

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

ОВСЯННІКОВА ОЛЕНА ЄВГЕНІВНА

УДК 537.86: 538.3

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПОЛЯ  
В БЛИЖНІЙ ЗОНІ АПЕРТУРНИХ АНТЕН

01.04.03 - радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків-2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Горобець Микола Миколайович,**  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
Міністерства освіти і науки України,  
завідувач кафедри прикладної електродинаміки.

**Офіційні опоненти:**

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Масалов Сергій Олександрович,**  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова  
Національної академії наук України, м. Харків,  
головний науковий співробітник відділу  
радіофізичної інтроскопії;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Должиков Володимир Васильович,**  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри комп'ютерної радіоінженерії і систем  
технічного захисту інформації.

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р. о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61022, Україна, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61022, Україна, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Ю. В. Аркуша

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Амплітудні, фазові та поляризаційні характеристики електромагнітних полів у ближній зоні випромінюючих систем мають велике значення в багатьох технічних застосуваннях, які пов'язані з використанням електромагнітних хвиль у медичному приладобудуванні для діагностики й лікування різних захворювань, у харчовій, легкій та хімічній промисловостях і в інших областях науки та техніки. Особливий інтерес становить безконтактна дистанційна передача електричної енергії мікрохвилями. У військовій радіотехніці актуальні задачі придушення сигналів управління радіоелектронного обладнання безпілотних апаратів, що літають. Урахування особливостей ближніх полів важливо для дослідження взаємодії електромагнітних хвиль з речовиною. Знання характеристик випромінювання в ближній і проміжній зонах важливі для розв'язання проблем електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв різних частотних діапазонів та різного функціонального призначення. Теоретичне значення має задача підвищення точності обчислення ефектів взаємного впливу близько розташованих антен. Самостійне значення має проблема електромагнітної екології, пов'язаної з впливом електромагнітних випромінювань на людину й на живу природу. У даний час ці питання привертають увагу фахівців у зв'язку з використанням мобільних телефонів і систем стільникового зв'язку, в яких необхідно знати напруженість електричного та магнітного полів на малих відстанях від антени. Також важлива проблема захисту технічного персоналу, що обслуговує радіотехнічні системи, що випромінюють електромагнітні хвилі, від впливу потужних електромагнітних полів.

У всіх цих дослідженнях і практичних застосуваннях важливо знати локальні амплітуди електричного та магнітного полів і густину потоку їх потужності в різних точках простору або на різних площинах у ближній та проміжній зонах спостереження випромінювання антени. Експериментально знаходити просторові розподіли характеристик полів практично неможливо через ефект усереднення поля зондом – індикатором поля по площині або по об'єму простору спостереження.

Відомі до теперішнього часу результати теоретичних й експериментальних досліджень електромагнітних полів у ближній зоні антенних систем, особливо апертурних – відкритих кінців хвилеводів, рупорів та дзеркальних і лінзових антен, які широко використовуються на практиці, не є достатніми для застосування таких антен на практиці.

Таким чином, розвиток теорії електромагнітних полів у ближній зоні апертурних випромінюючих систем є актуальною та важливою для практики науковою задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Дисертаційні дослідження проводились відповідно до наступних фундаментальних науково-дослідних робіт кафедри прикладної електродинаміки Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна:

- «Дослідження амплітудних, фазових та поляризаційних характеристик електромагнітних полів в ближній зоні випромінюючих систем» (номер державної реєстрації 0106U003134, 2006 р.–2008 р.);
- «Оптимізація просторового розподілу поля поблизу пристроїв, які випромінюють електромагнітні хвилі» (номер державної реєстрації 0109U000537, 2009 р.–2011 р.);
- «Електромагнітні поля поблизу випромінюючих систем великих електричних розмірів» (номер державної реєстрації 0112U000545, 2012 р.–2014 р.);
- «Багатопротеневі багатоканальні двохполяризаційні гостроспрямовані випромінюючі системи мікрохвильового діапазону» (номер державної реєстрації 0113U001321, 2013 р.–2015 р.);
- «Аналіз і синтез заданого просторового розподілу електромагнітного випромінювання антенних решіток на довільних відстанях» (номер державної реєстрації 0116U000811, 2016 р.–2018 р.).

Здобувач була виконавцем даних НДР і її науковий внесок відображено в дисертації.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії і дослідження електромагнітних полів у ближній зоні неперервних апертурних випромінюючих систем.

**Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано такі ключові задачі:**

- розв'язати зовнішню векторну задачу електродинаміки про випромінювання апертурних антен на кінцевій відстані від розкриву в декартовій системі координат;
- дослідити просторовий розподіл амплітуд і фаз електричних та магнітних полів у ближній зоні апертурних антен з розкритом круглої форми довільних електричних розмірів;
- дослідити просторовий розподіл амплітуд і фаз полів у ближній зоні апертурних антен з розкритом лінійної, квадратної та прямокутної форми за довільних електричних розмірів;
- дослідити вплив амплітудного й фазового розподілу джерел поля в розкриті випромінюючої системи на просторовий розподіл амплітуд і фаз полів у ближній зоні випромінюючих систем.

**Об'єктом дослідження** в дисертаційній роботі є електромагнітні поля в ближній і проміжній зонах апертурних випромінювачів.

**Предметом дослідження** в роботі є просторовий розподіл амплітуд і фаз векторів напруженості електричного та магнітного полів апертурних випромінювачів на кінцевій відстані від розкриття в ближній і проміжній зонах спостереження.

**Методи дослідження.** Метод Кірхгофа, метод векторних потенціалів і потенціалів Герца (використано для розв'язання задачі про випромінювання апертурних антен з розкритом круглої, квадратної та прямокутної форми довільних електричних розмірів у декартовій системі координат, а також для

розв'язання задач про випромінювання хвильоводних і рупорних антен), методи теорії функцій комплексної змінної (використані для визначення амплітуд і фаз електричних та магнітних полів й активної та реактивної потужності), методи обчислювальної математики (використані для обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій), сучасні методи програмування (використані для збільшення швидкості обчислення інтегралів, за допомогою яких виражаються електричні та магнітні поля).

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. *Уперше* розроблено математичне забезпечення розв'язання задачі аналізу й конструктивного синтезу заданого просторового розподілу амплітуд, фаз і поляризації електричного та магнітного полів у ближній зоні апертурних випромінюючих систем довільних електричних розмірів. Це дозволяє знайти всі компоненти електричних і магнітних полів на кінцевій відстані в ближній, проміжній та дальній зонах спостереження.

2. *Уперше* встановлено, що за електричних розмірів випромінюючого розкриву антени, які менші 1–1.5 довжини хвилі, в її ближній зоні амплітуди електричних і магнітних полів зі збільшенням відстані від антени зменшуються монотонно, а прожекторний промінь не формується ні за яких форм розкриву та ні за яких амплітудних і фазових розподілів джерел поля на апертурі. У випадку лінійних антен прожекторний промінь у ближній зоні не формується ні за яких електричних довжин антени.

3. *Уперше* показано, що апертурні антени з розкритом круглої форми формують прожекторний промінь за діаметрів розкриву, які більші 1–1.5 довжини хвилі. Характерною особливістю полів у ближній зоні круглих апертур є глибокі й досить малі (до –53 дБ відносно значення в середині розкриву, діаметр якого дорівнює 100 довжин хвиль) значення амплітуд електричного та магнітного полів за умов збільшення відстані точок спостереження від розкриву.

4. *Уперше* встановлено, що апертурні антени з розкритом квадратної форми формують прожекторний промінь у ближній зоні за розмірів сторін розкриву, які більші 1–1.5 довжини хвилі. Розмах осциляцій у цьому випадку значно менший, ніж у випадку антен з розкритом круглої форми. Зокрема для розкриву  $100\lambda \times 100\lambda$  глобальний мінімум амплітуди поля досягає –4.4 дБ від значення в середині розкриву. Безперервні апертурні антени з розкритом прямокутної форми формують прожекторний промінь у ближній зоні, коли менша зі сторін розкриву має довжину, яка більша 1–1.5 довжини хвилі. Принциповою особливістю просторового розподілу поля в ближній зоні антен з розкритом прямокутної форми є порушення його регулярного характеру. Це дозволяє вибором відношення сторін розкриву синтезувати поле з однорідним розподілом амплітуди й потужності в деякому об'ємі простору або на обмеженій площині в межах прожекторного променя.

### **Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:**

1. Створена обчислювальна модель і знайдена на її підставі відстань дальньої зони апертурних випромінювачів малих електричних розмірів дозволяють визначити розміри вимірювальних полігонів, які забезпечують високу точність визначення параметрів та характеристик антен.

