

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

ТРИВАЙЛО ОЛЕКСАНДР ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 538.3, 537.86

ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ ВИПРОМІНЮЮЧИХ СИСТЕМ,  
ЯКІ ЗБУДЖУЮТЬСЯ ХВИЛЕЮ СТРУМУ, ЩО БІЖИТЬ

01.04.03 – радіофізика

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
фізико-математичних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Горобець Микола Миколайович**,  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,  
завідувач кафедри прикладної електродинаміки.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Іванов Віктор Кузьмич**,  
Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова  
Національної академії наук України,  
завідувач відділу дистанційного зондування Землі;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Колчигін Микола Миколайович**,  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,  
завідувач кафедри теоретичної радіофізики.

Захист відбудеться “24” жовтня 2012 р. о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розісланий “6” вересня 2012 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дослідження хвильових процесів у ближній зоні випромінюючих систем має велике значення не тільки з наукового погляду, але й для розв'язання багатьох технічних і прикладних задач. Велике значення особливості електромагнітних полів у ближній зоні мають у багатьох технічних задачах, у яких використовуються електромагнітні хвилі мікрохвильового діапазону, наприклад, у НВЧ установках для потреб легкої (фарбування тканин), хімічної (полімеризація матеріалів), сільськогосподарської (сушка, дезінсекція зерна й деревини), фармакологічної (екологічно чиста технологія експрес-сушіння лікарської сировини) промисловості, медичного приладобудування (гіпертермія). У цих випадках матеріальні середовища, на які впливають електромагнітні хвилі, знаходяться у ближній зоні випромінюючих систем, тому ефекти ближньої зони мають бути враховані. Особливо це важливо, зокрема, в ході синтезу необхідного просторового розподілу мікрохвильової потужності.

Хвильові процеси у ближній зоні широкосмугових та надширокосмугових випромінювачів визначає зміна їх амплітудних, часових і спектральних характеристик у процесі випромінювання, поширення й дифракції на різних об'єктах. Зазначимо, що фізика й техніка надширокосмугових сигналів особливо інтенсивно розвивається останнім часом.

Знання характеристик випромінювання в ближній і проміжній зонах важливі для вирішення проблеми міжсистемної електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв різних частотних діапазонів та різного функціонального призначення. Самостійне значення має проблема аналізу характеристик електромагнітної сумісності близько розташованих антен. Останнім часом ці питання привертають увагу не тільки фахівців, але й широкої громадськості у зв'язку з повсюдним впровадженням мобільних телефонів і систем стільникового зв'язку, у яких необхідно знати напруженість електромагнітного поля безпосередньо поблизу антени. Дуже важливою є проблема захисту технічного персоналу, що обслуговує передавальні радіотехнічні системи, від впливів потужних електромагнітних полів. Для визначення припустимих норм опромінення необхідно знати не тільки щільність потоку потужності поля в дальній зоні, але і, як правило, на малих відстанях від антени.

Точний аналіз ближнього поля має велике значення під час розрахунку дзеркальних і лінзових антен з реальними випромінювачами, під час вивчення впливу на характеристики антен поверхонь, на яких вони розташовані, металевих або діелектричних елементів і тіл, що знаходяться поблизу антен.

Вивчення хвильових процесів у ближній і в проміжній зоні випромінювання різних технічних засобів особливо є важливим в області технічного захисту інформації. Через удосконалювання засобів перехоплення інформації, завдання захисту від витоків конфіденційної інформації особливо важливі для банківських систем, промислових і військових підприємств. Незважаючи на

велику кількість експериментальних даних, немає коректної математичної моделі побічних електромагнітних випромінювань як у ближній, так і в проміжній і дальній зонах випромінювання радіотехнічних засобів. Тому питання про створення коректної фізико-математичної моделі випромінювачів побічних електромагнітних випромінювань стоїть особливо гостро й вимагає подальшого вивчення.

У зв'язку з викладеним очевидна актуальність теми дисертаційного дослідження, направлено на розвиток теорії електромагнітних хвиль та коливань в ближній та проміжній зонах спостереження випромінюючих систем, які збуджуються біжучою хвилею струму.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційні дослідження пов'язані з плановими науково-дослідними роботами (НДР). Зокрема, ряд результатів роботи було отримано під час виконання таких НДР: "Дослідження амплітудних, фазових і поляризаційних характеристик електромагнітних полів у ближній зоні випромінюючих систем" (номер державної реєстрації 0106U003134, 2006 – 2008 рр.) і "Оптимізація просторового розподілу поля поблизу пристроїв, які випромінюють електромагнітні хвилі" (номер державної реєстрації 0109U000537, 2009 – 2011 рр.), в яких автор був виконавцем.

**Мета й завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії електромагнітних хвиль та коливань в ближній та проміжній зонах спостереження випромінювачів біжучої хвилі.

Для досягнення поставленої мети роботи необхідно вирішити такі завдання:

1. Розв'язати задачу випромінювання, тобто встановити залежності амплітуд і фаз всіх компонентів електромагнітного випромінювання криволінійного диполя Герца\*, лінійних, круглих і прямокутних рамкових антен довільних розмірів, які збуджуються біжучою хвилею струму, від відстані й кутових координат точки спостереження без обмежень на їхні величини.

2. Розрахунок і чисельний аналіз хвильових процесів у ближній зоні всіх досліджуваних випромінювачів (криволінійного диполя Герца, лінійних антен, круглих і прямокутних рамкових антен, які збуджуються біжучою хвилею струму, круглих антен з урахуванням кривизни провідника в дальній зоні випромінювання) у вільному просторі.

3. На основі аналізу просторового розподілу амплітудних і фазових характеристик всіх компонентів електромагнітного поля в ближній зоні криволінійного диполя Герца, а також лінійних і рамкових антен, які збуджуються біжучою хвилею струму, знайти границі дальньої зони для антен, довжина яких як більше, так і менше довжини хвилі.

---

\* Визначимо криволінійний диполь Герца як дротяний випромінювач, що є елементом дуги кола та одночасно відповідає таким трьом умовам: довжина провідника багато менше довжини хвилі; товщина провідника багато менше його довжини; на радіус кривизни провідника не накладаються ніяких обмежень.

4. Проаналізувати вплив кривизни провідника на його характеристики спрямованості на прикладі круглих рамкових антен і елементарних випромінювачів.

5. Визначити технічний засіб у складі персонального комп'ютера з найбільш високим рівнем побічних електромагнітних випромінювань.

*Об'єктом дослідження* є процеси випромінювання електромагнітного поля в ближній зоні антен.

*Предметом дослідження* є просторовий розподіл електромагнітного поля випромінювання лінійних і рамкових дрових антен, які збуджуються біжучою хвилею струму, в ближній зоні.

**Методи дослідження.** Метод векторних потенціалів, метод потенціалів Герца, методи перетворень сигналів у частотній і часовій областях, числові методи прикладної математики.

**Наукова новизна отриманих результатів.** 1. Вперше застосовано спосіб визначення меж ближньої і проміжної зони випромінювачів за основними ознаками електромагнітних полів у дальній зоні (залежність амплітуди електромагнітної хвилі від відстані до точки спостереження має характер сферичної хвилі; амплітуди подовжніх компонент електричного і магнітного полів не перевищують 1% амплітуди поперечних компонент в тій же точці; різниця фаз електричних і магнітних поперечних компонент не перевищує  $1^{\circ}$ ; хвильовий опір простору, визначений як відношення поперечних компонент електричного і магнітного полів, відрізняється від хвильового опору вільного простору не більше, ніж на 1%) під час аналізу дрових лінійних, круглих і прямокутних рамкових антен, які збуджуються біжучою хвилею струму.

