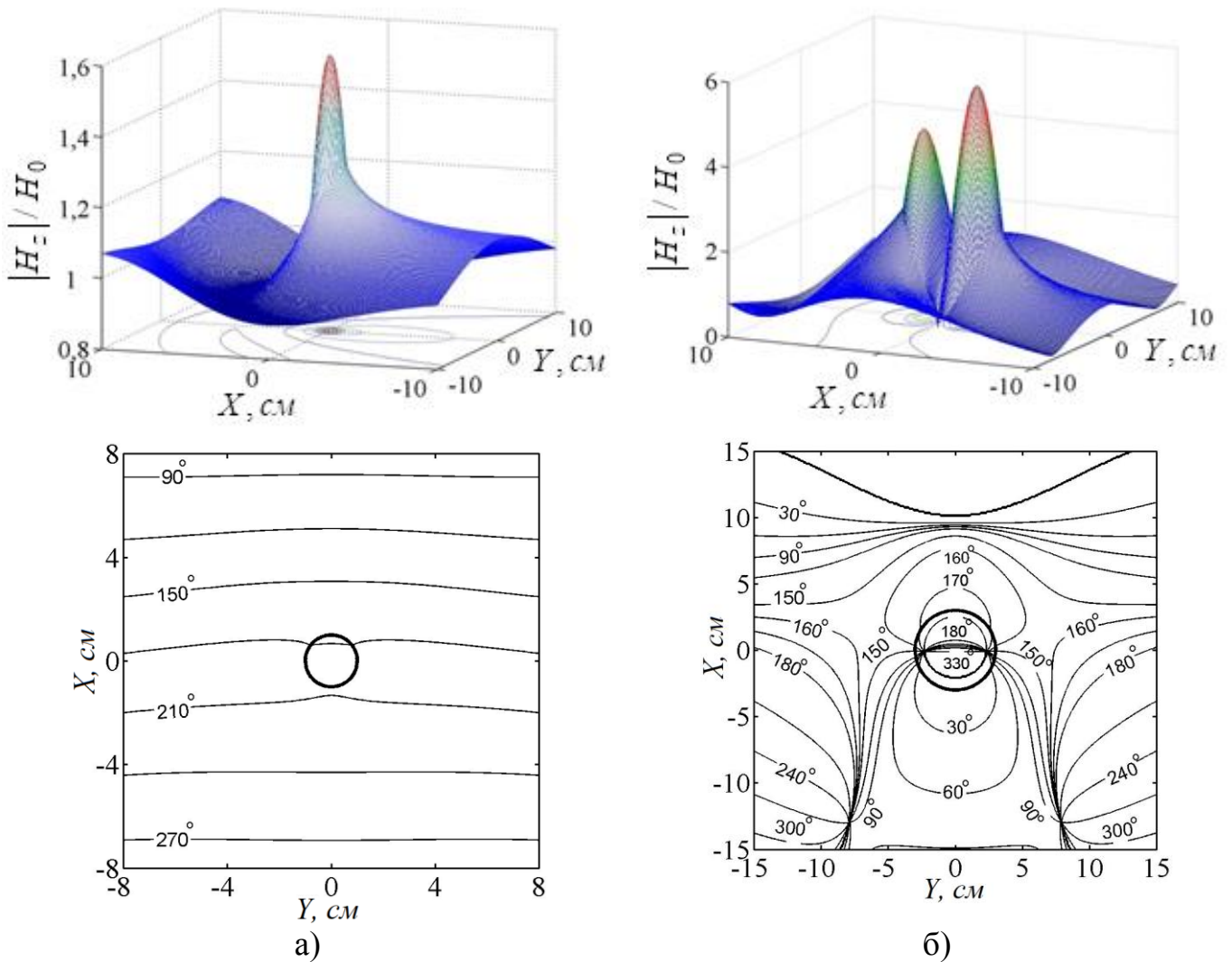


Рисунок 2 - Просторові та фазові розподіли магнітного поля:

а) - $a = 1 \text{ см}$, $\mu_2 = 5$, $\varepsilon_2 = 5$, $\lambda = 30 \text{ см}$;

б) - $a = 3 \text{ см}$, $\mu_2 = 5$, $\varepsilon_2 = 5$, $\lambda = 30 \text{ см}$

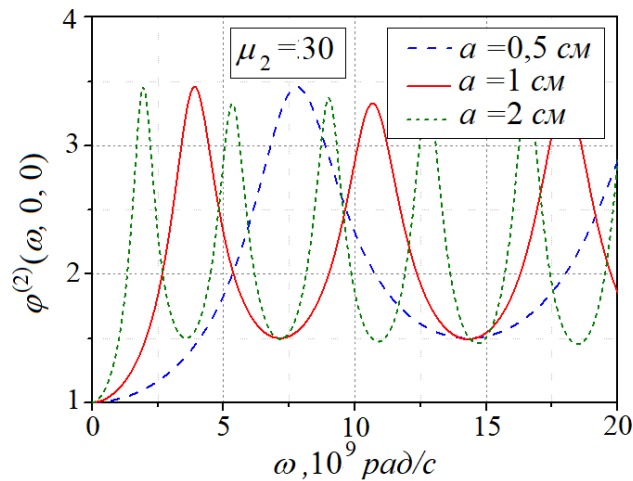


Рисунок 3 – Спектральні функції циліндра

Для розв'язання задачі дифракції H -поляризованого ЕМ імпульсу з гауссовою обвідною та високочастотним заповненням на магнітодіелектричному круговому циліндрі нескінченної довжини з комплексною магнітною проникністю було застосовано метод, який базується на використанні формального апарата інтегрального перетворення Фур'є для компонент імпульсного поля, що дозволило звести задачу, що розглядається, до ключової задачі розсіювання плоскої монохроматичної хвилі на магнітодіелектричному циліндрі.

Нехай циліндр збуджується обмеженим у просторі та часі ЕМ імпульсом з обвідною у вигляді функції Гауса та високочастотним заповненням:

$$U^{(0)}(x, t) = \exp\left\{-\frac{(t - t_0 + x/c)^2}{2T_0^2}\right\} \exp(-i\omega_0(t - t_0 + x/c)), \quad (1)$$

де t_0 - час запізнювання імпульсу; ω_0 - частота заповнення; T_0 - час, за який величина квадрата амплітуди імпульсу зменшується в e разів у порівнянні з максимальним значенням.

Вираз (1) описує модульовану по амплітуді хвилю з плоским фронтом. Максимум обвідної та її фронт переміщуються зі швидкістю c , а форма обвідної зберігається гауссовою з ростом координати та часу і визначається початковими умовами при $x = 0$.

Використовуючи для відповідних компонент поля подання у вигляді інтеграла Фур'є за частотами, розв'язок задачі дифракції для розсіяного імпульсного поля в силу його лінійності має вигляд:

$$U^{(p)}(y, x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F^{(0)}(\omega) H^{(p)}(\omega, y, x) e^{-i\omega t} d\omega, \quad (2)$$