2. Виявлені можливості синтезу рівномірного поля в обмеженому об'ємі і/або на обмеженій площині в ближній зоні апертурних антен з розкритом прямокутної форми можуть бути використані на практиці в медичних і біофізичних приладах та промислових технологічних процесах, в яких використовуються електромагнітні поля в ближній зоні випромінювачів.

3. Виявлені явища осцилюючого характеру залежності амплітуди електромагнітних полів від відстані в прожекторному промені апертур круглої і квадратної форми дозволяють уточнити розміри та форму робочої області в системах рухомого радіозв'язку на транспорті.

#### **Особистий внесок здобувача.**

Основні наукові результати, які викладені в дисертації, отримані здобувачем самостійно або за його безпосередньої участі.

У роботах [1, 15] автору належить розробка алгоритму визначення й дослідження області «ближніх реактивних полів» апертурних випромінювачів квадратної форми з різними законами розподілу поля в розкриті та обчислення. У роботі [2] автор ввела критерії оцінки межі дальньої зони малих порівняно з довжиною хвилі хвилеводних випромінювачів. У роботах [3-7] автором розроблені комп'ютерні програми, проведені обчислення й аналіз електромагнітних полів. У роботі [8, 24, 25] автор розв'язала зовнішню векторну задачу електродинаміки про випромінювання апертурних антен з розкритом круглої форми на довільній відстані, яка включає ближню зону; розробила алгоритм, комп'ютерну програму й провела обчислення. У роботі [9] автор провела обчислення розподілу поля в ближній зоні хвилеводних і рупорних випромінювачів у декартовій системі координат. У роботах [10, 11] автором отримані вирази в декартовій системі координат для компонент електричного й магнітного полів для довільних розмірів апертур. У роботах [12-14] автор створила програмне забезпечення, провела обчислення й приймала участь у аналізі отриманих результатів. У роботах [16, 17, 21-23] автор приймала участь у створенні програмного забезпечення, проведенні обчислення, аналізі отриманих результатів. У роботах [18-20] автор приймала участь у проведенні обчислення й аналізі результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Наукові результати, які отримані в дисертаційній роботі, доповідалися, обговорювалися й публікувалися на наступних 17 вітчизняних та міжнародних конференціях і симпозіумах:

- 14 російський симпозіум з міжнародною участю «Міліметрові хвилі в медицині та біології», (2007р.);
- Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікації РТ-2007, РТ-2008» (2007р., 2008р.);
- International Kharkov Symposium «Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves » (2007, 2010, 2016);
- International Conference on Antenna Theory and Techniques (2007, 2017);
- XII Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті» (2008р.);

- Міжнародна Кримська конференція «СВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» (2009р., 2013р.);
- IX Харківська конференція молодих вчених «Радіофізика, Електроніка, Фотоніка та Біофізика» (2009р.);
- 7th International Conference on «Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals» (2014, 2016, 2018);
- Друга міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку EMC-2016» (2016р.);
- X Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка» (2016р.).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковані в 25 друкованих наукових працях. З них 7 статей у вітчизняних і зарубіжних спеціалізованих наукових видавництвах (з них 2 статті, що входять до наукометричної бази даних Scopus), 1 стаття, яка додатково відображає наукові результати дисертації, і у 17 матеріалах та тезах доповідей на конференціях (з них 16 тез доповідей на міжнародних конференціях і симпозіумах). Усі опубліковані наукові роботи відповідають темі дисертаційної роботи.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 183 сторінки, з яких 118 сторінок основного тексту. Список використаної літератури на 12 сторінках включає в себе 110 найменувань. Усього в дисертації 68 рисунків, 8 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** на підставі загальної характеристики сучасного стану розв'язання задачі визначено її актуальність. Обґрунтовано необхідність проведення досліджень за темою дисертації, сформульовано мету і задачі роботи. Визначено об'єкт, предмет і методи досліджень. Представлено положення про наукову новизну й практичну значимість результатів роботи, дані про їх апробацію. Викладено зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами. Визначено особистий внесок автора в роботах, які опубліковані в співавторстві.

У **першому розділі** зроблено огляд робіт, які стосуються теми дисертації. Розглянуті різні теоретичні методи розв'язання зовнішньої векторної задачі електродинаміки для отримання амплітудних, фазових і поляризаційних характеристик випромінювання апертурних антен для відомих амплітудних та фазових розподілів джерел поля в розкриті антени. Відзначені області застосування електромагнітних хвиль у ближній і проміжній зонах антен. Представлені основні досягнення в області дослідження просторового розподілу амплітудних і фазових характеристик електричних і магнітних полів та їх активної та реактивної потужності в ближній зоні електромагнітних випромінюючих систем.

З огляду на складність задачі за умов її строгої постановки на практиці зазвичай її спрощують. Принципова можливість спрощення задачі заснована на тому, що вплив випромінюваного антеною поля на розподіл струмів і полів у самій антені невеликий. Це дає можливість знехтувати зазначеним впливом.

Теорія випромінювачів з плоским розкритом будь-якої форми базується в основному на наближеному апертурному методі Кірхгофа. Наближені апертурні методи, які засновані на принципі Гюйгенса, в електродинаміці формулюються у вигляді виразу, що пов'язує поле випромінювання з електричним і магнітним полем на замкнутій поверхні навколо джерела. Для обчислення цього виразу поле у випромінюючому розкритті вважають рівним полю хвилі, яка набігає, таким чином, не враховується дифракція хвиль на відкритому кінці випромінювача. Також покладаються рівними нулю струми на «тіньовий» стороні стінок антени.

Розглянуто розв'язання зовнішньої задачі електродинаміки методом розкладання на сферичні хвилі. Цей метод може бути застосований для отримання характеристик ближнього поля шляхом розкладання отриманого поля в дальній зоні для випромінювання з відкритого кінця напівнескінченного прямокутного хвилеводу.

Показано, що просторовий розподіл амплітуди й фази полів поблизу слабоспрямованих випромінювачів, зокрема, вібраторних, досить добре вивчені й можуть бути використані для аналізу полів у ближній зоні апертурних антен великих електричних розмірів.

У висновках до розділу сформульовані нерозв'язані до теперішнього часу задачі й обґрунтований вибір напрямку досліджень.

У **другому розділі** отримано загальне розв'язання зовнішньої векторної задачі електродинаміки про випромінювання апертурних антен з розкритом круглої форми методом потенціалів Герца у векторному формулюванні Кірхгофа в декартовій системі координат на довільній відстані від розкриття й розроблено математичне забезпечення, яке є математичною моделлю ближньої і проміжної зони апертурних антен з розкритом круглої форми. Поля в розкритті знаходяться з розв'язання внутрішньої задачі електродинаміки й задаються в полярній системі координат, а поза розкритвом – у декартовій. Проведено аналіз фізичних закономірностей формування просторового розподілу амплітуд і фаз електромагнітних полів у ближній зоні безперервних апертурних антен з такою формою розкриття. Для цього отримані вирази для ортогональних компонент електричного й магнітного полів випромінювання на довільній відстані від розкриття в декартовій системі координат:

$$\dot{E}_x = \frac{1}{4\pi} \int_S \dot{E}_x^s \psi f_1 z dS + \frac{i\lambda W_0}{8\pi^2 W_S} \int_S (-\dot{E}_x^s \psi f_1 + \psi f_2 (x - \rho \cos \varphi)) q_1 dS + \frac{iW_0}{2\lambda W_S} \int_S \dot{E}_x^s \psi dS, \quad (1)$$

$$\dot{E}_y = \frac{1}{4\pi} \int_S \dot{E}_y^s \psi f_1 z dS + \frac{i\lambda W_0}{8\pi^2 W_S} \int_S (-\dot{E}_y^s \psi f_1 + \psi f_2 (y - \rho \sin \varphi)) q_1 dS + \frac{iW_0}{2\lambda W_S} \int_S \dot{E}_y^s \psi dS, \quad (2)$$



$$\dot{E}_z = -\frac{1}{4\pi} \int_S \psi f_1 q_1 dS + \frac{i\lambda W_0}{8\pi^2 W_S} \int_S q_1 \psi f_2 z dS, \quad (3)$$

$$\dot{H}_x = -\frac{1}{4\pi W_{10}} \int_S \dot{E}_y^s \psi f_1 z dS + \frac{i\lambda}{8\pi^2 W_0} \int_S (-\psi f_1 \dot{E}_y^s + \psi f_2 (x - \rho \cos \varphi) q_2) dS - \frac{i}{2\lambda W_0} \int_S \dot{E}_y^s \psi dS, \quad (4)$$

$$\dot{H}_y = -\frac{1}{4\pi W_S} \int_S -\dot{E}_x^s \psi f_1 z dS + \frac{i\lambda}{8\pi^2 W_0} \int_S (\psi f_2 (y - \rho \sin \varphi) q_2 + \dot{E}_x^s \psi f_1) dS + \frac{i}{2\lambda W_0} \int_S \dot{E}_x^s \psi dS, \quad (5)$$

$$\dot{H}_z = \frac{1}{4\pi W_S} \int_S q_2 \psi f_1 dS + \frac{i\lambda}{8\pi^2 W_0} \int_S \psi f_2 z q_2 dS, \quad (6)$$

$$\text{де } f_1 = \frac{ik}{r} + \frac{1}{r^2}, \quad f_2 = \frac{3}{r^4} + \frac{3ik}{r^3} - \frac{k^2}{r^2}, \quad q_1 = \dot{E}_x^s (x - \rho \cos \varphi) + \dot{E}_y^s (y - \rho \sin \varphi),$$

$$q_2 = \dot{E}_y^s (x - \rho \cos \varphi) - \dot{E}_x^s (y - \rho \sin \varphi). \quad (7)$$