2. Вперше виявлено, що протяжність відстані ближньої зони для криволінійного диполя Герца порівняно з відстанню ближньої зони для лінійного диполя Герца зменшилася на порядок, а відстань дальньої зони дорівнює – 0,4...0,6 довжини хвилі. У міру збільшення радіуса кривизни диполя різниця фаз поперечних компонентів електричного й магнітного поля наближається до значень для лінійного диполя Герца.

3. Вперше показано, що чим менша довжина антени, яка збуджується біжучою хвилею струму, тим більша протяжність області її ближнього реактивного поля, та чим ближча довжина антени до резонансної, тим менша протяжність області ближнього реактивного поля.

4. Вперше показано, що характер залежності різниці фаз поперечних компонентів електромагнітного поля круглих і прямокутних рамкових антен і диполя Герца якісно однаковий. Однак протяжність ближньої зони (“very near field”) менша, ніж у диполя Герца, майже на порядок, а протяжність проміжної зони прямокутної рамкової антени, що збуджується біжучою хвилею струму, збільшується.

**Практична значущість отриманих результатів.** Урахування впливу елементарного випромінювача на характеристики спрямованості криволінійних випромінювачів, які збуджуються біжучою хвилею струму, дозволяє підвищити точність розрахунків діаграми спрямованості і коефіцієнта спрямованої дії рамкових, а також циліндричних і плоских спіральних антен.

Результати визначення меж ближньої, проміжної й дальньої зон лінійних і криволінійних антен, які збуджуються біжучою хвилею струму, можуть бути використані при вимірах характеристик і параметрів антен різних типів, широко застосовуваних на практиці.

Отриманий теоретичний висновок про зменшення протяжності області ближніх реактивних полів випромінювачів, які збуджуються біжучою хвилею струму, може бути використаний при конструюванні реальних антенних систем на основі випромінювачів, які збуджуються біжучою хвилею струму, для цілей радіоастрономії, телекомунікацій й радіолокації.

Запропонована фізико-математична модель випромінювання комп'ютерних блоків, що становить собою лінійний чи криволінійний випромінювач, який збуджується біжучою хвилею струму, може бути використана для теоретичного й експериментального визначення меж безпечної зони, за межами якої може бути реалізований несанкціонований доступ до оброблюваної інформації.

**Особистий внесок здобувача.** У роботі [1] автором отримано розв'язок зовнішньої задачі електродинаміки випромінювання лінійної антени у часовому просторі у ближній та проміжній областях, створено комп'ютерні програми, проведено розрахунки.

У роботі [2] автором отримано розв'язок задачі випромінювання прямокутної рамкової антени біжучої хвилі у ближній та проміжній зонах спостереження.

В роботах [3, 7] автор брав участь у проведенні експерименту, створенні програмного забезпечення, проведенні розрахунків та аналізі одержаних результатів.

У роботі [4] автором проведено аналіз побічних електромагнітних випромінювань сучасних блоків комп'ютерної техніки.

В роботі [5] автором проведений аналіз небезпечних сигналів у часовій області, розроблено комп'ютерні програми та проведено розрахунки.

У роботі [6] автор брав участь у знаходженні виразів для діаграм спрямованості рамкових антен з урахуванням кривизни провідника, створенні програмного забезпечення, проведенні розрахунків, аналізі одержаних результатів.

У роботі [8] автором проведено аналіз методів розв'язку зовнішньої задачі електродинаміки випромінювання сучасних блоків комп'ютерної техніки.

В роботі [9] автором розв'язано зовнішню задачу електродинаміки про випромінювання рамкових антен у ближній та проміжній зонах, які збуджуються біжучою хвилею струму, створено комп'ютерну програму, проведено чисельне дослідження.

Наукові результати, які подані в дисертаційній роботі, одержано особисто автором або за його безпосередньої участі. У роботах [10 – 17] автор брав участь у розв'язанні задач, проведенні розрахунків і експериментальних досліджень, в аналізі одержаних результатів.

**Апробація роботи.** Наукові результати, які одержано в дисертаційній роботі, доповідались на наступних восьми міжнародних конференціях і семінарах: 7-th International Conference on Antenna Theory and Techniques (Львів,

2009 р.); 19-та Міжнародна Кримська конференція «СВЧ-техніка й телекомунікаційні технології» Кримико'2009 (Севастопіль, 2009 р.); IV-та Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій» (Севастопіль, 2008 р.); XII-та Міжнародна науково-практична конференція «Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах» (Державна служба спеціального зв'язку та захисту інформації України, Державний центр інформаційної безпеки) (Київ, 2009 р.); XII, XIII-й Міжнародний форум «Радіоелектроніка й молодь в XXI столітті» (Харків, 2008, 2009 рр.); IX-та Харківська конференція науковців «Радіофізика, електроніка, фотоніка та біофізика» (Харків, 2009 р.).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковано в 17 роботах: у дев'яти статтях у фахових наукових журналах, та у восьми доповідях на міжнародних конференціях. Всі опубліковані наукові праці відповідають темі дисертаційної роботи.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг складає 152 сторінок, з них 125 сторінок – основного тексту. Дисертація містить 49 рисунків і одну таблицю. Список використаних джерел нараховує 247 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** аргументується актуальність науково-практичного завдання досліджень, сформульовано мету роботи й шляхи її досягнення, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дано характеристику наукової новизни й практичного значення отриманих результатів.

У **першому розділі** наведено основні досягнення в області дослідження фізичних процесів і закономірностей поведіння електромагнітних хвиль у ближній зоні електромагнітних випромінюючих систем. Приділено увагу огляду фізичних закономірностей змін амплітудних і фазових характеристик електромагнітних полів поблизу випромінюючих систем з відомим амплітудним і фазовим розподілом джерел поля на антені, а також хвильовим процесам у ближній і проміжній зонах різних випромінювачів. У висновках до розділу сформульовано невирішені дотепер завдання й обґрунтовано вибір напрямків досліджень.

Під час дослідження властивостей електромагнітного поля звичайно використовують такий підхід: простір, що оточує антену, розділяють на дальню, проміжну й ближню зони. У теорії антен добре відомі формули, що дозволяють розраховувати поля в дальній і проміжній зонах (зонах Фраунгофера й Френеля). Також відомо, що для антен апертурного типу межа дальньої зони в області бічного випромінювання розташовується значно ближче до самої антени, ніж ця ж межа в області головної пелюстки випромінювання. Для антен вісьового випромінювання закономірності формування просторового розподілу полів у дальній зоні прямо протилежні. Але однозначно одержати чітку відповідь на запитання, як з відстанню

змінюються поля довільних випромінювачів, на сьогодні неможливо. Відомі лише загальні положення, що в проміжній зоні на монотонне спадання поля накладається осцилююче загасаюче коливання.

Спіральні антени, які збуджуються біжучою хвилею струму вздовж провідників антени, широко використовуються, теорія таких випромінювачів добре розроблена для дальньої зони спостереження, але для ближньої та проміжної зон дотепер розв'язання зовнішньої задачі електродинаміки немає. З іншого боку, подібні антени зручні для багатьох використань на практиці, оскільки дозволяють забезпечити більш-менш рівномірне як по амплітудах електричних і магнітних полів, так і по потоку потужності електромагнітного випромінювання поблизу антени, тобто в її ближній та проміжній зонах спостереження.

У процесі функціонування електронне обладнання може випромінювати радіосигнали, з яких зловмисники можуть одержати конфіденційні дані на деякій відстані. Незважаючи на велику кількість експериментальних досліджень, немає коректної математичної моделі побічних електромагнітних випромінювань як у ближній, так і в дальній зонах випромінювання радіотехнічних засобів.