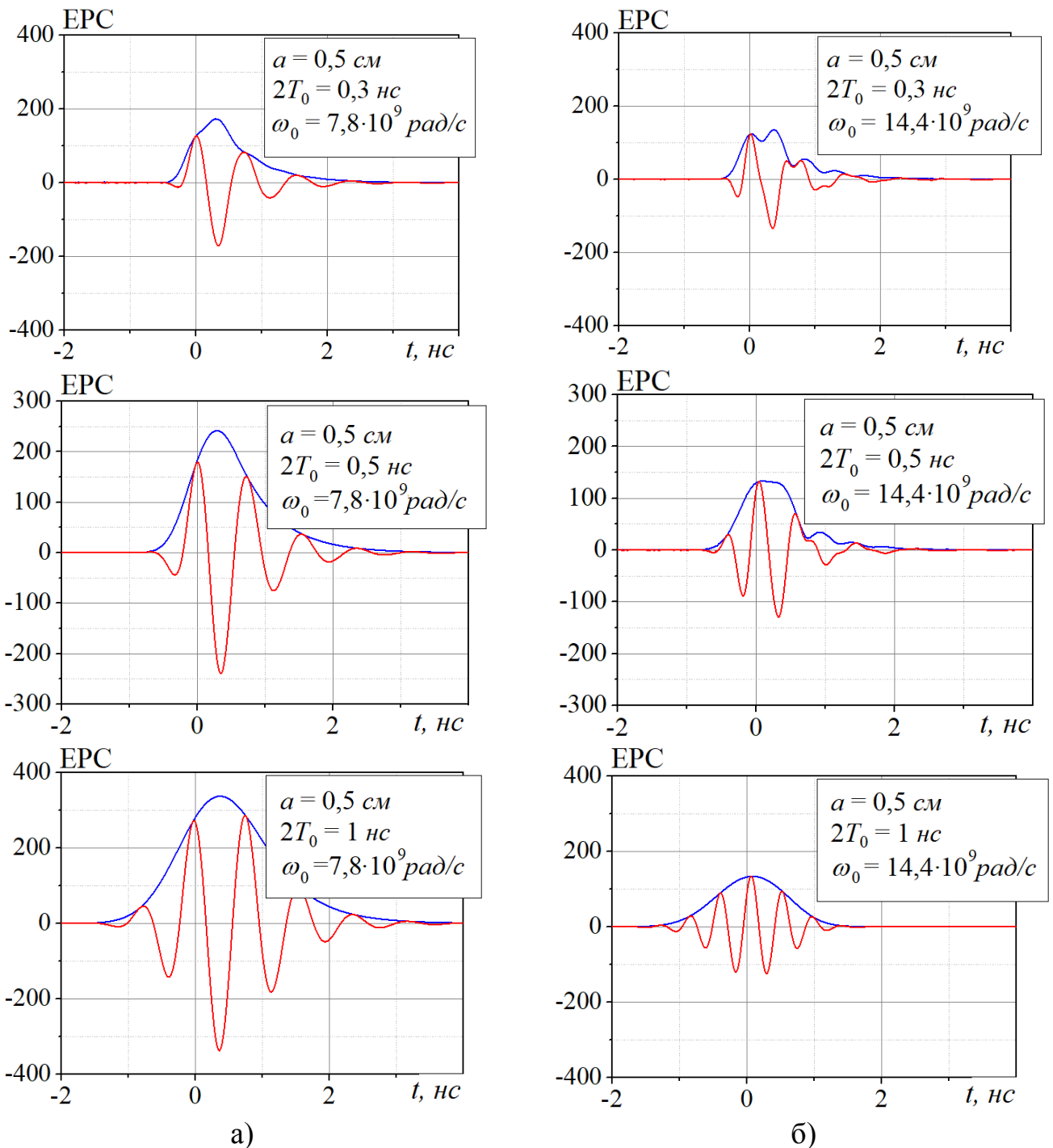
де індекс $p = 1$ означає область поза циліндром; $p = 2$ - область всередині циліндра; $H^{(p)}(\omega, y, x)$ - розв'язки задачі дифракції плоских монохроматичних хвиль з фіксованою частотою; $F^{(0)}(\omega)$ - частотний спектр імпульсу, що опромінює.

Якщо охопити циліндр замкнутим контуром, то зміна магнітного потоку, що пронизує площу замкнутого контуру, приведе до виникнення в ньому ЕРС індукції,

прямо пропорційної швидкості зміни потоку.

На рис. 4 представлено обвідні з високочастотним заповненням імпульсів ЕРС індукції в контурі при збудженні циліндра з $a = 0,5 \text{ см}$ імпульсами з тривалістю $2T_0 = 0,3 \text{ нс}$; $0,5 \text{ нс}$; 1 нс .

На рис. 4 а представлено результати розрахунків, коли центральна частота ω_0 спектра імпульсу, що збуджує, належить області локального максимуму спектральної функції $\varphi^{(2)}(\omega, 0, 0)$ і $2a\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}/\lambda_0 \approx 0,5$, на рис. 4 б – коли ω_0 належить області її локального мінімуму і $2a\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}/\lambda_0 \approx 1$.



а) б)
Рисунок 4 - Імпульси ЕРС індукції в контурі

Результати розрахунків показали, що найбільша амплітуда та найменше спотворення форми обвідної спостерігаються, коли центральна частота імпульсу, що збуджує, знаходиться в області першого локального максимуму спектральної функції циліндра, де її частотна залежність та спектральний розподіл $F^{(0)}(\omega)$ імпульсу, що збуджує, мають схожий характер. При цьому відношення діаметра циліндра до довжини хвилі в речовині близько 0,5, тобто виконується співвідношення $2a\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}/\lambda_0 \approx 0,5$, і ширина спектру імпульсу значно не перевищує ширину спектральної функції в області її першого локального максимуму на рівні, де амплітуда зменшується в \sqrt{e} раз.

Графіки на рис. 5 ілюструють ці висновки. Пікова амплітуда імпульсу ЕРС індукції приймає максимальні значення на частоті, яка належить області локального максимуму спектральної функції циліндра з радіусом $a = 0,5$ см (рис. 3).

Щоб врахувати скінченність реальних феритових стрижнів, було використано відому формулу для ефективної магнітної проникності стрижнів кінцевої довжини:

$$\mu_{ef} = \frac{\mu_2}{1 + 0,84(d/l)^{1,7}(\mu_2 - 1)}, \quad (3)$$

де $d = 2a$ - діаметр циліндра; l - його довжина; μ_2 - відносна магнітна проникність нескінченного циліндра.

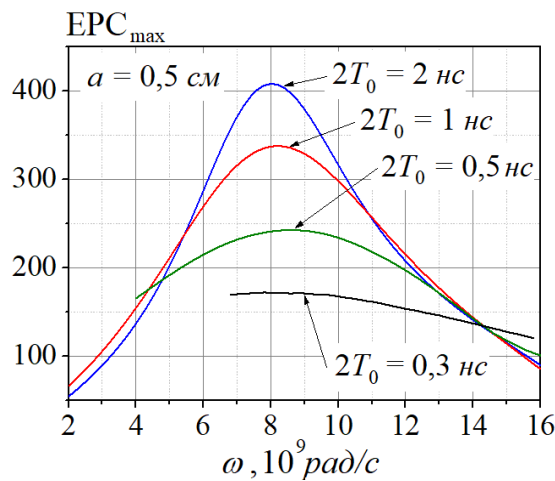


Рисунок 5 - Пікова амплітуда обвідних імпульсів ЕРС індукції

Графіки на рис. 6 демонструють, що при довжині циліндра, яка значно перевищує його діаметр, μ_{ef} прагне до свого граничного значення, яке відповідає відносній магнітній проникності циліндра нескінченної довжини.

Рис. 7 показує, що значення ефективної магнітної проникності, розраховані за формулою (3) та за експериментальними даними, дуже близькі. Експериментально μ_{ef} було визначено, використовуючи спосіб, описаний у 4 розділі дисертації.