Розглянуто докладно вплив електричних розмірів випромінюючого розкриву на характер розподілу амплітуд і фаз електричних та магнітних полів у ближній і проміжній зонах спостереження безперервних апертурних антен з розкривом круглої форми. Показано, що для розмірів випромінюючого розкриву, які не перевищують однієї довжини хвилі, будь-яка точка спостереження в ближній, проміжній і дальній зонах знаходиться у межах однієї першої зони Френеля. Отже, у цьому випадку немає передумов для формування прожекторного променя, для якого характерні осциляції амплітуди електричного й магнітного полів у міру віддалення точки спостереження від розкриву антени. Амплітудні й фазові розподіли поля в розкриві прийняті постійними. Прийнято, що розкрив випромінювача узгоджений з вільним простором  $W_S = W_0$ . Поляризація випромінювання прийнята лінійною й для визначеності – вертикальною. На рис. 1 представлені результати обчислень за формулами (1)–(7) амплітуд векторів напруженості електричного й магнітного полів апертурних випромінювачів з круглим розкривом різного діаметру від 0.5 до 50 довжин хвиль у залежності від відстані від центру розкриву до точок спостереження в напрямку вісі випромінювача, тобто в даному випадку в напрямку головного максимуму діаграми спрямованості. З рис. 1 а видно, що у випадку малих діаметрів (від  $0.5\lambda$  до  $1\lambda$ ) прожекторний промінь не формується, а амплітуди полів  $E$  і  $H$  рівномірно зменшуються зі збільшенням координати  $z$ . Швидкість зменшення амплітуди поля тим більша, чим менший електричний розмір розкриву. Для  $D = 0.5\lambda$  амплітуда електричного поля, яка віднесена до її величини в центрі розкриву, тобто на початку координат, більша відносної амплітуди магнітного поля. Для  $D = 1\lambda$

відносна амплітуда магнітного поля більша відносної амплітуди електричного поля, а для  $D=0.75\lambda$  поля  $E/E_0$  і  $H/H_0$  у ближній та проміжній зонах дуже близькі одне до одного.

Обчислені залежності різниці фаз електричного й магнітного полів від відстані для напрямку нормалі до розкриву випромінювача. Ця важлива характеристика електромагнітного поля визначає наявність, локалізацію й величину реактивної потужності електромагнітного поля в ближній зоні антени.

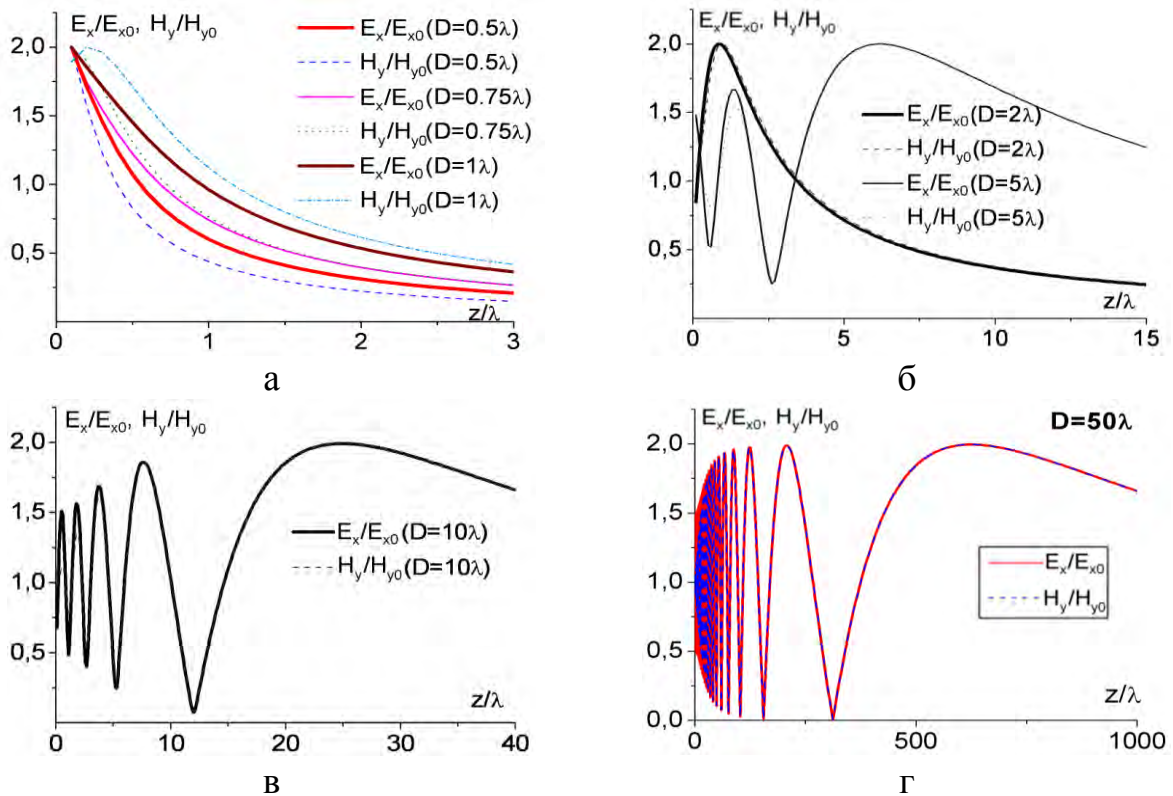


Рис. 1 Залежності амплітуд електричного й магнітного полів у ближній зоні апертурних антен з круглим розкриттям малих, середніх та великих електричних розмірів від відстані в напрямку нормалі до розкриття

Виявилось, що максимальний кут зсуву фаз електричного й магнітного поля досягає приблизно  $35^\circ$  поблизу розкриття у випадку випромінювача з найменшим діаметром розкриття. Зі збільшенням електричних розмірів розкриття різниця фаз і, отже, реактивна потужність електромагнітного поля в ближній зоні, зменшуються. Зокрема, для  $D=\lambda$  максимальна різниця фаз  $E$ - і  $H$ - полів не перевищує  $12^\circ$  та має місце на відстані близько  $0.1$  довжини хвилі. На відстані  $z=\lambda$ , тобто на відстані половини відстані дальньої зони, різниця фаз  $E$ - і  $H$ - полів не перевищує одного градуса. Отже, реактивна потужність поля на цій відстані не перевищує  $0.02\%$  від повної потужності електромагнітного поля в області цієї точки спостереження.

Особливістю електромагнітного поля в ближній зоні антен є відмінність хвильового опору простору в ближній зоні від хвильового опору вільного простору в дальній зоні  $W_0 = 120\pi$  Ом. Обчислена залежність відношення хвильового опору в ближній зоні  $W_S$  до хвильового опору вільного простору  $W_0$

від відстані  $z/\lambda$  у напрямку нормалі до розкриву. З'ясувалось, що характер цієї залежності досить складний і максимальна відмінність опорів тим більша, чим більший діаметр розкриву.

З рис. 1 б, в, г очевидні особливості формування прожекторного променя в ближній зоні апертурних антен з розкритом круглої форми. Зокрема видно, що амплітуди електричних і магнітних полів змінюються в залежності від відстані по осцилюючим закономірностям. Число екстремумів цієї залежності дорівнює числу довжин хвиль, які укладаються в розкритті. Середня амплітуда полів приблизно дорівнює їх значенням у центрі розкриття  $E_{x0}$  і  $H_{y0}$  незалежно від електричних розмірів розкриття. Перепади амплітуд  $E$  і  $H$  полів дуже великі, що призводить до утворення «мертвих зон» у робочій області радіоелектронних систем на відстанях, які дещо більші діаметру розкриття.

На рис. 2 представлені амплітудні й фазові характеристики електричних та магнітних полів у залежності від поперечної координати  $x/\lambda$ , які обчислені для відстаней від однієї чверті діаметру розкриття до 5 діаметрів.