Додатковому поштовху щодо розвитку методів аналізу ближнього поля в останнє десятиліття значною мірою сприяв як прогрес обчислювальної техніки, так і розвиток нових пакетів комп'ютерної математики.

Загальний висновок, що впливає з аналізу перерахованих й інших робіт, полягає в тому, що: головною причиною, що ускладнює дослідження хвильових процесів у ближній зоні випромінюючих систем, є відсутність точних фізико-математичних методів їхнього аналізу й нових теоретичних підходів. Крім того, чисельний аналіз хвильових процесів у ближній зоні випромінюючих систем неминуче пов'язаний з обчисленнями визначених інтегралів від швидко осцилюючих функцій, що є однією із проблем обчислювальної математики.

У зв'язку з викладеним вище було сформульовано мету й завдання дослідження.

**Другий розділ** присвячений дослідженню ефектів ближньої зони лінійних та криволінійних випромінювачів, збуджуваних біжучою хвилею струму. У розв'язанні задачі вперше враховано кривизну провідника зі струмом, що дозволяє забезпечити більшу точність розв'язання задачі та вивчити хвильові процеси в ближній зоні подібних випромінювачів.

Вирішено зовнішню задачу електродинаміки про випромінювання криволінійного диполя Герца, що становить собою елемент дуги кола, довжина якого набагато менша довжини хвилі. Розв'язання отримано, виходячи з вимог практики, в сферичній і декартовій системах координат. На відміну від класичного диполя Герца, випромінювання якого в ближній зоні має три компоненти електромагнітного поля, випромінювання криволінійного диполя в ближній зоні містить всі шість компонент векторів напруженості електричного й магнітного поля. З аналізу результатів розрахунків та порівняння

характеристик випромінювання диполя Герца й криволінійного диполя отримано такі висновки:

1. Поблизу криволінійного диполя залежність амплітуди поперечної компоненти поля від відстані  $E_{\theta}(R)$  більш гладка в порівнянні з випадком диполя Герца, тобто не  $1/R^3$ . Компонента магнітного поля  $H_{\phi}(R)$  також у міру наближення до диполя зростає набагато повільніше, ніж у випадку диполя Герца.

2. При  $R/\lambda \ll 1$  вплив кривизни диполя Герца на амплітуди компонентів полів  $E$  і  $H$  зневажливо малий:  $\Delta E_{\theta}(R) \ll 0,1$ , а  $\Delta H_{\phi} \approx 0$ .

3. Залежність  $E_{\theta}$  і  $H_{\phi}$  від відстані приймає характер такої ж, як у випадку сферичної хвилі, тобто пропорційна  $1/R$ , з відстаней  $R/\lambda > 0,2 - 0,25$  для  $H_{\phi}$  й  $R/\lambda > 0,9$  для  $E_{\theta}$ .

На рис. 1 наведено залежність від відстані різниці фаз поперечних компонентів електричного й магнітного полів криволінійного диполя й звичайного диполя Герца  $\arg E_{\theta} - \arg H_{\phi}$  у напрямку нормалі до диполя. З рис. 1 видно, що відстань ближньої зони, для якої характерно  $\arg E_{\theta} - \arg H_{\phi} \approx -90^{\circ}$ , у випадку криволінійного диполя Герца зменшилася на порядок. Якісно характер залежності різниці фаз поперечних компонентів електричного й магнітного полів криволінійного диполя й диполя Герца однаковий, проте, у випадку криволінійного диполя протяжність області ближнього реактивного поля менша на порядок, а відстань дальньої зони практично та ж  $-0,4 - 0,6\lambda$ . Також видно, що в міру збільшення радіуса кривизни диполя різниця фаз електричного й магнітного полів наближається до значення для лінійного диполя Герца.

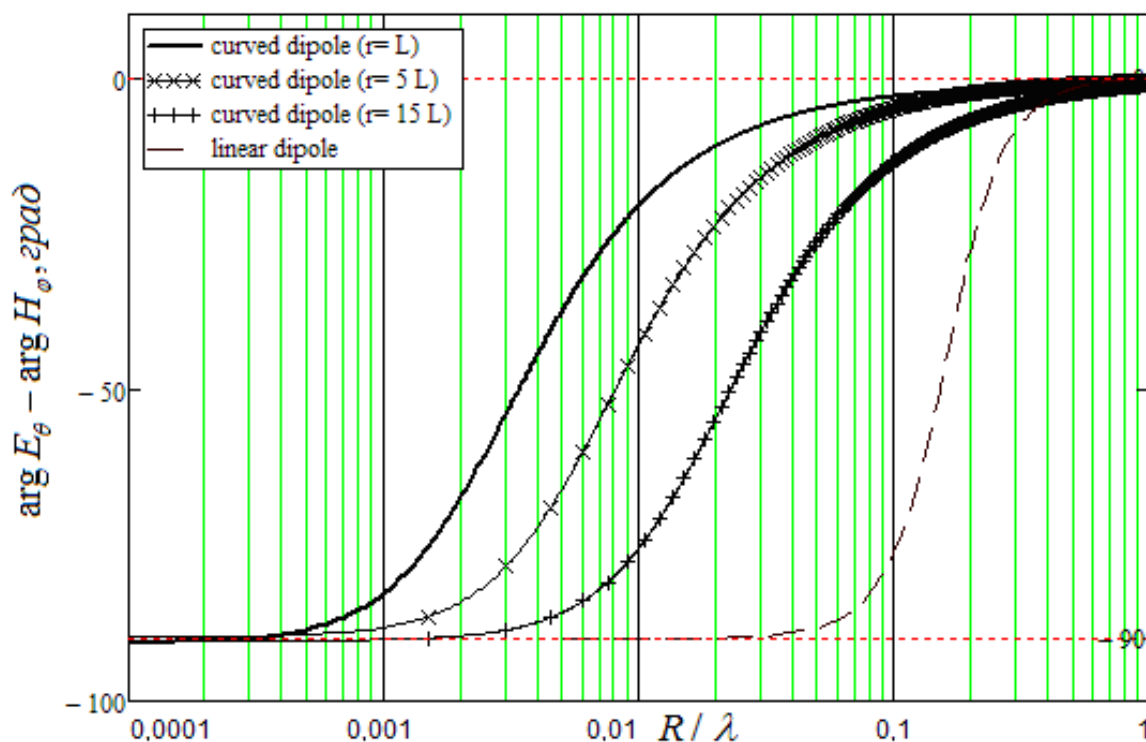


Рис. 1. Залежність різниці фаз поперечних компонентів електричного й магнітного полів від відстані до точки спостереження

Методом потенціалів Герца розв'язано зовнішню задачу електродинаміки знаходження всіх компонентів електромагнітного поля випромінювання лінійної антени, яка збуджується біжучою хвилею струму, у ближній і проміжній зонах спостереження в прямокутній системі координат.

У результаті чисельного аналізу просторового розподілу амплітуд і фаз всіх компонентів електромагнітного випромінювання електрично коротких лінійних дротових антен, збуджуваних біжучою хвилею струму, у ближній, проміжній і дальній зонах спостереження показано, що хвильові процеси випромінювання поблизу антен досить складні й характеризуються зміною різниці фаз поперечних компонентів електричного й магнітного полів від  $-90^\circ$  поблизу антени до нуля на відстані дальньої зони. Дане явище, як й у випадку диполя Герца, пояснюється різним характером зміни комплексних амплітуд поперечних компонент полів  $E_\theta$  і  $H_\phi$  в міру наближення до антени біжучої хвилі. З аналізу хвильових процесів у ближній зоні коротких дротових антен біжучої хвилі, і диполя Герца встановлено, що класичне розв'язання зовнішньої задачі електродинаміки про випромінювання диполя Герца для розрахунку залежностей компонент електромагнітного поля коротких дротових лінійних антен біжучої хвилі, справедливе при їх довжині, меншій або рівній 0,03 довжини хвилі. Відстань дальньої зони для таких антен, визначена з похибкою не гірше 5% по амплітудних характеристиках полів, дорівнює половині довжини хвилі. Показано, що чим більша електрична довжина дротової антени, тим менша протяжність області її ближніх реактивних полів.