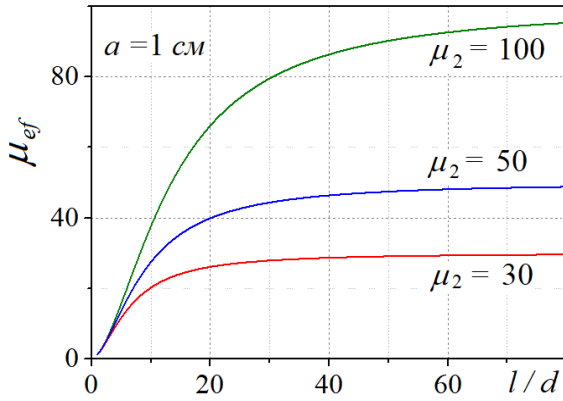


Рисунок 6 - Ефективна магнітна проникність циліндра

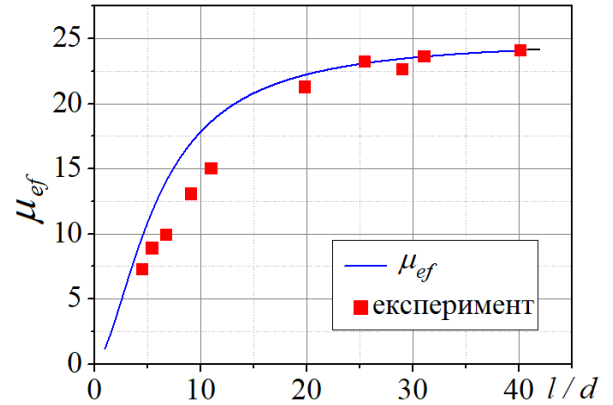


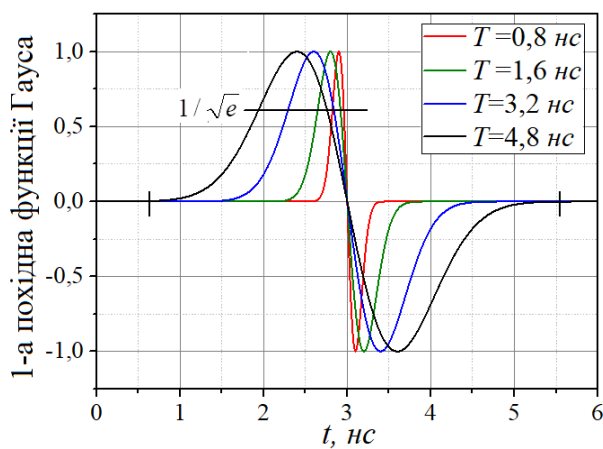
Рисунок 7 - Ефективна магнітна проникність, розрахована (лінія), та отримана експериментально (кубики)

У розділі 3 методом FDTD промодельовано взаємодію імпульсного поля обмежених у часі сигналів без несучої, а саме сигналів у вигляді функції Гауса, 1-ї та 2-ї похідних функції Гауса з феритовими антенами, які є феритовим стрижнем кінцевої довжини із провідною рамкою на ньому. Саме такі часові залежності відбитих полів зустрічаються на практиці радіолокаційних вимірювань найчастіше.

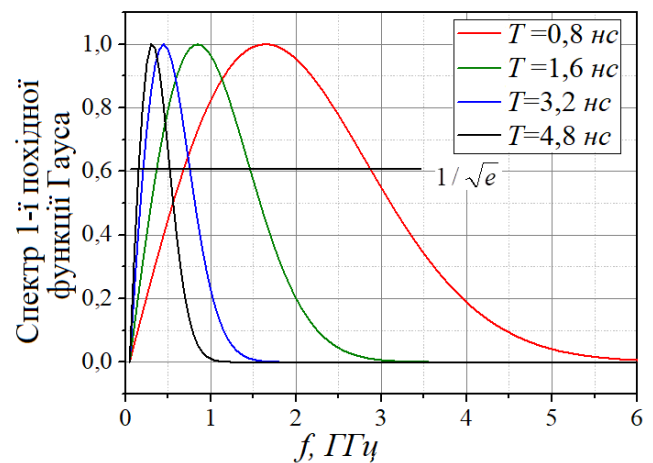
Моделі феритової антени - циліндри з радіусами $0,25 \text{ см}$ та $0,5 \text{ см}$, з довжиною 20 см , відносними електричною $\varepsilon_2 = 5$ та магнітною $\mu_2 = 30$ проникностями.

Як приклад розглянемо взаємодію імпульсів ЕМ поля у вигляді 1-ї похідної функції Гауса з феритовим стрижнем із рамкою на ньому.

На рис. 8 а показано функції у вигляді 1-ї похідної функції Гауса з тривалостями $T = 0,8; 1,6; 3,2; 4,8 \text{ нс}$ та їх нормовані спектри (рис. 8 б). Позначимо як Δt тривалість імпульсу на рівні $1/\sqrt{e}$ від максимального значення його амплітуди. Ширину спектру будемо визначати на рівні $1/\sqrt{e}$ від його максимального значення.



а)



б)

Рисунок 8 - а) 1-ї похідні функції Гауса та б) їх частотні спектри

На рис. 9 представлено часові залежності наведених імпульсів струму у провіднику, який охоплює феритові стрижні з радіусами $a = 0,25 \text{ см}$ (перший стовбець) та $a = 0,5 \text{ см}$ (другий стовбець).

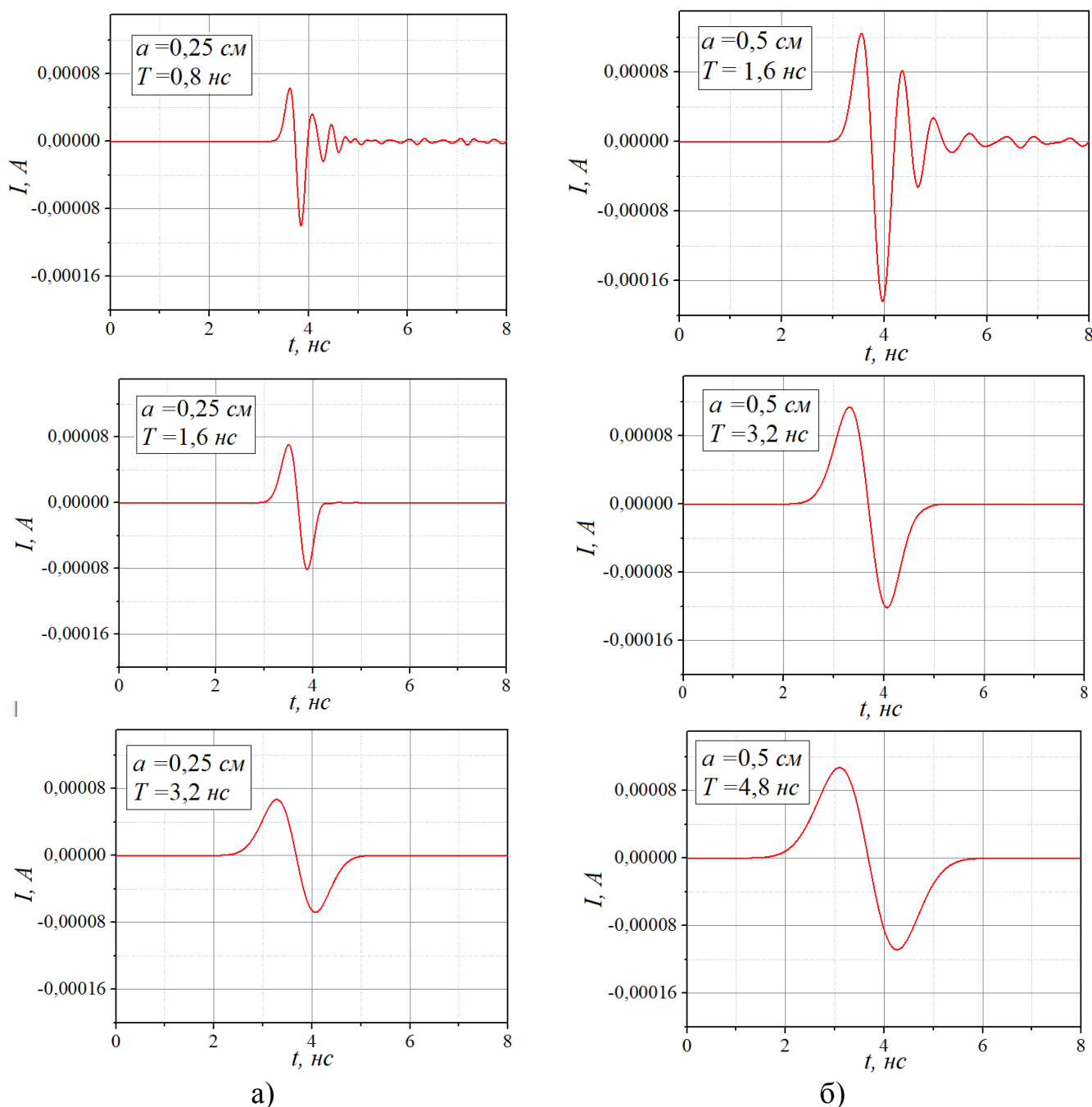


Рисунок 9 - Імпульси струму, наведені у провіднику, який охоплює феритовий стрижень з радіусом $a = 0,25 \text{ см}$ (а), та з радіусом $a = 0,5 \text{ см}$ (б)

Аналіз результатів моделювання показав, що для чутливого неспотвореного приймання НШС сигналу у вигляді найбільш поширених функцій без несучої потрібно, щоб параметри циліндра та імпульсу, що збуджує, задовольняли співвідношенню $2a\sqrt{\epsilon_2\mu_2}/c\Delta t \leq 0,5$ і ширина спектра імпульсу не перевищувала ширину смуги частот спектральної функції циліндра в області її першого локального

максимуму на рівні, де амплітуда зменшується в \sqrt{e} раз.