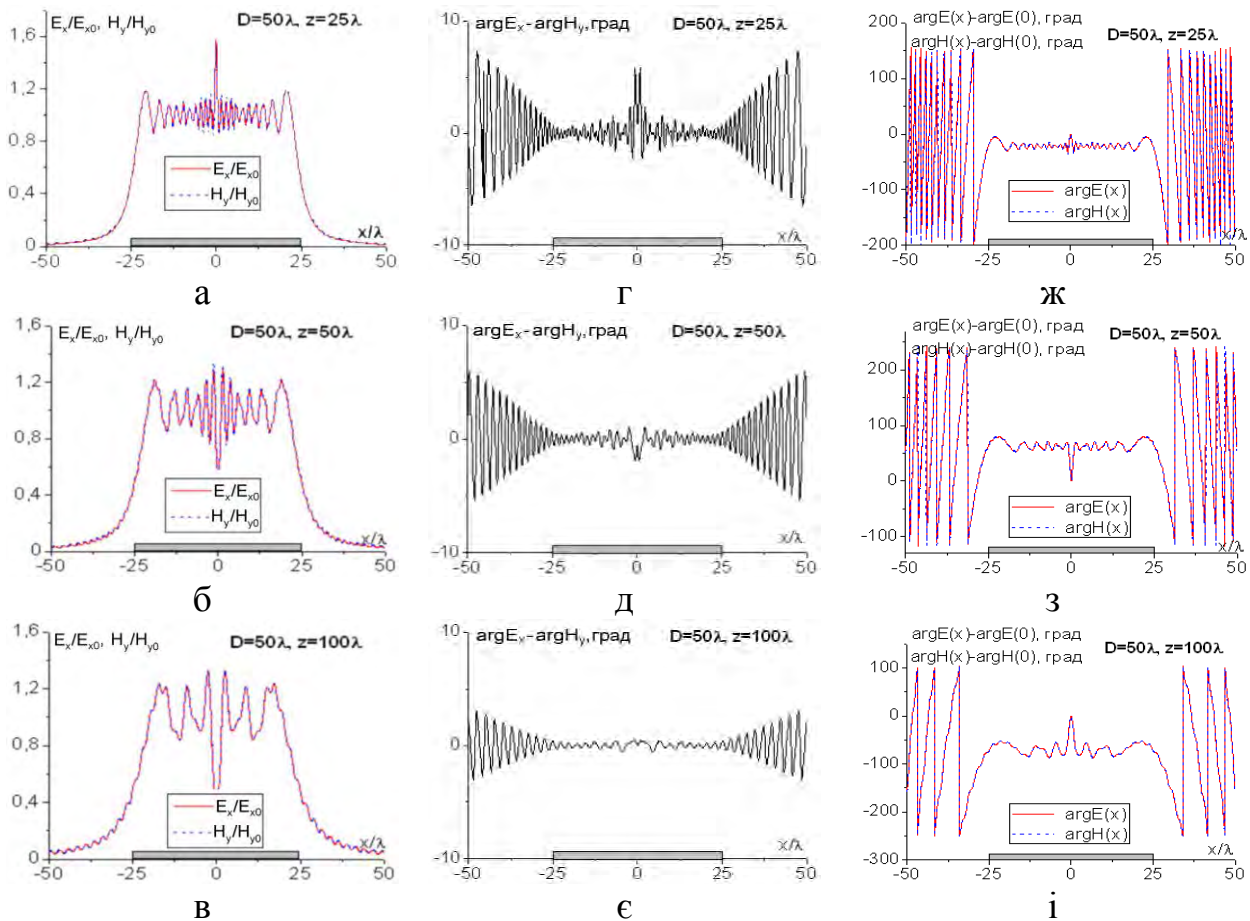


Рис. 2 Амплітудні й фазові характеристики електричного та магнітного полів у площинах, які паралельні круглому розкриттю діаметром  $50\lambda$

З динаміки зміни просторового розподілу амплітуд (рис. 2 а-в) і фаз (рис. 2 г-і) у залежності від відстані від антени видно, що амплітуди нормованих електричних  $E_x/E_{x0}$  та магнітних  $H_y/H_{y0}$  полів і різниця їх фаз відрізняються

одна від одної незначно вже на досить малих – до половини діаметру розкриву, відстанях від антени. З рис. 2 видно, що прожекторний промінь являє собою сукупність паралельних променів у ближній зоні апертурних антен у напрямку максимуму випромінювання, яка описується плоскою локальною неоднорідною електромагнітною хвилею, що біжить. Геометрично прожекторний промінь займає обмежену область простору, протяжність і конфігурація якої визначається електричними розмірами та формою розкриву антени, а також амплітудним і фазовим розподілами джерел електромагнітного випромінювання в ньому.

Видно також, що у прожекторному промені зміни відносних амплітуд (рис. 2 а-в) та фаз (рис. 2 г-і) полів і, отже, потужності електромагнітного поля, у залежності від поперечних координат точок спостереження значно менші їх змін у залежності від поздовжніх координат. Відзначимо, що плоска локальна неоднорідна хвиля в прожекторному промені спостерігається на великих відстанях. Її середня амплітуда близька до амплітуди поля в центрі розкриву незалежно від електричних розмірів розкриву антени. За умов збільшення діаметру розкриву протяжність області прожекторного променя збільшується з більшою швидкістю, як для апертурних антен з квадратним розкритвом. Відстань дальньої зони антен, які досліджуються, добре описується класичною формулою  $R_{дз} \geq 2D^2/\lambda$ . Показано також, що чим більший діаметр розкриву антени, тим більше відрізняються одна від одної амплітуди електричних і магнітних полів безпосередньо поблизу розкриву антени.

**У третьому розділі** досліджені амплітудні й фазові характеристики електричних та магнітних полів у ближній зоні неперервних апертурних антен квадратної і прямокутних форми в разі зміни їх розмірів і відношення сторін у широких межах. Для цього розв'язана зовнішня векторна задача електродинаміки про випромінювання апертурних антен з розкритвом квадратної і прямокутної форми довільних електричних розмірів у ближній та проміжній зонах, проведено обчислення й аналіз амплітудних і фазових характеристик електромагнітних полів.

Одержані вирази для всіх компонент електричних і магнітних полів у декартовій системі координат на довільній відстані від випромінювача до точки спостереження. З отриманих формул видно, що в загальному випадку в ближній зоні апертурних антен не рівні нулю всі шість компонент електромагнітного поля. Цей висновок справедливий не тільки у випадку еліптичної і кругової поляризації, але й у випадку лінійної (вертикальної або горизонтальної) поляризації випромінювання апертурних антен у ближній та проміжній зонах спостереження.

Проведені обчислення характеристик випромінювання апертурних антен з розкритвом квадратної форми з різними розподілами поля у випромінюючому розкритві з довільними розмірами. Для кожного варіанту розподілу поля проведено обчислення характеристик випромінювання для різних електричних розмірів розкритву як вздовж нормалі до розкритву, так і на певних поперечних площинах в ближній зоні.

Для визначення межі зони ближніх реактивних полів апертурних антен з розкритвом квадратної форми проведено аналіз наступних залежностей: амплітуди

поля в напрямку головного максимуму випромінювання  $E_x(z/\lambda, x=0, y=0)$ , яка нормована до амплітуди поля в середині випромінюючого розкриву, як функції відстані від антени до точки спостереження; відношення амплітуд поперечних компонент електричного й магнітного полів ( $W = E_x/H_y$ ), яке нормоване до величини хвильового опору вільного простору ( $W_0$ ) у залежності від відстані від антени до точки спостереження; різниці фаз між напруженістю електричного й магнітного полів у залежності від відстані; просторовий розподіл реактивної потужності випромінювання.

Для визначення зовнішньої межі області «ближніх реактивних полів» введені додаткові критерії та визначені: відстані від антени, починаючи з яких  $|1 - W/W_0| \leq 0.01$ , де  $W = E_x/H_y$  – хвильовий опір простору поблизу антени; відстані, починаючи з яких виконується співвідношення  $|\arg(E_x) - \arg(H_y)| \leq 1^\circ$ ; відстані, починаючи з яких відношення густини потоку реактивної потужності до активної  $|P_r/P_a| \leq -20$  дБ. З аналізу проведених обчислень амплітудних й фазових характеристик електричних та магнітних полів у ближній зоні неперервних апертурних антен, розміри сторін яких не перевищують однієї довжини хвилі, відстань дальньої зони складає 1.5–2 довжини хвилі. У напрямку нормалі до розкриву таких антен амплітуди електричних і магнітних полів зменшуються рівномірно. Також рівномірно змінюються всі характеристики полів в поперечних площинах на різних відстанях від розкриву. Таким чином, у ближній зоні апертурних випромінювачів малих електричних розмірів прожекторний промінь не формується.