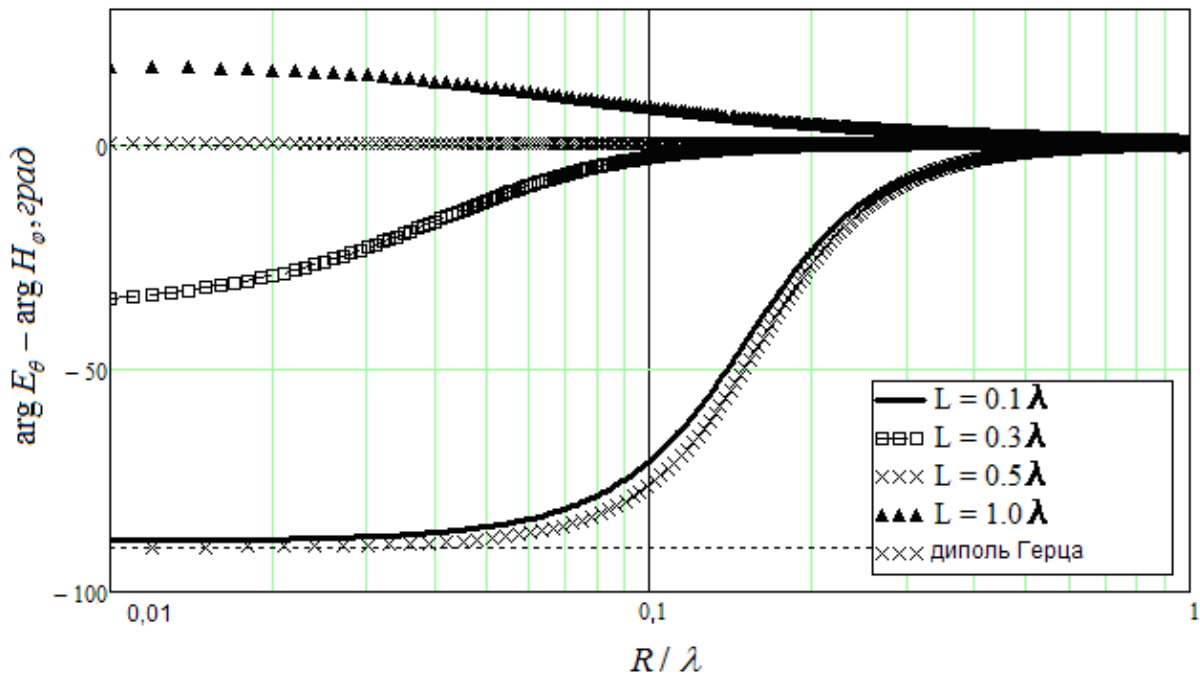


Рис. 2. Залежність різниці фаз поперечних складових електричних і магнітних полів від відстані

Відстань дальньої зони для таких антен з достатньою для практики точністю дорівнює половині довжини хвилі. Також показано, що чим менше електрична довжина лінійного випромінювача, що збуджується біжучою хвилею струму, тим більше протяжність області його ближніх реактивних полів (рис. 2).

**Третій** розділ присвячений теоретичному аналізу хвильових процесів у ближній та проміжній зонах спостереження рамкових випромінювачів, які збуджуються біжучою хвилею струму. Задача розрахунку всіх компонентів векторів напруженості електричного та магнітного полів розв'язана для двох найбільш важливих для практики випадків – у сферичній і декартовій системах координат.

Проаналізовано вплив кривизни випромінювача з відносними розмірами, більшими довжини хвилі, на його діаграму спрямованості залежно від електричних розмірів антени. На прикладі круглих рамкових антен показано, що вплив орієнтації елементарних випромінювачів на характеристики спрямованості суттєво залежить від електричних розмірів рамкової антени. Кривизна провідника більше впливає на діаграму спрямованості по компоненті поля  $E_\phi$ , ніж по  $E_\theta$ . У випадку резонансної рамкової антени діаграма спрямованості по компоненті електричного поля  $E_\phi$ , отримана з урахуванням орієнтації елементарних випромінювачів, значно ширша діаграми спрямованості без урахування впливу кривизни провідника, а діаграми спрямованості по компоненті поля  $E_\theta$  збігаються. Зі збільшенням відносних розмірів рамки ці відмінності зменшуються. При порівнянні діаграми спрямованості, знайденої з урахуванням впливу кривизни провідника, з діаграмою спрямованості, отриманою за допомогою вектора Герца без

врахування впливу спрямованості елементарних випромінювачів, виявлено розбіжності не тільки по ширині, але й по формі діаграми.

Вирішено зовнішню задачу електродинаміки та досліджено хвильові процеси випромінювання круглих і прямокутних рамкових антен, що збуджуються змінним струмом біжучої хвилі, у ближній, проміжній і дальній зонах випромінювання в сферичній і декартовій системах координат без обмеження на розміри випромінювача. Показано, що фізико-математичні моделі випромінювачів біжучої хвилі, більш складні та громіздкі порівняно з фізико-математичними моделями лінійних та апертурних антен, а також антенних решіток. Розрахункові формули для всіх шести ортогональних компонент електромагнітного поля як в сферичній, так і в декартовій системах координат однаково складні, тому зворотню задачу синтезу випромінюючої системи по заданому розподілу поля в заданій робочій зоні в об'ємі чи на площині в ближній зоні розв'язати неможливо. Розроблено алгоритм й комп'ютерні програми для розрахунку просторового розподілу амплітуд і фаз електромагнітного поля круглих і прямокутних рамкових антен біжучої хвилі, у сферичній і декартовій системах координат на довільній відстані від випромінювача. В результаті чисельного аналізу показано, що якісно характер залежності різниці фаз поперечних компонентів електричного й магнітного полів від відстані до точки спостереження у випадку рамкових антен, збуджуваних змінним струмом біжучої хвилі, і диполя Герца однаковий: поблизу антени різниця фаз електричного й магнітного полів відрізняються на  $90^\circ$ , а на більших відстанях, що відповідають відстані дальньої зони, поля синфазні. Однак, у порівнянні з диполем Герца мають місце такі якісні відмінності: протяжність ближньої зони менша, ніж у диполя Герца (за критерієм різниці фаз – майже на порядок); протяжність проміжної зони рамкових антен, збуджуваних струмом біжучої хвилі, у порівнянні з диполем Герца суттєво збільшилась.

У **четвертому** розділі наведено розв'язання зовнішньої задачі електродинаміки – задачі випромінювання електромагнітних хвиль лінійних антен біжучої хвилі, у просторово - часовій області в ближній, проміжній і дальній зонах спостереження. Поставлено та розв'язано шляхом прямого експерименту задачу знаходження побічних електромагнітних випромінювань в ближній зоні блоків та елементів сучасної комп'ютерної техніки.

На рис. 3 наведено отримані експериментально рівні побічних електромагнітних випромінювань (ПЕМВ) відеотрактів CRT моніторів Samtron 56E і LG Flatron T710BH.