У розділі 4 описано новий спосіб вимірювання магнітної проникності стрижнів, який включає в себе:

1. Збудження феритової антени H -поляризованим ЕМ імпульсом, спектр якого займає смугу частот, в якій потрібно визначити ефективну магнітну проникність стрижня, і реєстрацію наведеної ЕРС на виході антени;

2. Збудження рамкової антени без феритового стрижня таким самим ЕМ імпульсом і реєстрацію наведеної в ній ЕРС;

3. Обчислення Фур'є-спектрів зареєстрованих імпульсів і визначення ефективної проникності як відношення амплітуд ЕРС на однакових частотах.

Враховуючи те, що реєстрація імпульсу ЕРС при наявності стрижня в одновитковій котушці відбувалася для стрижня конкретної форми та розмірів, то в результаті отримаємо частотну залежність ефективної магнітної проникності саме цього конкретного феритового стрижня.

На рис. 10 зображено блок-схему обладнання для вимірювання ефективної магнітної проникності феритових стрижнів.

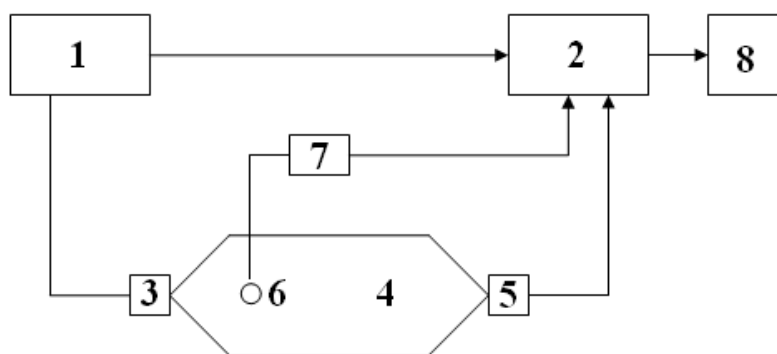


Рисунок 10 – Блок-схема обладнання

Імпульсний сигнал із генератора 1, через трансформатор 3, призначений для узгодження і симетрування, із входу ТЕМ камери 4, передається до робочої зони (смушкової частини всередині камери (рис. 11)). Створене імпульсне поле опромінює феритовий стрижень, охоплений одновитковою котушкою 6. Котушка зі стрижнем розміщені так, щоб магнітна компонента імпульсного ЕМ поля, що збуджує, була спрямована вздовж осі стрижня ортогонально до площини витка (рис. 11). Змінний потік магнітної індукції у стрижні через поверхню, обмежену витком котушки, наводить у котушці імпульс ЕРС, який через широкосмуговий підсилювач 7 передається до першого входу стробоскопічного приймача 2. Прийнятий імпульс перетворюють у цифровий вигляд, цифровий код передають до персонального комп'ютера 8 для подальшого зберігання й обробки. Сигнал із виходу ТЕМ камери через трансформатор 5 подають до другого входу стробоскопічного приймача 2 для контролю функціонування вимірювального обладнання. Далі феритовий стрижень видаляють з котушки, залишаючи котушку на тому ж місці, і реєструють ЕРС на виході котушки, в якій немає стрижня. За допомогою перетворення Фур'є розраховують спектри прийнятих сигналів.

Ефективна магнітна проникність є відношенням спектральних компонент на відповідних частотах.

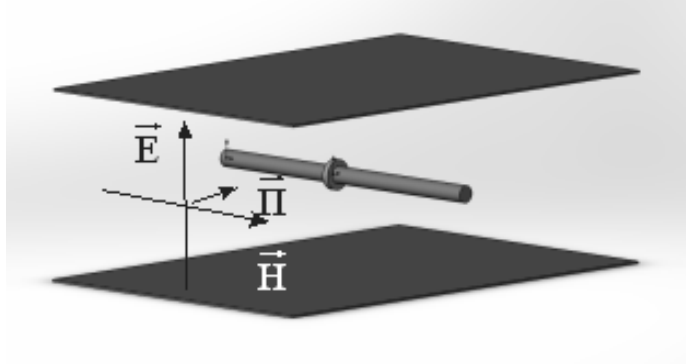


Рисунок 11 – Взаємна орієнтація рамки, стрижня і смужкової частини TEM – камери

Застосування саме НШС коротких імпульсів ЕМ поля дозволяє проводити вимірювання в умовах звичайної лабораторії, не використовуючи безлунові камери.

Вимірювання ефективної магнітної проникності проведено для феритових стрижнів марки М400НН з діаметром $d = 1$ см та довжинами $l = 4,5$; 11 та 20 см.

Одновиткова котушка з внутрішнім діаметром витка 1 см з мідного дроту діаметром 1 мм без стрижня та за наявності в котушці стрижнів збуджувалась імпульсним ЕМ полем тривалістю 5 нс і часом наростання 2 нс. На рис. 12 зображено імпульси, прийняті одновитковою котушкою без стрижня та за наявності в котушці феритових стрижнів.

Далі було розраховано спектри цих імпульсів і визначено частотні залежності магнітної проникності стрижня (рис. 13). З графіків видно, що для стрижнів з невеликими l/d ($l/d = 4,5$) ефективна магнітна проникність залишається постійною у всьому діапазоні частот. Для стрижнів з $l/d = 11$ і більше спостерігається збільшення ефективної магнітної проникності, але вона спадає на високих частотах.

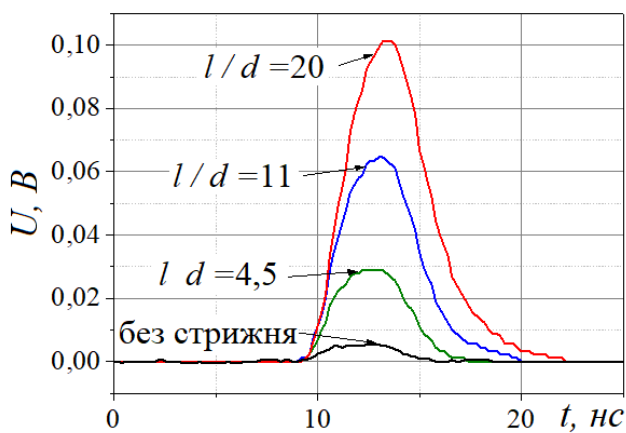


Рисунок 12 – Прийняті імпульси

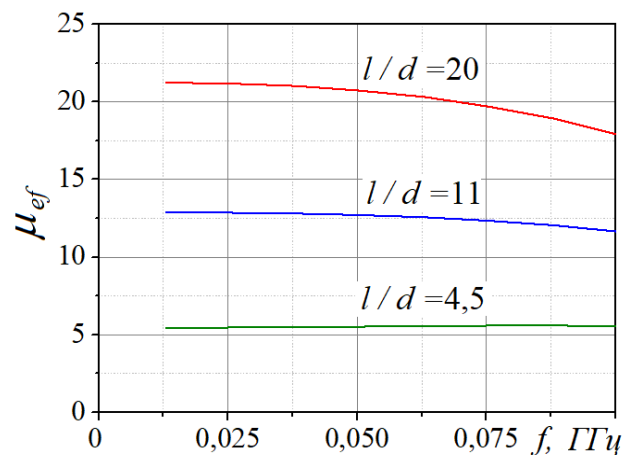


Рисунок 13 – Ефективна магнітна проникність феритових стрижнів при $d = 1$ см та $l/d = 4,5$; 11; 20

Таким чином, запропоновано новий спосіб вимірювання частотної залежності ефективної магнітної проникності феритових стрижнів довільних розмірів і довільного перерізу. Перевагою такого способу є те, що результатом є частотна залежність саме ефективної магнітної проникності для конкретного феритового стрижня.