У разі збільшення розмірів апертури квадратної форми більше 1–1.5 довжини хвилі в ближній зоні формується прожекторний промінь, для якого характерна осцилююча закономірність залежності амплітуди поля від відстані. Характер осциляцій у цьому випадку якісно близький до розглянутого вище випадку розкриву круглої форми, однак розмах осциляцій значно менший. Зокрема для розкриву  $100\lambda \times 100\lambda$  глобальний мінімум амплітуди електричного й магнітного полів досягає  $-4.4$  дБ від їх величини в середині розкриву.

Досліджено вплив відношення сторін розкриву прямокутної форми на амплітудні й фазові характеристики полів у ближній зоні. З аналізу результатів обчислень багатьох варіантів розкривів показано, що розподіли амплітуди поля в ближній зоні безперервних апертурних антен з розкривом прямокутної форми мають нову якість – порушується регулярний характер осциляцій залежності амплітуд електричного й магнітного полів від відстані в напрямку нормалі до розкриву. Шляхом відповідного вибору відношення сторін розкриву випромінювача є можливість забезпечити однорідність поля в деякому об'ємі в межах прожекторного променя або на обмеженій ділянці поперечної площини, що часто важливо для практики. У випадку збільшення розміру меншої зі сторін прямокутного розкриву до 3–5 довжини хвилі залежність амплітуди електричного й магнітного полів у прожекторному промені від відстані набуває характеру суперпозиції двох регулярних коливань – з меншим періодом від квадратного розкриву, сторона якого дорівнює більшій стороні прямокутного, і з

більшим періодом від квадратного розкриву, сторона якого дорівнює меншій стороні прямокутного (рис. 3). Характерний для лінійних антен рівномірний убуваючий закон зменшення амплітуди електричного й магнітного полів у разі збільшення відстані від розкриву випромінювача має місце для відношень сторін розкриву, які більші 5:1 – 10:1.

Показано, що чим більший електричний розмір випромінювача, тим більша протяжність зони осциляцій поля в ближній зоні, причому протяжність цієї області слабо залежить від характеру амплітудного розподілу, особливо для випромінювачів з апертурами великих електричних розмірів (більших  $10\lambda$ ).

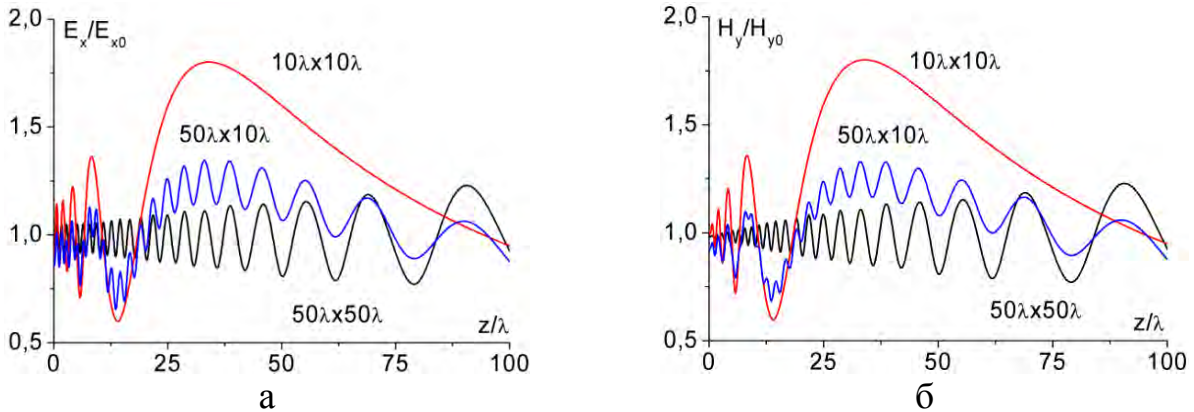


Рис. 3 Залежності амплітуди електричного (а) й магнітного (б) полів апертурних випромінювачів від відстані для трьох апертурних антен з розкривами  $10\lambda \times 10\lambda$ ;  $50\lambda \times 50\lambda$  та  $50\lambda \times 10\lambda$

Для менших випромінювачів протяжність зони осциляцій, отже й межа області реактивних полів, суттєво залежить від виду амплітудного розподілу. Важливо, що розмах осциляцій істотно залежить від виду амплітудного розподілу в розкритті випромінювача. Для амплітудних розподілів виду  $F_7(y_s) = 1 - \sqrt{2y_s/|b|}$ ,  $F_8(y_s) = 1 - \sqrt[4]{2y_s/|b|}$ ,  $F_9(y_s) = 1 - \sqrt[6]{2y_s/|b|}$  спостерігається мінімальна глибина осциляцій. Ця особливість, як було зазначено вище, може бути використана для конструювання випромінювачів, які дозволяють створити близький до рівномірного розподіл амплітуди поля в заданому об'ємі простору поблизу антени.

Встановлено, що для практичних застосувань, зокрема, зменшення взаємного впливу один на одного випромінювачів в антенних решітках, доцільно використовувати апертурні антени максимально можливих розмірів випромінюючого розкриву. Це пояснюється тим, що в апертурних антенах потужність випромінювання зосереджена у прожекторному промені, а у лінійних антенах вона зосереджена безпосередньо поблизу антени.

У четвертому розділі теоретично у рамках методу Кірхгофа досліджено вплив розмірів і форми розкриву рупорних антен для постійного та для спадаючого до нуля на краях по косинусоїдальному закону амплітудних розподілів і різних за величиною квадратичних фазових розподілів поля в розкритті на просторовий розподіл поля в ближній та проміжній зонах

спостереження. Визначено межі дальньої зони для хвильоводних випромінювачів малих електричних розмірів випромінюючого розкриву виходячи з аналізу амплітудних і фазових характеристик електричних та магнітних полів таких випромінювачів. Для цього обчисленні та проаналізовані такі залежності: залежність амплітуд всіх компонент поля від кутових координат на різних відстанях від розкриву антени до точки спостереження; залежність різниці фаз поперечних компонент електричного й магнітного полів від відстані; залежність відношення амплітуд поперечних компонент електричного та магнітного полів ( $W = E_\theta/H_\varphi$ ), які нормовані до величини хвильового опору вільного простору, від відстані від антени до точки спостереження.

Розглянуто залежності амплітуди  $\dot{E}_x$ -компоненти поля від поперечних координат  $x$  і  $y$  на різних відстанях від розкриву рупору до точки спостереження для різних значень електричних розмірів розкриву. На рис. 4 наведена така залежність випромінювання  $E$ -секторного рупору з урахуванням фазових розподілів  $\varphi(x) = \frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{R^2 + x^2} - R)$ . Видно, що квадратичний фазовий розподіл призводить до збільшення ширини залежності амплітуди  $\dot{E}_x$ -компоненти поля в  $E$ - площині в порівнянні з випадком синфазного рупору. Фазові спотворення впливають на розподіл поля в  $E$ - площині сильніше, ніж у  $H$ - площині. У  $E$ - площині фазові спотворення призводять до збільшення ширини залежності амплітуди поля від поперечної координати. У розглянутих залежностях з'являються додаткові осциляції у межах області, яка відповідає розкриву рупору, амплітуда поля зменшується з меншою швидкістю, ніж для випадку синфазного випромінювача. Фазові спотворення практично не впливають на розподіл амплітуди поля у  $H$ - площині.

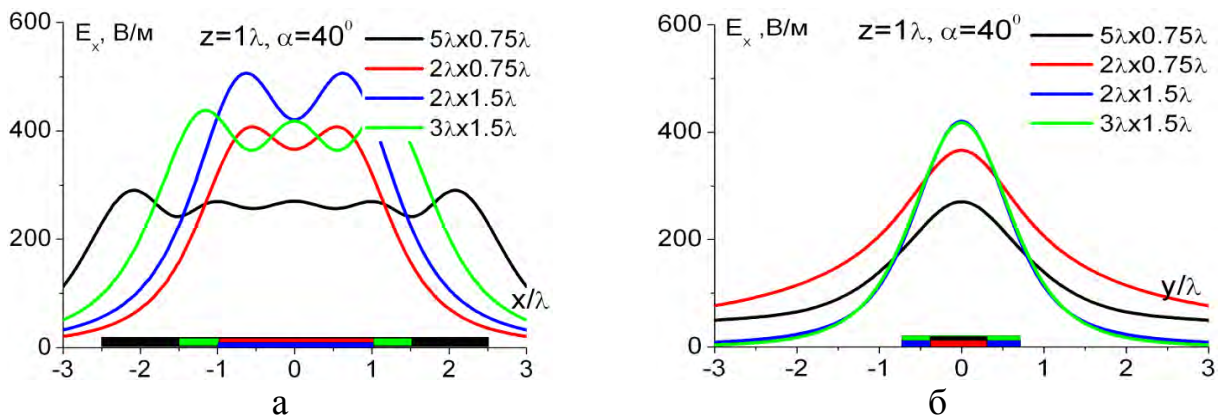


Рис. 4 Залежність  $\dot{E}_x$  амплітуди поля у напрямку вісі рупору на відстані  $z = 1\lambda$  від розкриву в  $E$ - (а) і  $H$ - (б) площинах з урахуванням квадратичних фазових розподілів

У випадку віддалення від розкриву рупору форма розподілу поля в області ближніх реактивних полів повторює розподіл поля в розкритті рупору. У дальній зоні амплітудні характеристики поля слабо змінюються від координат  $x$  і  $y$  на

ділянці поперечної площини, розміри й форма якої збігаються з розмірами та формою розкриву. Таким чином, у цій області простору в ближній зоні випромінювання рупорних антен являє собою локальну неоднорідну плоску хвилю.