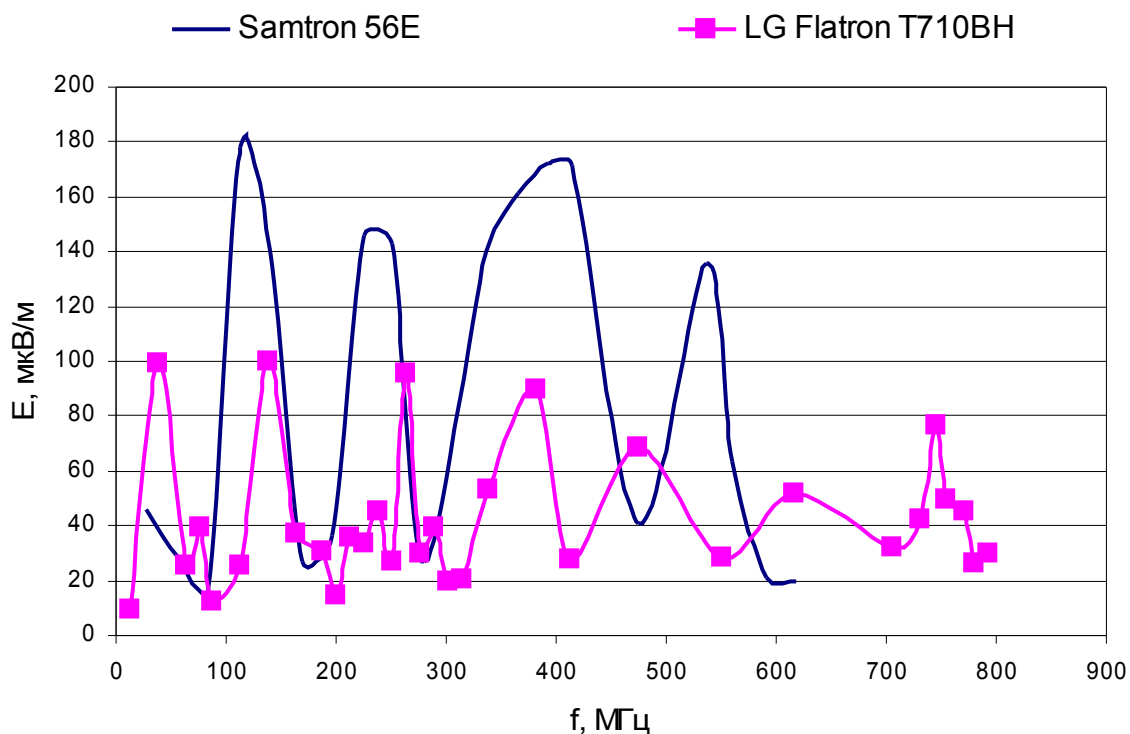


Рис. 3. ПЕМВ відеотрактів моніторів Samtron 56E і LG Flatron T710BH у діапазоні частот від 10 до 800 МГц

У ході експериментів було досліджено ПЕМВ трактів таких клавіатур: Mitsumi KFK-EA4SA, A4Tech KB 720, Codegen KB 2207, Genius K645, Sven Slim 303, A4Tech KL 820, Mitsumi FQ 120 Classic (рис. 4).

Експериментально досліджено ПЕМВ твердих дисків HDD (рис. 5) і FDD (рис. 6).

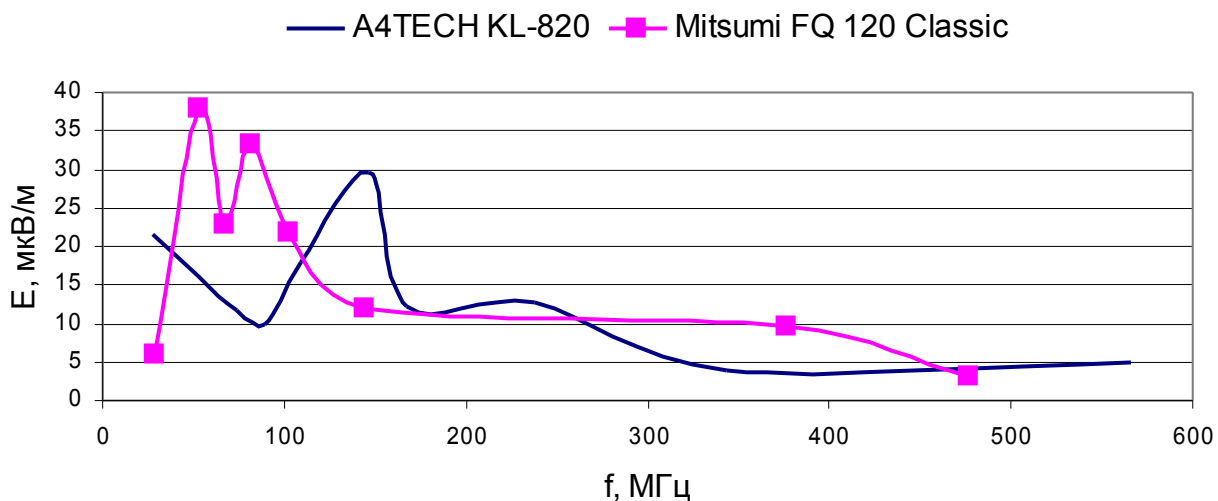


Рис. 4. ПЕМВ трактів клавіатур у діапазоні частот від 10 до 600 МГц

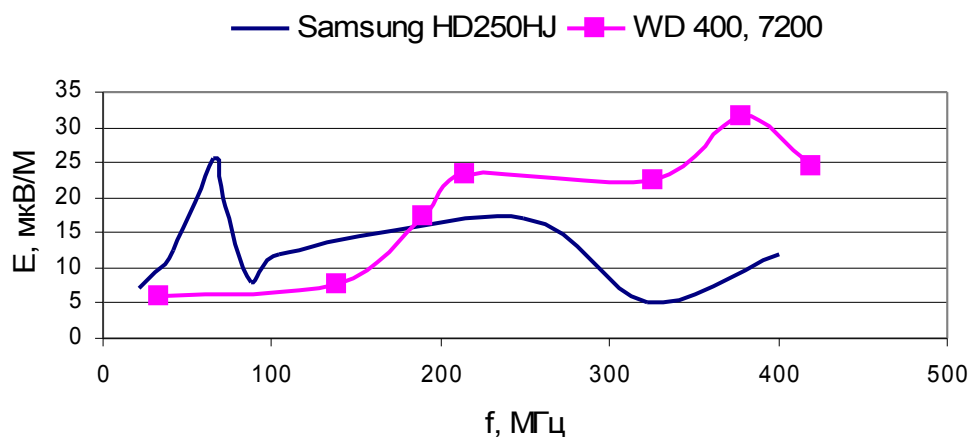


Рис. 5. ПЕМВ твердих дисків

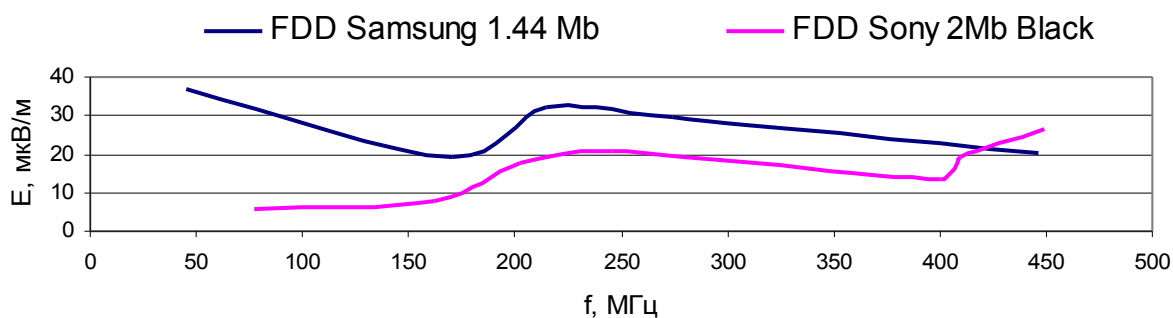


Рис. 6. ПЕМВ накопичувачів на магнітних дисках

На рис. 7, 8 наведено обмірювані рівні ПЕМВ трактів принтерів Hewlett Packard, флеш-носіїв і оптичного приводу.