У розділі 5 описано методику підвищення чутливості неспотвореного приймання сигналів феритовими антенами шляхом підсумовування сигналів, прийнятих кількома рамками, яка враховує взаємний зв'язок між рамками та розмагнічувальний фактор феритового стрижня кінцевої довжини.

Досліджувана феритова антена розташовувалась всередині ТЕМ камери, де збуджувалось ЕМ поле у вигляді трапецієподібних імпульсів із тривалостями 2 нс, 5 нс та 10 нс та ступінчастої функції. Стрижень був охоплений 1, 2 або 3 окремими кільцями провідника. Для реєстрації сигналів використовувався спеціально створений підсилювач із низьким вхідним опором. Металеve кільце з приєднаним підсилювачем – це активне кільце (АК), а без підсилювача - пасивне кільце (ПК).

Рис. 14 демонструє залежності амплітуд імпульсів у АК від відстані l . Схеми розміщення кілець на стрижні - у верхніх кутках рисунків.

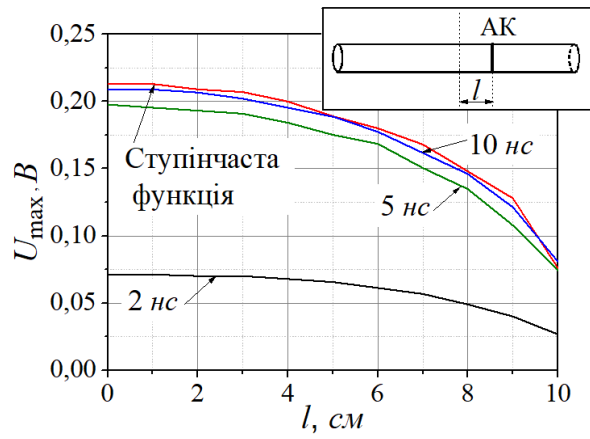
Щоб визначити амплітуду вихідного імпульсу, наприклад, для 2-елементної антени, треба розташувати кільця у певних положеннях на стрижні та, підключаючи підсилювач по черзі до обох кілець, зареєструвати 2 імпульси. Кільце, не підключене до підсилювача, має бути замкненим. Вихідний імпульс для такої антени – це сума зареєстрованих імпульсів.

Рис. 15 узагальнює результати експериментів:

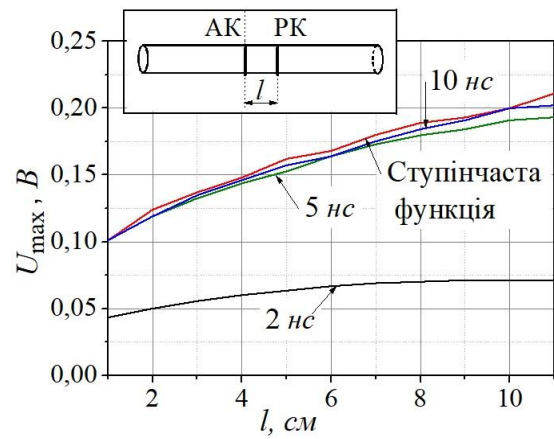
- а) крива АК(0)-АК. Дві рамки розміщені як у другому та третьому експериментах, тобто одна рамка знаходиться посередині стрижня постійно, інша переміщується до краю стрижня з кроком 1 см;
- б) крива АК-0-АК. Дві рамки знаходяться на однаковій відстані по обидві сторони від середини стрижня та переміщуються до краю стрижня з кроком 1 см;
- в) крива АК-АК(0)-АК. Одна рамка знаходиться посередині стрижня, дві інші рамки - по обидві сторони від середини стрижня на однаковій відстані та переміщуються до країв стрижня з кроком 1 см.

Якщо дві рамки розташовано на однаковій відстані по обидві сторони від середини стрижня, можна збільшити пікову амплітуду прийнятого сигналу до 1,5 раза у порівнянні з антеною з однією рамкою, розміщеною посередині стрижня. Оптимальною є відстань 5 см від центра стрижня. Використання двох рамок у будь-якому випадку, крім того, коли рамки знаходяться на протилежних краях стрижня, дає більший за амплітудою імпульс, ніж одна рамка.

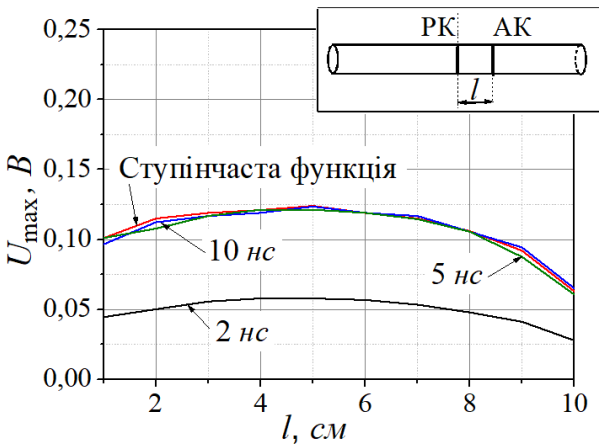
Трьохрамкова антена показує підвищення чутливості при всіх розглянутих відстанях між рамками. Якщо відстань між середньою та боковими рамками досягає 7÷8 см, амплітуда прийнятого сигналу набуває свого максимального значення, яке в 1,77 раза більше, ніж амплітуда імпульсу, на виході однорамкової антени.



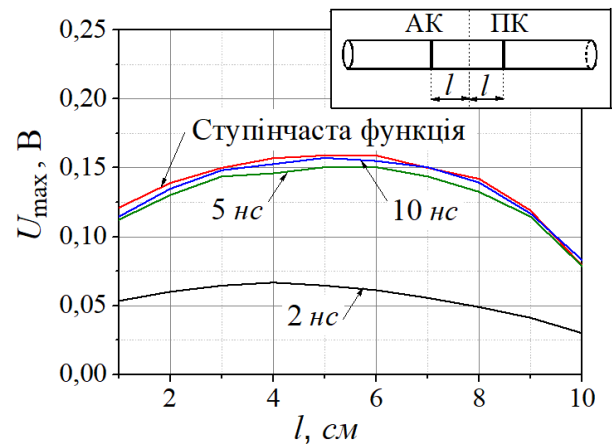
а)



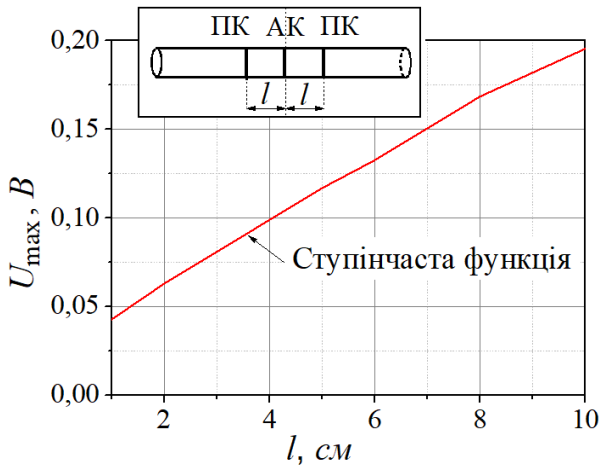
б)



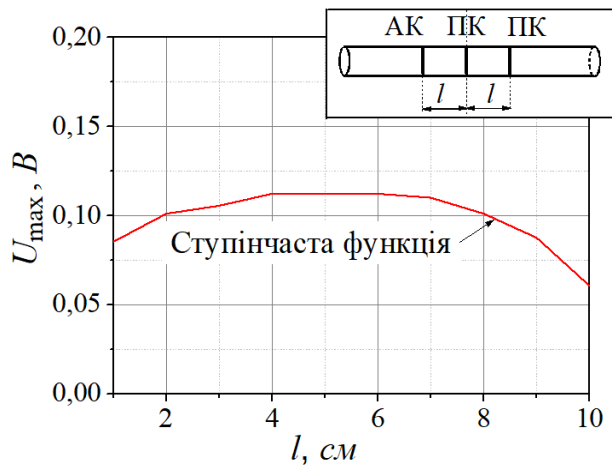
в)



г)



д)



е)

Рисунок 14 - Пікові амплітуди імпульсів у АК в залежності від відстані між кільцями. Номера експериментів 1-6 відповідають рисункам а-є

На рис. 16 зображено графіки залежності амплітуд сум наведених струмів у рамках від відстані між ними при збудженні приймальної антени імпульсом поля у вигляді функції Гауса з тривалістю $1,2 \text{ нс}$, розраховані методом FDTD. Зазначимо, що при заданих електрофізичних параметрах форма наведеного струму не спотворюється і повторює форму функції Гауса.