Проведені дослідження доводять можливість реалізувати близькі до постійних розподіли амплітуди й потужності електромагнітного поля в заданому об'ємі в ближній зоні шляхом вибору розмірів та кута розкриву рупору.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна наукова задача розвитку теорії електромагнітних полів у ближній зоні безперервних апертурних випромінювачів довільних електричних розмірів. Уперше отримано такі наукові й практичні результати:

1. Уперше розв'язана зовнішня векторна задача електродинаміки про випромінювання безперервних апертурних випромінюючих систем з розкривом круглої, квадратної і прямокутної форми для довільної поляризації поля у випромінюючому розкриві на довільній відстані від випромінюючої системи в ближній та проміжній зонах спостереження в декартовій системі координат. На амплітудні й фазові розподіли джерел поля в розкриві та його розміри не накладається ніяких обмежень.

2. Уперше розроблено математичне забезпечення для дослідження амплітуди, фази й поляризації електромагнітних полів у ближній зоні безперервних апертурних антен з випромінюючим розкривом круглої форми, за допомогою якого вперше показано, що у випадку малих діаметрів розкриву (не більше однієї довжини хвилі) амплітуди електричних та магнітних полів у напрямку нормалі до розкриву монотонно зменшуються зі збільшенням відстані по закону, близькому до експоненціального. Швидкість убуття полів тим більша, чим менші електричні розміри розкриву антени. Відстань дальньої зони таких випромінювачів дорівнює 1–1.5 довжини хвилі незалежно від діаметру розкриву.

3. Уперше показано, що у випадку діаметрів розкриву, які більші однієї-півтори довжини хвилі, безперервні апертурні антени з розкривом круглої форми в ближній зоні формують прожекторний промінь, який є локальною плоскою неоднорідною хвилею, що займає обмежений об'єм близької до циліндричної форми. Діаметр прожекторного променя дещо менший діаметру розкриву випромінювача, а протяжність області прожекторного променя тягнеться до половини відстані дальньої зони  $R_m \leq D^2/\lambda$ . У напрямку нормалі до розкриву амплітуди електричних і магнітних полів у залежності від відстані змінюються по осцилюючим закономірностям з наростаючою амплітудою й періодом осциляцій, що збільшується. У цьому випадку середня амплітуда напруженості й електричного, і магнітного полів у прожекторному промені близька до його величини в середині розкриву. Відносні амплітуди електричного й магнітного полів відрізняються між собою тільки безпосередньо поблизу розкриву



випромінювача, причому тим більше, чим більше діаметр апертури. Відношення амплітуд електричного й магнітного полів, тобто хвильовий опір простору в ближній зоні випромінюючої системи, у залежності від відстані від розкриву змінюється також по осцилюючій закономірності, причому він тим менше відрізняється від хвильового опору вільного простору в дальній зоні, чим більший діаметр розкриву випромінювача. Різниця фаз електричного й магнітного полів у прожекторному промені, яка визначає величину й локалізацію активної і реактивної потужностей електромагнітного поля в ближній зоні апертурних антен з круглим розкриттям, мало відрізняється від нуля на відстанях, які дещо більші діаметру розкриву. Поза межами прожекторного променя поле значно зменшується.

4. Характер розподілу амплітуди поля в ближній зоні безперервних апертурних випромінювачів з розкриттям квадратної форми якісно близький до характеру розподілу амплітуди поля в ближній зоні апертурних антен з розкриттям круглої форми. Уперше показано, що прожекторний промінь формується за розмірів сторін розкриття, які більші 1 – 1.5 довжини хвилі. Електричні й магнітні поля в прожекторному промені в залежності від відстані змінюються по регулярним осцилюючим закономірностям, але амплітуди поля в їх максимумах і мінімумах відрізняються від величини в середині розкриття значно менше, ніж у випадку апертури круглої форми.

5. Уперше показано, що розподіли амплітуди поля в ближній зоні безперервних апертурних антен з розкриттям прямокутної форми мають нову якість – порушується регулярний характер осциляцій залежності амплітуд електричного й магнітного полів від відстані в напрямку нормалі до розкриття. Шляхом відповідного вибору відношення сторін розкриття випромінювача є можливість забезпечити однорідність поля в деякому об'ємі в межах прожекторного променя або на обмеженій ділянці поперечної площини, що часто важливо для практики. У випадку збільшення розміру меншої зі сторін прямокутного розкриття до 3 – 5 довжини хвилі залежність амплітуди електричного й магнітного полів у прожекторному промені від відстані набуває характеру суперпозиції двох регулярних коливань – з меншим періодом від квадратного розкриття, сторона якого дорівнює більшій стороні прямокутного, і з більшим періодом від квадратного розкриття, сторона якого дорівнює меншій стороні прямокутного. Характерний для лінійних антен рівномірний убуваючий закон зменшення амплітуди електричного й магнітного полів у разі збільшення відстані від розкриття випромінювача має місце для відношень сторін розкриття, які більші 5:1 – 10:1.

6. Уперше розв'язана зовнішня векторна задача електродинаміки про випромінювання рупорних антен у ближній і проміжній зонах з урахуванням квадратичних фазових розподілів джерел поля в розкритті в декартовій і сферичній системах координат. У результаті дослідження розподілу амплітуд полів поблизу рупорних антен доведено можливість зменшення амплітуди осциляцій електричних і магнітних полів у ближній зоні за рахунок використання спадаючих до країв амплітудних розподілів та квадратичних фазових розподілів різної величини поля на розкритті. Виявлено, що зміна амплітудного розподілу й форми

розкрити більше впливає на характер розподілу поля в просторі поблизу рупору, а варіації квадратичних фазових розподілів зміною глибини рупору – на більших відстанях.

7. З аналізу розподілу амплітуд і фаз електричного та магнітного полів у ближній зоні апертурних і лінійних антен з розмірами апертури, меншими довжини хвилі, уперше показано, що відстань дальньої зони таких антен дорівнює півтори-дві довжини хвилі за будь-яких форм розкрити й амплітудно-фазових розподілів джерел поля на антені.

8. Уперше показано, що лінійні антени не формують прожекторний промінь у ближній зоні ні за яких електричних розмірів і ні за яких амплітудно-фазових розподілів джерел поля на антені.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:**

1. Gorobets N. N., **Ovsyannikova Ye. Ye.**, Shishkova A. V. Far-field zone range of waveguide oscillators // Telecommunications and Radio Engineering. 2010. Vol. 69. Issue 13. P. 1153–1163. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i13.30 ; Горобец Н. Н., Овсянникова Е. Е., Шишкова А. В. Расстояние дальней зоны волноводных излучателей // Вісн. Харків. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2008. № 834. Вип. 13. С. 68–76.

*(Особистий внесок здобувача: участь у розв'язанні задачі про випромінювання з відкритого кінця прямокутного хвилеводу, що збуджується хвилею основного типу  $H_{10}$ , а також в аналізі результатів обчислень; програмування й обчислення амплітудних та фазових характеристик.)*

2. Горобец Н. Н., **Овсянникова Е. Е.**, Шишкова А. В. Формирование равномерного распределения электромагнитного поля в ближней зоне E-секториальных рупорных антенн // Вісн. Харків. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1038. Вип. 21. С. 17–24.

*(Особистий внесок здобувача: аналіз і формулювання висновку про можливість синтезу однорідного просторового розподілу амплітуд електричних та магнітних полів у ближній зоні E-секторних рупорних антен одержано авторами спільно, розробка алгоритму, програмування та обчислення амплітудних і фазових характеристик полів у ближній зоні рупорних випромінювачів виконано здобувачем самостійно.)*

3. Горобец Н. Н., **Овсянникова Е. Е.** Влияние размеров и формы излучающего раскрытия на характер пространственного распределения поля вблизи антенны // Вісн. Харків. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2013. № 1094. Вип. 23. С. 51–59.