Максимальний рівень побічних електромагнітних випромінювань блоків і елементів комп'ютерів забезпечує відеотракт монітора Samtron 56E (до 180 мкВ/м) і монітора LG Flatron T710RH (до 100 мкВ/м). Максимальні рівні випромінювання тракту клавіатури на тій же відстані становлять 40 – 70 мкВ/м. Випромінювання інших технічних засобів персонального комп'ютера не перевищує 40 мкВ/м на відстані 1 – 1,5 м.

Показано, що найбільшу інтенсивність побічних випромінювань і отже, можливість несанкціонованого доступу до інформації, що обробляється в комп'ютері, має відеотракт монітора, який є відрізком коаксіального кабелю з частково прозорим зовнішнім екраном. Зручним та наочним методом теоретичного розв'язання задачі знаходження побічних електромагнітних випромінювань є метод еволюційних рівнянь О.А. Третьякова й метод векторних нестационарних потенціалів, де розв'язок відшукується в часовій області.

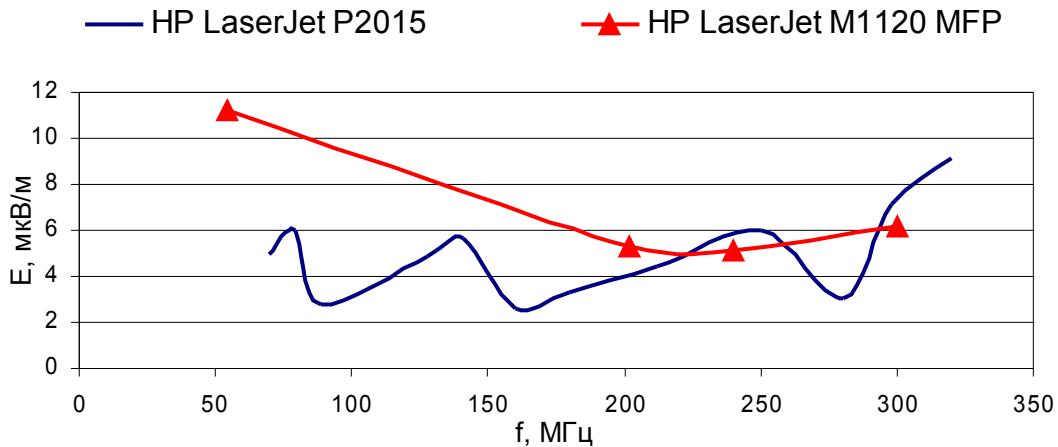


Рис. 7. Залежність ПЕМВ трактів принтерів Hewlett Packard від частоти

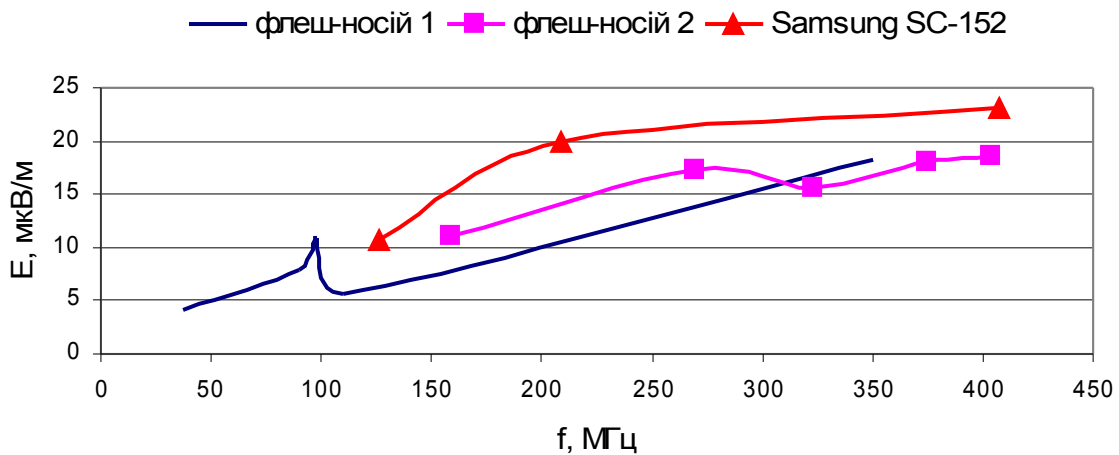


Рис. 8. Залежність ПЕМВ трактів флеш-носіїв і оптичного приводу від частоти

Фізико-математичною моделлю цього джерела випромінювань, придатною для опису полів на кінцевих досить малих відстанях від нього та для розрахунку ефектів ближньої зони в подібних випромінюючих системах, може служити класична антена біжучої. Отримано аналітичні вирази для компонентів електромагнітного поля випромінювання лінійною антеною, збуджуваною відео-імпульсом струму, на довільних відстанях від випромінювача до точки спостереження.

Розроблені алгоритми і програми та результати розрахунків можуть бути використані для визначення меж безпечної зони технічного захисту інформації. При цьому важливо, що розглядаючи поведінку поля в конкретній точці як поле в дальній зоні, яке звичайно використовується в нормативних інструкціях в області технічного захисту інформації, можна одержати як завищені, так і занижені значення радіуса  $R_{zp}$ . Таким чином, при розрахунках радіуса граничної зони  $R_{zp}$  необхідно використовувати одержані точні аналітичні вирази для компонентів електромагнітного поля в ближній зоні антени, збуджуваної біжучою хвилею.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено наукову задачу розвитку теорії електромагнітних хвиль та коливань у ближній і проміжній зонах випромінювачів, які збуджуються хвилею змінного струму. При цьому отримано такі результати:

1. Розв'язано нову фундаментальну задачу радіофізики визначення випромінення криволінійного диполя Герца, який є елементом дуги кола довільного радіуса, в ближній, проміжній та дальній зонах спостереження. На основі цього розв'язання та принципу суперпозиції одержано нове розв'язання задачі про випромінення малих порівняно з довжиною хвилі кільцевих рамкових випромінювачів у ближній і проміжній зонах спостереження.

Розроблено алгоритми і авторські програми розрахунку характеристик електромагнітних полів поблизу таких антен. Показано, що навіть у найпростішому випадку криволінійного диполя Герца поля в ближній зоні мають складну структуру і аналітично описуються шістьма компонентами векторів напруженості електричного та магнітного полів, на відміну від класичного (лінійного) диполя Герца, який в ближній та проміжній зонах повністю описується трьома компонентами полів.

2. На основі чисельного аналізу просторового розподілу поля криволінійного диполя Герца та елементарного рамкового випромінювача показано, що протяжність області ближніх реактивних полів таких випромінювачів менша порівняно з цією зоною для магнітного диполя Герца. При цьому зона ближнього реактивного поля тим менша, чим більші електричні розміри випромінювачів.