Криві на рис. 15 та рис. 16 мають схожий характер.

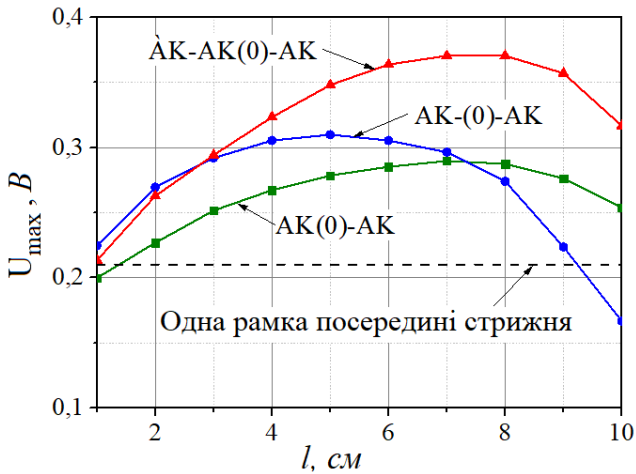


Рисунок 15 - Суми пікових амплітуд прийнятих сигналів у всіх рамках

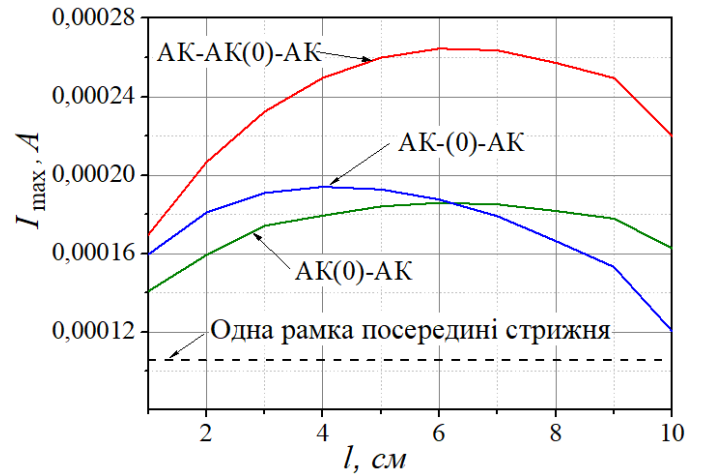


Рисунок 16 – Суми амплітуд струмів, розраховані методом FDTD

Результати вимірювань також надають змогу оцінити вплив кількості та місць розташування кілець багатоелементної антени на час наростання її перехідної характеристики (ПХ). На рис. 17 представлено у порівнянні приклади ПХ для одно-, двох- та трьохрамкових феритових антен. Найкоротший час наростання відповідає з трьома рамками. Найбільший час наростання у феритової антени з однією рамкою.

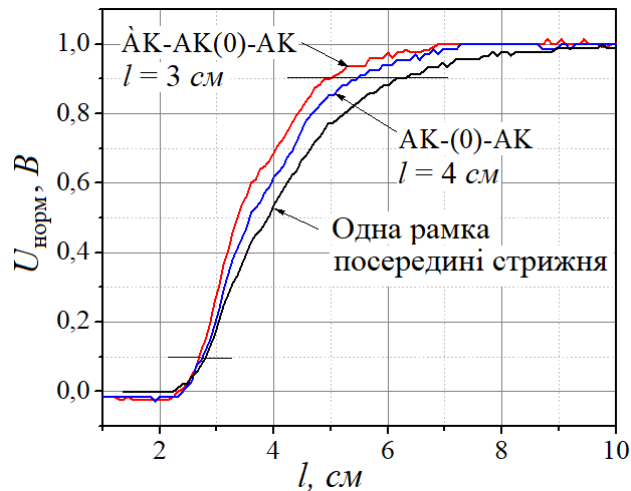


Рисунок 17 – Перехідні характеристики для одно-, двох- та трьохрамкових антен

За даними експериментів побудовано графіки залежності часу наростання ПХ антен (рис. 18).

Рамку одноелементної антени розташовано в середині стрижня, де чутливість такої антени найвища. При цьому час наростання ПХ дорівнює 3,6 нс. Якщо до такої антени додати ще одну рамку і, змінюючи її положення з кроком 1 см вздовж стрижня, спостерігати за часом наростання ПХ для (AK(0)-AK), можна відзначити, що час наростання зменшується до 2,7 нс і утримується на цьому рівні майже незалежно від l .

Інша залежність часу наростання ПХ спостерігається, якщо рамки двохелементної антени розташовувати симетрично відносно центру стрижня ((AK-(0)-AK) на рис. 18). При рознесенні рамок час наростання ПХ спочатку зменшується

та досягає свого мінімального значення $2,7 \text{ нс}$ при $l = 2 \div 4 \text{ см}$. При подальшому рознесенні рамок час наростання збільшується, і вже після 8 см перевищує час наростання ПХ для однорамкової антени.

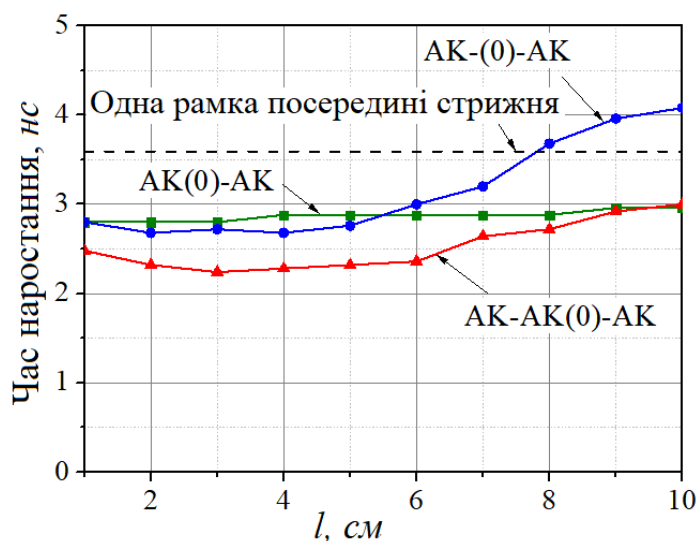


Рисунок 18 - Час наростання ПХ для двох- та трьохрамкових феритових антен

Додавання третьої рамки дозволяє ще зменшити час наростання ПХ антени. Загалом незалежно від розташування рамок трьохрамкової антени (AK-AK(0)-AK) час наростання її ПХ є меншим, ніж у двох попередніх варіантів. Мінімальне значення часу наростання ПХ - $2,3 \text{ нс}$ спостерігається, коли одна з рамок знаходиться посередині феритового стрижня, а дві інші - на відстані порядку 4 см від першої.

Таким чином, спосіб підвищення чутливості рамкових НШС імпульсних антен, заснований на підсумовуванні сигналів, прийнятих окремими рамками, розвинуто для феритових антен. Експерименти продемонстрували можливість підвищення чутливості антени у $1,5$ раза для двохрамкової і у $1,77$ раза для трьохрамкової антен у порівнянні з поодинокую рамкою, розміщеною посередині стрижня. При цьому враховано взаємний зв'язок між рамками та розмагнічувальний фактор феритового стрижня кінцевої довжини.

Вперше виявлено, що при використанні кількох рамок на феритовому стрижні зменшується час наростання ПХ антени. Використання двох рамок зменшує час наростання ПХ антени у $1,3$ раза, а трьох рамок - у $1,57$ раза у порівнянні з однорамковою антеною.