*(Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму, програми та обчислення виконані здобувачем самостійно. Аналіз результатів і формулювання висновків проведені авторами спільно.)*

4. Горобец Н. Н., **Овсянникова Е. Е.** Волновые процессы в прожекторном луче апертурных антенн // Прикладная радиоэлектроника. 2015. Т. 14, № 1. С. 51–58.

*(Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму, програмування й обчислення виконані здобувачем особисто, розв'язання задач, аналіз результатів обчислень та формулювання висновків зроблені авторами спільно.)*

5. Gorobets N. N., **Ovsyannikova E. E.** Electromagnetic field and waves near aperture antennas of large electrical sizes // Telecommunications and Radio Engineering. 2016. Vol. 75. Issue 12. P. 1041–1050. DOI : 10.1615/TelecomRadEng.v75.i12.10 ; Горобец Н. Н., Овсянникова Е. Е. Электромагнитные поля и волны вблизи апертурных антенн больших электрических размеров // Вісн. Харків. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2014. № 1115. Вип. 24. С. 111–118.

*(Особистий внесок здобувача: розв'язанні електродинамічної задачі про випромінювання, аналіз результатів обчислень і формулювання висновків зроблені авторами спільно, програми та обчислення виконані здобувачем самостійно.)*  
(Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

6. Gorobets N. N., **Ovsyannikova E. E.** Wave processes in the near-field zone of weakly directive aperture radiators of electromagnetic waves // Telecommunications and Radio Engineering. 2016. Vol. 75. Issue 8. P. 705–718. DOI : 10.1615/TelecomRadEng.v75.i8.40 ; Горобец Н. Н., Овсянникова Е. Е. Волновые процессы в ближней зоне слабонаправленных апертурных излучателей электромагнитных волн // Радиотехника : Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. 2015. Вып. 183. С. 105–115.

*(Особистий внесок здобувача: програмування та обчислення виконані здобувачем особисто, аналіз результатів обчислень і формулювання висновків зроблені авторами спільно.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

7. Горобец Н. Н., **Овсянникова Е. Е.** Волновые процессы в ближней зоне апертурных антенн с раскрытием круглой формы // Вісн. Харків. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2017. Вип. 26. С. 24–34.

*(Особистий внесок здобувача: розв'язання електродинамічної задачі в декартовій системі координат, розробка алгоритму, програмування й обчислення виконані здобувачем особисто, постановка задачі, аналіз результатів обчислень і формулювання висновків зроблені авторами спільно.)*

#### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

8. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Шишкова А. В., **Овсянникова Е. Е.** Распределение поля в ближней зоне волноводных и рупорных излучателей // Миллиметровые волны в медицине и биологии : XIV Рос. симп. с междунар. участием, 2–5 апр. 2007 г.: тезисы докл. Москва, 2007. С. 254–257.

*(Особистий внесок здобувача: автор провела обчислення розподілу поля в ближній зоні хвилеводних і рупорних випромінювачів у декартовій системі координат.)*

9. **Овсянникова Е. Е.**, Шишкова А. В. Распределение амплитуд электромагнитных полей на плоскости в ближней и промежуточной зоне антенн с прямоугольной апертурой // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2007: материалы 3-й междунар. молодежной научн.-техн. конф., 16–21 апр. 2007 г., Севастополь, 2007. С. 125.

*(Особистий внесок здобувача: автором отримані вирази в декартовій системі координат для компонент електричного й магнітного полів для довільних апертур.)*

10. Gorobets N. N., **Ovsyannikova Ye. Ye.**, Shishkova A. V. Near-field plane distribution of rectangular waveguide excited by dominant and higher-order modes // MSMW'07: Proceedings of International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves : Symposium Proceedings, 25–30 June 2007, Kharkiv, 2007. P. 687–689.

*(Особистий внесок здобувача: автор провела обчислення розподілу поля в декартовій системі координат для компонент електричного й магнітного полів для довільних апертур.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

11. Shishkova A. V., Gorobets N. N., Ovsyannikova Ye. Ye. Near-field Radiation from Sectoral Horns // ICATT'07: Proceedings of International Conference on Antenna Theory and Techniques, 17–21 Sept. 2007, Sevastopol, 2007. P. 134–136.

*(Особистий внесок здобувача: автор розробила програмне забезпечення, провела обчислення й приймала участь у аналізі отриманих результатів.)*

12. **Овсянникова Е. Е.**, Шишкова А. В. Излучение в ближней зоне прямоугольного волновода, возбуждаемого модами высших типов  $H_{m0}$  // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке : XII междунар. молодежного форума, 1–3 апр. 2008г. : тезисы докл. Харьков, 2008. С. 54.

*(Особистий внесок здобувача: автор провела обчислення й приймала участь у аналізі отриманих результатів.)*

13. **Овсянникова Е. Е.**, Шишкова А. В. Характеристики излучения широкоразмерных  $E$ -плоскостных секториальных рупоров в ближней, промежуточной и дальней зонах наблюдения // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2008 : материалы 4-ой Междунар. молодежной науч.-техн. конф., 21–25 апр. 2008 г., Севастополь, 2008. С. 170.

*(Особистий внесок здобувача: автор створила програмне забезпечення, приймала участь у аналізі отриманих результатів.)*

14. Горобец Н. Н., **Овсянникова Е. Е.**, Шишкова А. В. Влияние амплитудного распределения поля на протяженность зоны ближних реактивных полей апертурных излучателей // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы 19-ой Междунар. Крым. конф., 14–18 сент. 2009 г., Севастополь, 2009. С. 464–465.

*(Особистий внесок здобувача: автору належить розробка алгоритму й дослідження області «ближніх реактивних полів» апертурних випромінювачів квадратної форми з різними законами розподілу поля в розкриві.)*

15. **Овсянникова Е. Е.**, Шишкова А. В. Влияние величины квадратичных фазовых искажений на пространственное распределение поля в ближней зоне апертурных антенн // Радиофизика, Электроника, Фотоника та Біофізика: 9-а Харків. конф. молодих науковців, 1–3 груд. 2009 г. : зб. анот. Харків, 2009. С. 103.

*(Особистий внесок здобувача: автор приймала участь у створенні програмного забезпечення, проведенні обчислень, аналізі отриманих результатів.)*

16. **Ovsyannikova O. E.**, Shishkova A. V., Gorobets N. N. Distribution of reactive power density in the near-field region of aperture antennas with different illumination laws // MSMW'10 : Proceedings of International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, 21–26 June. 2010, Kharkiv, 2010. P. 1–3.

*(Особистий внесок здобувача: автор проводила обчислення й приймала участь в аналізі отриманих результатів.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

17. Горобец Н. Н., **Овсянникова Е. Е.** Об обеспечении квазиоднородного распределения поля вблизи апертурных антенн // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы 23-й Междунар. Крым. конф., 8–14 сент. 2013р., Севастополь, 2013. С. 622–623.

*(Особистий внесок здобувача: автор створила програму для обчислень, брала участь у проведенні обчислень і аналізі результатів.)*

18. Gorobets N. N., **Ovsyannikova O. E.** Influence of Radiating Aperture Form on Electric Field Distribution Near Antenna // UWBUSIS'14 : Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 15–19 Sept. 2014, Kharkiv, 2014. P. 67–70.

*(Особистий внесок здобувача: автор проводила обчислення й зробила аналіз результатів.)*

19. Горобец Н. Н., **Овсянникова Е. Е.** Электромагнитные поля в ближней зоне слабонаправленных апертурных антенн // Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи ЭМС-2016 : материалы 2-й Междунар. науч.-техн. конф., 24–25 мая 2016 г., Харьков, 2016. С. 104–107.

*(Особистий внесок здобувача: автор приймала участь у проведенні обчислень й аналізі результатів.)*

20. Gorobets N. N., **Ovsyannikova Ye. Ye.** Wave processes in the near-field zone of large aperture antenna // MSMW'16 : Proceedings of International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, 20–24 June 2016, Kharkiv, 2016. P. 1–3.

*(Особистий внесок здобувача: автор приймала участь у створенні програмного забезпечення, проведенні обчислень, аналізі отриманих результатів.)*

21. Gorobets N. N., **Ovsyannikova Ye. Ye.** Influence of the Form of Radiating Aperture on Wave Processes in the Near Field Omnidirectional Aperture Antennas // UWBUSIS'16: Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 5–11 Sept. 2016, Odessa, 2016. P. 231–233.

*(Особистий внесок здобувача: автор приймала участь у проведенні обчислень, аналізі отриманих результатів.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

22. Горобець М. М., Лебедев А. С., **Овсянникова О. Є.** Электромагнитні поля і хвилі в ближній зоні антен // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2016) : X Міжнар. наук.-техн. конф., 5–7 жовт. 2016 р.: тези доп., Харків, 2016. С. 87.