3. З урахуванням розв'язання задачі про випромінення криволінійного диполя Герца в сферичній і декартовій системах координат розв'язано задачу про випромінення рамкових антен довільних, зокрема резонансних розмірів. Показано, що фізико-математична модель такого випромінювача значно складніша і більш громіздка порівняно з лінійними випромінювачами резонансних розмірів у ближній, проміжній і дальній зонах спостереження.

На основі розроблених фізико-математичних моделей, алгоритмів та розрахункових комп'ютерних програм чисельно вивчені поля поблизу рамкових антен круглої та квадратної форми. Показано, що протяжність зони ближніх реактивних полів подібних випромінювачів менша, як і елементарних рамкових антен, порівняно з лінійними резонансними дотовими антенами.

4. Методом векторних потенціалів розв'язано зовнішню задачу електродинаміки про випромінення лінійної та криволінійної антени довільної довжини, яка збуджується біжучою хвилею змінного струму, в ближній і проміжній зонах спостереження. Розроблена фізико-математична модель таких випромінювачів складна і допускає тільки чисельний аналіз характеристик та поведінки електромагнітних полів, зокрема в ближній зоні.

Проведено чисельний аналіз хвильових процесів випромінювання електромагнітних полів у ближній та проміжній зонах лінійних та криволінійних антен біжучої хвилі. Показано, що за критерієм заданої різниці фаз поперечних компонент у напрямку головної пелюстки діаграми спрямованості відстань дальньої зони антен біжучої хвилі менша, ніж антен з поперечним випромінюванням.

5. Експериментально досліджено побічні електромагнітні випромінювання блоків та елементів комп'ютерів у широкому діапазоні частот. Показано, що максимальний рівень побічного випромінювання і, отже, максимальний ризик несанкціонованого доступу до конфіденційної інформації, пов'язаний передусім з випромінюванням відеотракту монітора. Фізико-математичною моделлю такого випромінювання є лінійна чи криволінійна антена біжучої хвилі.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Горобец Н.Н. Волновые процессы в ближней, промежуточной и дальней зонах побочных электромагнитных излучений однопроводной кабельной линии / Н.Н. Горобец, А.В. Тривайло // Радиотехника. – 2009. – № 158. – С. 144 – 151.
2. Gorobets N.N. Fields of a rectangular loop antenna in the near -field zone / Gorobets N.N, Trivaylo A.V. // Telecommunication and radio engineering – 2010. – Vol. 69, issue 11. – P. 947 – 957.
3. Горобец Н.Н. Исследование побочных электромагнитных излучений компьютерных блоков в диапазоне 15 – 500 МГц. / Н.Н. Горобец, А.В. Тривайло // Вісн. Харків. нац. унів-ту ім. В.Н. Каразіна № 942, Серія «Радіофізика та електроніка» – 2010. – Вип. 17. – С. 55 – 61.
4. Gorobets N.N. Compromising emanation: overview and system analysis / Gorobets N.N, Trivaylo A.V. // Вісн. Харків. нац. унів-ту ім. В.Н. Каразіна № 883, Серія «Радіофізика та електроніка». – 2009. – Вип. 15. – С. 83 – 88.
5. Горобец Н.Н. Анализ опасных сигналов в частотно-временной области / Н.Н. Горобец, А.В. Тривайло // Радиотехника. – 2009. – № 159. – С. 315 – 326.
6. Тривайло А. В. Диаграммы направленности кольцевых проволочных антенн с учетом кривизны проводника // Прикладная радиоэлектроника. – 2008. – Т. 7, № 3. – С. 294 – 297.
7. Горобец Н. Н. Экспериментальное исследование побочных электромагнитных излучений компьютерных блоков в частотной области / Н. Н. Горобец, А. В. Тривайло // Изв. Вузов. Радиоэлектроника. – 2011. – Т. 54, № 10. – С. 58 – 64.
8. Горобец Н.Н. Методы решения внешней задачи электродинамики о нахождении побочных электромагнитных излучений / Н.Н. Горобец, А.В. Тривайло // Прикладная радиоэлектроника. – 2009. – Т. 8, № 3. – С. 366 – 371.

9. Горобец Н.Н. Волновые процессы в ближней зоне кольцевых проволочных антенн, возбуждаемых током бегущей волны / Н.Н. Горобец, А.В. Тривайло // Прикладная радиоэлектроника. – 2008. – Т. 7, № 3. – С. 275 – 281.
10. Тривайло А. В. Эволюционные уравнения для нахождения побочных электромагнитных излучений / А.В. Тривайло, С.Ю. Ясиновский // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 12-й международный молодежный форум, 1 – 3 апреля 2008 г.: тезисы докл. – Харьков, 2008. – С. 40.
11. Тривайло А. В. Диаграммы направленности кольцевых проволочных антенн с учетом кривизны проводника // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2008»: 4-я междунар. науч.-техн. конф., 21 – 25 апреля 2008 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2008. – С. 169.
12. Горобец М.М. Методы решения внешней задачи электродинамики о нахождении побочных электромагнитных излучений / М.М. Горобец, І.Д. Горбенко, О.В. Тривайло // Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах: XII Міжнародна науково-практична конференція, 19 – 22 травня 2009 р.: тези допов. – Київ, 2009 р. – С 86 – 87.
13. Тривайло А.В. Волновые процессы канала утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 13-й международный молодежный форум, 30 марта – 1 апреля 2009 г.: тезисы докл. – Харьков, 2008. – С. 66.
14. Горобец Н.Н. Учет влияния кривизны проводника на его характеристики излучения в дальней и ближней зоне / Н.Н. Горобец, А.В. Тривайло // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2009): 19-я Международная Крымская конференция, 14–18 августа 2009г.: тезисы докл. – Севастополь, 2009. – С. 466-467.
15. Тривайло А.В. Волновые процессы в ближней зоне рамочной антенны прямоугольной формы // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 13-й международный молодежный форум, 30 марта – 1 апреля 2009 г.: тезисы докл. – Харьков, 2008. – С. 55.
16. Gorobets N.N. Curved Dipole in the Near-Field and Far-Fiel Zones of Observation / Gorobets N.N, Trivaylo A.V. // ICAT, 7-th International Conference on Antenna Theory and Techniques, 6-9 October 2009: conf. proc. – Lviv, 2009. – P. 102-104.
17. Gorobets N.N. Compromising emanations in time domain / Gorobets N.N, Trivaylo A.V. // Радіофізика, Електроніка, Фотоніка та Біофізика: ІХ Харківська конференція науковців, 1-3 грудня 2009р.: тези допов. – Харків, 2009. – С. 112.

## АНОТАЦІЯ

Тривайло О.В. Хвильові процеси у ближній зоні випромінюючих систем, які збуджуються хвилею струму, що біжить. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2011.

У дисертаційній роботі розв'язано наукову задачу розвитку теорії електромагнітних хвиль та коливань у ближній і проміжній зонах випромінювачів, які збуджуються хвилею змінного струму. При цьому отримані наступні результати:

Розв'язано нову фундаментальну задачу радіофізики визначення випромінення криволінійного диполя Герца, який є елементом дуги кола довільного радіуса, в ближній, проміжній та дальній зонах спостереження. З порівняльного аналізу хвильових процесів випромінювання криволінійного елементарного випромінювача й диполя Герца показано, що кривизна провідника суттєво впливає на амплітудні й фазові характеристики випромінювання в ближній і проміжній та дальній зонах.

З урахуванням вирішення задачі про випромінення криволінійного диполя Герца в сферичній і декартовій системах координат розв'язано задачу про випромінення рамкових антен біжучої хвилі довільних, зокрема резонансних розмірів. Відстань дальньої зони для таких антен, визначена з похибкою не гірше 5% по амплітудних характеристиках полів, дорівнює половині довжини хвилі. Показано, що чим більша електрична довжина дротової антени, тим менша довжина області її ближніх реактивних полів.