Зменшення часу наростання ПХ означає розширення робочої смуги частот антени у бік високих частот, що дозволяє реєструвати сигнали коротшої тривалості з підвищеною точністю.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вивчено актуальну задачу радіофізики - дослідження фізичних закономірностей процесу взаємодії імпульсного електромагнітного поля нано- та субнаносекундного діапазонів тривалості з феритовими стрижнями та

стрижнями з рамками з метою створення малогабаритних приймальних антен для чутливого неспотвореного приймання електромагнітних імпульсів.

Основні результати роботи зводяться до наступного:

1) Наведено розв'язок задачі дифракції монохроматичного H – поляризованого електромагнітного поля на нескінченному магнітодіелектричному циліндрі як моделі приймальної феритової антени. Ця задача є базовою для розв'язку задачі дифракції імпульсного H – поляризованого електромагнітного поля з обвідною у вигляді функції Гауса та високочастотним заповненням на цій перешкоді. Досліджено особливості амплітудно-часової залежності імпульсу електрорушійної сили індукції, що виникає в замкнутому провідному контурі, який охоплює циліндр.

2) Визначено критерії чутливого неспотвореного приймання НШС сигналів з гауссовою обвідною та високочастотним заповненням. Потрібно, щоб параметри циліндра та імпульсу, що збуджує, задовольняли співвідношенню $2a\sqrt{\varepsilon_2\mu_2} / \lambda_0 \approx 0,5$ (a - радіус стрижня, ε_2, μ_2 - відносні діелектрична і магнітна проникності стрижня, λ_0 - довжина хвилі несучої), і ширина спектру імпульсу не перевищувала ширину смуги частот спектральної функції циліндра в області її першого локального максимуму на рівні, де амплітуда зменшується в \sqrt{e} раз.

3) За результатами чисельного моделювання задачі дифракції імпульсних електромагнітних полів у вигляді найбільш поширених функцій без несучої, а саме функції Гауса, 1-ї та 2-ї похідних функції Гауса на феритовому стрижні, охопленому витком провідника, досліджено амплітудно-часові залежності імпульсів на виході приймальної феритової антени.

4) Визначені критерії чутливого неспотвореного приймання НШС сигналів у вигляді найбільш поширених функцій без несучої. Параметри циліндра та імпульсу, що збуджує, мають задовольняти співвідношенню $2a\sqrt{\varepsilon_2\mu_2} / c\Delta t \approx 0,5$ (a - радіус стрижня, ε_2, μ_2 - відносні діелектрична та магнітна проникності стрижня, Δt - тривалість імпульсів на рівні $1/\sqrt{e}$ від максимальної амплітуди імпульсів), ширина спектра імпульсу має не перевищувати ширину смуги частот спектральної функції циліндра в області її першого локального максимуму на рівні, де амплітуда зменшується в \sqrt{e} раз.

5) Вперше запропоновано новий спосіб вимірювання частотної залежності ефективної магнітної проникності феритових стрижнів довільних розмірів і довільного перерізу (патент на корисну модель UA № 126410). Завдяки використанню коротких імпульсів електромагнітного поля та обмеженню часового вікна спостереження, усунуто вплив відбиттів від оточуючого середовища на результати вимірювань.

6) Для феритових антен розвинуто методику підвищення чутливості неспотвореного приймання шляхом підсумовування сигналів, прийнятих кількома рамками, яка враховує взаємний зв'язок між рамками та розмагнічувальний фактор феритового стрижня. Використання двох рамок підвищує чутливість у 1,5 раза, а

трьох – у 1,77 раза у порівнянні з поодинокую рамкою, розміщеною посередині стрижня.

7) Досліджено вплив кількості приймальних рамок на перехідні характеристики багатоелементної феритової антени. Вперше виявлено, що час наростання перехідної характеристики антени зменшується, якщо на феритовому стрижні розташувати кілька приймальних рамок. Використання двох рамок зменшує час наростання перехідної характеристики антени у 1,3 раза, а трьох рамок – у 1,57 раза у порівнянні з однорамковою антеною. Зменшення часу наростання перехідної характеристики означає розширення робочої смуги частот антени у бік високих частот, що дозволяє реєструвати сигнали коротшої тривалості з підвищеною точністю.

Отримані в дисертації результати є базовими для розробки високочутливих приймальних антен НШС радіолокаторів.

Проведені додатково оцінки продемонстрували, що феритові приймальні антени за чутливістю подібні до екранованих щілинних приймальних антен, що використовуються у НШС імпульсному георадарі роботизованої платформи "UGO-1st", яку розроблено у відділі радіофізичної інтроскопії ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України при виконанні проєкту G5014 "Holographic and impulse subsurface radar for landmine and IED detection" за програмою НАТО "Наука заради миру та безпеки". Зважаючи на менші розміри феритових приймальних антен, вони є перспективними для використання в удосконаленому георадарі, який створюється в рамках проєкту G5731 "Multi-sensor cooperative robots for shallow buried explosive threat detection", що виконується.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Огурцова Т. Н., Почанин Г. П., Холод П. В. Рамочная антенна для приема сверхширокополосных импульсных сигналов // *Радиофизика и Электроника*. - 2003. - Т. 8, № 3. - С. 429-437.
2. Огурцова Т. Н., Сидоренко Ю. Б. Возбуждение потока магнитной индукции внутри магнетодиелектрического цилиндра // *Радиофизика и Электроника*. - 2009. - Т. 14, № 3. - С. 259-266.
3. Огурцова Т. Н. Выбор параметров ферритового элемента для импульсной СШП приемной антенны // *Известия вузов. Радиоэлектроника*. - 2016. - Т. 59, № 9. - С. 27-35.
4. Огурцова Т. М., Блинова Н. К., Почанин Г. П., Масалов С. О., Усова В. В. Неспотворений прийом імпульсного сигналу без носійної частоти феритовою антеною // *Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. Серія «Радиофизика та електроніка»*. - 2019. - Вип. 31. - С. 47-58.
5. Ogurtsova T. N., Pochanin G. P., Sidorenko Yu. B. Excitation of an electromagnetic field pulse in the magnetodielectric cylinder // *Telecommunications and Radio Engineering*. - 2013. - Vol. 72, iss. 9. - P. 777-789. (Scopus).
6. Огурцова Т. М., Почанин Г. П., Холод П. В., Думін О. М., Бердник С. Л. Спосіб вимірювання частотної залежності магнітної проникності феритових

стрижнів: патент на корисну модель UA 126410 U, МПК G01R 33/12 (2006.01); заявл. 07.09.2017; опубл. 25.06.2018б Бюл. № 12. - 6 с.

7. Pochanin G. P., Kholod P.V., Ogurtsova T. N. The UWB receiving loop antenna // *Proc. of the IV-th International conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol (Ukraine)*. - 2003. - P. 546-548. (Scopus та Web of Science).

8. Ogurtsova T. N., Pochanin G. P., Kholod P.V. Multielement UWB receiving antenna // *Proc. of the IV-th International conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol (Ukraine)*. - 2003. – P. 549-552. (Scopus та Web of Science).

9. Ogurtsova T. N., Pochanin G. P., Kholod P.V. Sensitivity of UWB ferrite receiving antennas // *Proc. of the 2-nd International Conference on Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals, Sevastopol (Ukraine)*. - 2004. - P. 279-281. (Scopus та Web of Science).

10. Kholod P.V., Ogurtsova T. N., Pochanin G. P. Comparison characteristics of small-size UWB receiving antenna // *Proc. of the 3rd International Conference on Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals, Sevastopol (Ukraine)*. - 2006. - P. 182-184. (Scopus та Web of Science).

11. Ogurtsova T.N., Pochanin G.P., Sidorenko Yu.B., Kholod P.V. Excitation of pulse magnetic flux inside a magnetodielectric cylinder // *Proc. of the 6-th International Conference on Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals, Sevastopol (Ukraine)*. - 2012. - P. 229-231. (Scopus та Web of Science).

12. Ogurtsova T.N., Pochanin G.P., Kholod P.V. The effective magnetic permeability of ferrite rods M400HH in the frequency range of 10 – 100 MHz // *Proc. of the 8-th International Conference on Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals, Odessa (Ukraine)*. - 2016. - P. 139-141. (Scopus та Web of Science).