*(Особистий внесок здобувача: автор приймала участь у створенні програмного забезпечення, аналізі отриманих результатів, проведенні обчислень.)*

23. Gorobets N. N., **Ovsyannikova Ye. Ye.** Electromagnetic fields in the near-zone of aperture antennas with round opening // ICATT'17 : Proceedings on Flash-drive of International Conference on Antenna Theory and Technique, 1–4 May 2017, Kyiv, 2017. P. 134–136.

*(Особистий внесок здобувача: автор розв'язала зовнішню векторну задачу електродинаміки про випромінювання апертурних антен з розкритом круглої форми на довільній відстані, включаючи ближню зону; розробила алгоритм, комп'ютерну програму й провела обчислення.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

24. Gorobets N. N., **Ovsyannikova O. Ye.** Electromagnetic fields in the searchlight beam of aperture antennas with the aperture of a round shape // UWBUSIS'18 : Proceedings on Flash-drive of 9<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals., 4–7 Sept. 2018, Odessa, 2018. P. 362–365.

*(Особистий внесок здобувача: автор розв'язала зовнішню векторну задачу електродинаміки про випромінювання апертурних антен з розкритом круглої форми на довільній відстані, розробила алгоритм, комп'ютерну програму й провела обчислення.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

**Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

25. **Овсяннікова Е. Е., Шишкова А. В., Горобец Н. Н.** Влияние вида амплитудного распределения на характеристики полей в ближней зоне апертурных антен // Вісн. Харків. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2009. № 853. Вип. 14. С. 26–34.

*(Особистий внесок здобувача: участь у розв'язанні задачі про знаходження електричних і магнітних полів випромінювання апертурних антен довільних розмірів з відомими амплітудними розподілами джерел поля в розкриті, а також в аналізі результатів обчислень; програмування й обчислення амплітудних та фазових характеристик полів у ближній зоні здобувач виконала особисто.)*

## АНОТАЦІЯ

Овсяннікова О. Є. Електромагнітні поля в ближній зоні апертурних антен. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України. – Харків, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної наукової задачі дослідження електромагнітних полів у ближній зоні безперервних апертурних випромінювачів довільних електричних розмірів.

У роботі побудовано розв'язання векторної задачі про випромінювання апертурних антен з розкритом круглої, квадратної і прямокутної форми для довільних електричних розмірів розкриття для антен з малою, середньою та

високою спрямованістю. Показано, що за розмірів апертури, які менші однієї довжини хвилі, амплітуда поля максимальна поблизу розкриву й рівномірно зменшуються за умов збільшення відстані від антени. За більших розмірів розкриву амплітуди електричних і магнітних полів у ближній зоні змінюються за осцилюючими закономірностями, які характерні для прожекторного променя. Середні амплітуди полів близькі до їх значень у середині розкриву. Фазовий розподіл полів у поперечних площинах близький до постійного незалежно від форми й розмірів розкриву. Показано, що вибором відношення сторін синфазного розкриву прямокутної форми й квадратичних фазових розподілів джерел поля в розкритті можливо синтезувати однорідну хвилю в певному об'ємі або на поперечній площині в ближній зоні випромінювача.

**Ключові слова:** електромагнітні поля, зовнішня задача електродинаміки, амплітуда, фаза, поляризація, ближня, проміжна, дальня зона, апертурні випромінювачі, прожекторний промінь.

### ABSTRACT

Ovsyannikova E. E. Electromagnetic fields in the near zone of aperture antennas. – Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Physical and Mathematical Sciences, Specialty 01.04.03 – Radio Physics. – V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv, 2019.

Dissertation study is devoted to the solution of the urgent scientific problem of electromagnetic field study in the near zone of arbitrary electric sizes aperture radiators.

Object of study – electromagnetic fields and waves in the near and intermediate zone of apertures radiators.

Subject of the study is the spatial distribution of amplitudes, phases and polarization of electric and magnetic fields vectors of intensity of the aperture radiators in the near and intermediate observation zones.

The study is destined to the solution of an external vector problem of electrodynamics for electromagnetic waves radiation by aperture systems with an aperture of circular, square and rectangular shapes for arbitrary aperture electric dimensions and also for arbitrary polarization of the field in the aperture at an arbitrary distance from the radiator.

In the case of low-directional antennas, the analysis showed: the aperture diameter being not more than 1–1.5 wavelengths, the amplitudes distribution of the electric and magnetic fields in the near zone of the circular and square apertures are almost identical. The distance of the far zone of this type of antennas is 1.5 wavelengths. If the aperture electrical dimensions increase, the spatial distributions of the fields in the near zone for the circular and square apertures are qualitatively close, but the quantitative data differ significantly. In this case, local flat inhomogeneous waves of electric and magnetic fields are excited in the near zone, and their average amplitudes are close to that of the fields in the middle of the cross irrespectively to the electrical dimensions of the antenna aperture, i.e. the searchlight beam. The searchlight beam means a set of parallel rays in the near zone of aperture antennas in the direction of radiation maximum, described by a flat local inhomogeneous travelling

electromagnetic wave. Almost all the radiation power of the antenna is concentrated in the searchlight beam. Geometrically, the searchlight beam is a limited part of space, its length and configuration is determined by the electrical size and shape of the antenna, as well as the amplitude and phase distribution of electromagnetic radiation sources in it. In the cross sections, more or less, the searchlight beam imitates the shape and dimensions of the aperture.

In the case of rectangular aperture, the oscillations of the amplitude of the electric and magnetic fields are disturbed at any change of distance from the antenna. If the ratio of the sides of the aperture is more than 5:1-10:1, the declining tendency of this dependence dominates and approaches to the similar dependence for linear thin wire antennas.

The influence of the sizes and shapes of horn antenna aperture was theoretically investigated by means of the Kirchhoff method; this method was applied for constant or zero value amplitude distribution at the aperture edges and at different quadratic phase field distributions in the spatial distribution of the near and intermediate zones. A physico-mathematical model was developed and describes the waves behavior in the case of horn antennas radiation in the near, intermediate and far observation zones; this model is suitable for aperture antennas for different aperture shapes, in particular, pyramidal horn, mirror, lens and their various modifications.

The developed physic-mathematical model, algorithms and computational programs allow us to solve the problem of constructive synthesis of the radiating system with a close to constant spatial distribution of the amplitude and power of the electromagnetic field in the near and intermediate zones.

Scientific novelty of the obtained results:

For the first time, applying vector potentials and Hertz potentials, Kirchhoff method was used for solving external vector problems of electrodynamics for aperture antennas radiation in the case of flat aperture with known amplitude, phase and polarization vectors parameters of electric and magnetic fields in the aperture in Cartesians. All components of electric and magnetic fields at finite distance in the near, intermediate and far observation zones were found. Also, for the first time, it is shown that for small electrical dimensions of the radiating antenna aperture, less than 1–1.5 wavelengths, a searchlight beam in its near zone is not formed by any shapes of aperture and by any amplitude and phase distributions of field sources on the aperture. In the case of linear antennas, the searchlight beam in the near zone is not formed at any electric antenna lengths. For the first time, it is also found that continuous aperture antennas with a square and circular apertures form a searchlight beam in the near zone when the sizes of the apertures sides are above than 1–1.5 wavelengths. A characteristic feature of the fields in the searchlight beam is their uniformly increasing oscillations with a period growing uniformly. The amplitude difference in the case of square apertures is much smaller than that of antennas with a circular aperture. Continuous aperture antennas with rectangular aperture form a searchlight beam in the near zone when smaller sides of the aperture are more than 1–1.5 wavelength. A fundamental feature of the field spatial distribution in the near zone of antennas with rectangular aperture is the disturbance of its regular nature. This allows us, by choosing the ratio of



the sides of the crossbar, to synthesize a field with a uniform distribution of its amplitude and power in certain volume of space or on a limited plane.

The novelty of the results obtained is confirmed by the absence of findings in previously known provisions and conclusions of other authors.

The practical significance of the results obtained is presented further:

– Developed computational model allows us to determine the sizes of measuring polygons, which provide high accuracy measurements of parameters and characteristics of antennas.

– Identified possibilities of synthesis of a homogeneous field in a limited volume and/or in a restricted transverse plane in the near zone of aperture antennas with rectangular aperture can be applied in practice in biophysical and medical devices and industrial technological processes by using near-field electromagnetic fields radiators.

The observed phenomena of oscillating nature dependence of the electromagnetic field amplitude on the distance in the searchlight beam of apertures of round and square shape allow to specify the size and shape of the working region in mobile radio systems (for example, in rail, road and sea transport).

**Keywords:** electromagnetic fields, external problem of electrodynamics, amplitude, phase, polarization, near, intermediate, far zones, aperture radiators, searchlight beam.