Методом векторних потенціалів розв'язано зовнішню задачу електродинаміки про випромінення лінійної та криволінійної антени довільної довжини, яка збуджується біжучою хвилею змінного струму, в ближній і проміжній зонах спостереження. Проведено чисельний аналіз хвильових процесів випромінювання електромагнітних полів в ближній та проміжній зонах лінійних та криволінійних антен біжучої хвилі.

Експериментально досліджено побічні електромагнітні випромінення блоків та сучасних елементів комп'ютерів у широкому діапазоні частот. Показано, що максимальний рівень побічного випромінювання і, отже, максимальний ризик несанкціонованого доступу до конфіденційної інформації, пов'язаний передусім з випромінюванням відеотракту монітора. Фізико-математичною моделлю такого випромінювання є лінійна чи криволінійна антена біжучої хвилі.

**Ключові слова:** електромагнітне випромінювання, електромагнітні хвилі, рамкові антенні, диполь, ближня, проміжна та дальня зона, характеристики випромінювання, побічні електромагнітні випромінювання.

## АННОТАЦИЯ

Тривайло А.В. Волновые процессы в ближней зоне излучающих систем, возбуждаемых током бегущей волны. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика. - Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, 2011.

В диссертационной работе решена научная задача развития теории электромагнитных волн и колебаний в ближней и промежуточной зонах излучателей, возбуждаемых волной переменного тока. При этом получены следующие результаты:

Решена внешняя задача электродинамики об излучении криволинейного диполя Герца, который представляет собой элемент дуги окружности, длина которого намного меньше длины волны. Из сравнительно анализа волновых процессов излучения криволинейного элементарного излучателя и диполя Герца показано, что кривизна проводника значительно влияет на амплитудные и фазовые характеристики излучения в ближней и промежуточной зоне. Качественно характер зависимости разности фаз поперечных компонент электрического и магнитного поля криволинейного диполя и диполя Герца одинаковый, однако, в случае криволинейного диполя протяженность области ближнего реактивного поля меньше на порядок, а расстояние дальней зоны практически то же – 0,4 – 0,6 длины волны.

Решена фундаментальная внешняя задача электродинамики о нахождении полей в ближней и промежуточной зонах наблюдения линейных и рамочных излучателей, возбуждаемых бегущей волной тока. В качестве границ зон излучения рамочных антенн предложено использовать комплекс критериев, в частности, зависимость разности фаз поперечных компонент электрического и магнитного полей от расстояния до точки наблюдения, наличия (отсутствия) продольной компоненты электрического или магнитного полей, отличия волнового сопротивления от его значения для свободного пространства и характер убывания амплитуды поля по мере увеличения расстояния. В результате численного анализа пространственного распределения амплитуд и фаз всех компонент электромагнитного излучения электрически коротких линейных проволочных антенн, возбуждаемых током бегущей волны, в ближней, промежуточной и дальней зонах наблюдения показано, что волновые процессы излучения вблизи антенн довольно сложны и характеризуются изменением разности фаз поперечных компонент электрического и магнитного полей от  $-90^{\circ}$  вблизи антенны до нуля на расстоянии дальней зоны. Из анализа волновых процессов в ближней зоне коротких проволочных антенн бегущей волны и диполя Герца установлено, что при расчетах электромагнитных полей коротких линейных антенн бегущей волны модель диполя Герца является хорошей аппроксимацией для антенн с относительными размерами до 0,03

длины волны. Показано, что чем больше электрическая длина проволочной антенны, тем меньше протяженность области ее ближних реактивных полей. Расстояние дальней зоны для таких антенн, определенное с погрешностью не хуже 5% по амплитудным характеристикам полей, составляет половину длины волны. Показано, что чем больше электрическая длина проволочной антенны, тем меньше протяженность области ее ближних реактивных полей.

Решена внешняя задача электродинамики и изучены волновые процессы излучения круглых и прямоугольных рамочных антенн, возбуждаемых током бегущей волны, в ближней и промежуточной зонах излучения в сферической и декартовой системах координат без ограничения на размеры излучателя. Проанализировано влияние кривизны проводника с относительными размерами большими, чем длина волны, на его диаграмму направленности в зависимости от электрических размеров излучателя. В результате компьютерных расчетов показано, что качественно характер зависимости разность фаз поперечных компонент электрического и магнитного полей от расстояния до точки наблюдения в случае рамочных антенн, возбуждаемых током бегущей волны, и диполя Герца одинаковый: вблизи антенны разность фаз электрического и магнитного полей отличаются на  $90^0$ , а на больших расстояниях, что соответствуют расстоянию дальней зоны, поля синфазные.

Поставлена и решена путем прямого эксперимента задача о нахождении побочных электромагнитных излучений в ближней зоне блоков и элементов современной компьютерной техники. Показано, что наибольшую интенсивность побочных электромагнитных излучений и, следовательно, возможность несанкционированного доступа имеет видеотракт монитора, который представляет собой отрезок коаксиального кабеля с частично прозрачным внешним экраном. Физико-математической моделью этого источника излучений, пригодного для описания полей на конечных достаточно малых расстояний от него, для расчета эффектов ближней зоны в подобных излучающих системах может служить классическая антенна бегущей волны. Получены аналитические выражения для компонент электромагнитного поля излучения линейной антенны, возбуждаемой током бегущей волны на произвольных расстояниях от излучателя до точки наблюдения.

**Ключевые слова:** электромагнитное излучение, электромагнитные волны, рамочные антенны, диполь, ближняя, промежуточная и дальняя зона, характеристики излучения, побочные электромагнитные излучения.

## ABSTRACT

Trivaylo O.V. Wave processes in the near field zone of traveling wave systems. – The manuscript.

Thesis for a candidate science degree in physics and mathematics by specialty 01.04.03 – radiophysics. – V.N. Karazin Kharkov National University, Kharkiv, 2011.

In the dissertation the scientific problem of the development the theory of electromagnetic waves and vibrations in the near and intermediate zones of radiators excited by a wave of alternating current is solved. The following results was obtained:

The problem of radiation of small in comparison with the wavelength loop radiators in near and intermediate zones of observation has been solved taking into account the curve of current conductor. The analysis of wave processes of radiation in near and intermediate regions of observation of linear, curved dipole Hertz and loop (circular and rectangle) radiator, excited by progressive wave of the current has been carried out. Analytical expressions for calculation of all electric and magnetic field vectors components are obtained in the spherical and Cartesian coordinate systems. Thus, designed physical-mathematical models of radiators progressing wave more complex in comparison with well-known ones.

The outer problem of electrodynamics in space-time region in near, intermediate and far zones of observation for linear radiator has been solved. Electromagnetic radiations of various computer units in the frequency range from 15 to 500 MHz are measured. It has been shown that maximum radiation are provided by video display units and for correct estimations of radio-electronic intelligence range expediently as a mathematical model of side electromagnetic radiations radiator to use feebly radiating cable line as the leaky wave antenna.

Methods of research are theoretical investigations, computer analysis.

**Key words:** electromagnetic emission, electromagnetic waves, loop, dipole, near, intermediate and far region of antenna, radiation characteristics, compromising emanation.

Підп. до друку 12.07.12. Формат 60x841.16. Спосіб друку – ризографія.  
Умов. друк. арк. 1,2. Тираж 100 прим.  
Зам. № \_\_\_\_\_. Ціна договірна.

---

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

---

Віддруковано в навчально-науковому  
Видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ  
Харків, просп. Леніна, 14