13. Ogurtsova T., Kholod P., Klochko G., Pochanin G., Berdnik S., Dumin O. Frequency domain measurement of permeability of M400HH ferrite rods in the VHF range // *Proc. of the XI-th International conference on Antenna Theory and Techniques, Kyiv (Ukraine)*. - 2017. - P. 399-401. (Scopus та Web of Science).

14. Kholod P. V., Ogurtsova T.N. Active loop sensor for receiving pulse magnetic fields of nanosecond duration // *Proc. of the XI-th International conference on Antenna Theory and Techniques, Kyiv (Ukraine)*. - 2017. - P. 221-223. (Scopus та Web of Science).

15. Ogurtsova T., Blinova N., Pochanin G., Kholod P. Reception of electromagnetic pulses of nanosecond duration by the multi-element ferrite antenna // *Proc. of 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week, Kharkiv (Ukraine)*. - 2020. P. 116-120. (Scopus та Web of Science).

Анотація

Огурцова Т.М. Металеві рамки з феритовим стрижнем як приймальні антени надширокосмугових імпульсних електромагнітних полів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-практичної проблеми: визначення фізичних закономірностей процесу трансформації імпульсного ЕМ поля нано- та субнаносекундного діапазонів тривалості в імпульсний сигнал на виході приймальної феритової антени та використання цих закономірностей для побудови малогабаритних антен, призначених для чутливого неспотвореного приймання надширококутових (НШС) імпульсів ЕМ поля.

В роботі розглянуто феритові антени, які є феритовими стрижнями, що охоплено витком провідника (рамкою). Як модель взаємодії такої структури з НШС імпульсним полем розглядалось розсіяння імпульсного поля на нескінченному магнітодіелектричному циліндрі (розв'язок задачі дифракції) або циліндрі скінченної довжини (метод FDTD).

За результатами чисельного моделювання визначено оптимальні геометричні й електрофізичні параметри феритових антен для чутливого та неспотвореного приймання НШС імпульсів різних видів: з обвідною у вигляді функції Гауса та високочастотним заповненням, і з часовою залежністю у вигляді функції Гауса та 1-ї та 2-ї похідних функції Гауса без несучої.

В роботі представлено спосіб визначення частотної залежності ефективної магнітної проникності феритових стрижнів довільних розмірів та довільного перерізу.

Показано можливість підвищення чутливості феритової антени шляхом збільшення кількості рамок на стрижні й оптимального розміщення рамок на стрижні. Також виявлено ефект скорочення часу наростання перехідної характеристики антени завдяки оптимальному розміщенню рамок на стрижні, що призводить до розширення робочої смуги частот антени у бік більш високих частот і можливості приймати коротші у часі імпульси.

Ключові слова: НШС імпульсні сигнали, електромагнітне (ЕМ) поле, дифракція, рамкова антена, феритова антена, чутливість, неспотворене приймання, ефективна магнітна проникність.

Аннотація

Огурцова Т. Н. Металлические рамки с ферритовым стержнем как приемные антенны сверхширокополосных импульсных электромагнитных полей. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, г. Харьков, 2021.

Диссертация посвящена решению важной научно-практической проблемы: определению физических закономерностей трансформации импульсного электромагнитного (ЭМ) поля нано- и субнаносекундного диапазонов длительности в импульсный сигнал на выходе приемной ферритовой антенны и использования этих закономерностей для построения малогабаритных антенн, предназначенных для чувствительного неискаженного приема сверхширокополосных (СШП) импульсов ЭМ поля.

В работе рассмотрены ферритовые антенны, которые являются ферритовыми стержнями, охваченными витком проводника (рамкой). Как модель взаимодействия такой структуры с СШП импульсным полем рассматривалось рассеяние импульсного поля на бесконечном магнетодиэлектрическом цилиндре (решение задачи дифракции) или цилиндре конечной длины (метод FDTD).

По результатам численного моделирования определены оптимальные геометрические и электрофизические параметры ферритовых антенн для чувствительного и неискаженного приема СШП импульсов разных видов: с огибающей в виде функции Гаусса и высокочастотным заполнением, и с временной зависимостью в виде функции Гаусса, а также 1-й и 2-й производных функции Гаусса без несущей.

В работе представлен способ измерения частотной зависимости эффективной магнитной проницаемости ферритовых стержней произвольных размеров и произвольного сечения.

Показана возможность повышения чувствительности ферритовой антенны путем увеличения количества рамок на стержне и оптимального размещения рамок на стержне. Также обнаружен эффект сокращения времени нарастания переходной характеристики антенны благодаря оптимальному размещению рамок на стержне, что приводит к расширению рабочей полосы частот антенны в сторону более высоких частот и возможности принимать более короткие импульсы.

Ключевые слова: СШП импульсные сигналы, электромагнитное (ЭМ) поле, дифракция, рамочная антенна, ферритовые антенны, чувствительность, неискаженный прием, эффективная магнитная проницаемость.

Abstract

Ogurtsova T. M. Metal loops with a ferrite rod as receiving antennas of ultra-wideband pulsed electromagnetic fields. – On the manuscript.

Thesis for a candidate degree in physics and mathematics by speciality 01.04.03 – radiophysics. – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The theses is dedicated to the solution of an important scientific and practical problem, which is determination of physical regularities of the process of transformation of a pulsed electromagnetic field of nano- and subnanosecond duration ranges into a pulse signal at the output of a receiving ferrite antenna and using these regularities for construction of small-sized antennas for receiving of the UWB electromagnetic field pulses.

The dissertation considers ferrite antennas, which are ferrite rods covered by a coil of a conductor (loop). The scattering of a pulsed field by an infinite magnetodielectric cylinder (solution of the diffraction problem) or a cylinder of finite length (FDTD) was considered as a model of the interaction of such a structure with the UWB pulsed field.

According to the results of numerical simulations, the optimal geometric and electrophysical parameters of ferrite antennas for sensitive and undistorted reception of UWB pulses of different types: in form of Gaussian functions with high frequency carrier, and with time dependence on Gaussian functions without a carrier are determined.

The thesis presents a method for determining the frequency dependence of the effective magnetic permeability of ferrite rods of arbitrary size and arbitrary cross section.

The possibility of increasing the sensitivity of the ferrite antenna by increasing the number of loops on the rod and the optimal placement of the loops on the rod is shown. The effect of reducing the time of increase of the transient characteristic of the antenna due to the optimal placement of the loops on the rod, which leads to the expansion of the operating frequency band of the antenna towards higher frequencies and the ability to receive shorter pulses is discovered.

The main outcomes of the thesis were obtained for the first time:

1. The criteria of sensitive undistorted reception of signals in the form of pulses with Gaussian envelope and high-frequency carrier, as well as Gaussian pulse and pulses in the form of the 1st and 2nd derivative of the Gaussian function without carrier, which contributes to the creation of practical constructions are determined. The criteria relate the frequency and time parameters of the excitation pulses to the geometric and electrophysical parameters of the ferrite rod.

2. For the first time a method for measuring the frequency dependence of magnetic permeability of ferrite rods using short pulses of electromagnetic field, which allows to determine the effective magnetic permeability of rods of arbitrary size and arbitrary cross section and to eliminate environmental effects due to observation in a limited time window is proposed.

3. For ferrite antennas, a method has been developed to increase the sensitivity of undistorted reception of UWB pulses by summing the signals received by several loops. It has been experimentally shown that using of two loops increases the sensitivity by 1.5 times, and three - by 1.77 times compared to a single-loop antenna.

4. For the first time it was found that using of several loops on the ferrite rod reduces the rise time of the transient response of the antenna and, as a consequence, expands its operating frequency band towards high frequencies that allows receiving shorter signals with increased accuracy. For a two-loop antenna, the rise time is reduced from 3.6 ns to 2.8 ns, for a three-loop antenna - from 3.6 ns to 2.3 ns in comparison to a single-loop antenna.

The practical significance of the obtained results is using of the regularities discovered in the work in the creation of ferrite UWB pulsed antennas for subsurface radar systems. Such antennas will provide sensitive and undistorted reception of pulse signals, and thus help increase the accuracy of radar measurements.

Key words: UWB pulse signals, electromagnetic field, diffraction, loop antenna, ferrite antenna, sensitivity, undistorted reception, effective magnetic permeability.