

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛИЖНЬОГО ПОЛЯ РАМКОВИХ АНТЕН

Розглядаються аналітичний та експериментальний методи дослідження просторових характеристик ближнього поля рамкових антен, які можуть використовуватися при синтезі систем, в структурі яких застосовуються рамкові антени, проведенні наукових досліджень та в навчальному процесі при підготовці фахівців у сфері технічного захисту інформації.

**Ключові слова:** рамкові антени, ближнє поле, пасивний електричний коливальний контур, інформативний параметр.

### Вступ

Рамкові антени є широко поширеним засобом створення і приймання електромагнітних хвиль. Перші згадки про магнітні рамкові антени можна зустріти в роботах 1888 року відомого вченого Генріха Герца, де він доводив той факт, що електрично мала рамка (периметр рамки набагато менший за довжину хвилі) має діаграму спрямованості у формі цифри «вісім». З тих пір рамкові антени не тільки не втратили своєї актуальності, а й продовжують розширювати сферу застосування, стаючи невід'ємною частиною нових радіотехнічних пристроїв.

Дослідження енергетичних, фазових та поляризаційних характеристик електромагнітних полів поблизу випромінюючих систем мають велике значення не тільки з наукової точки зору, але й для вирішення багатьох технічних задач. Актуальним є завдання розрахункового прогнозування та інструментального контролю рівнів електромагнітних полів поблизу антен для цілей забезпечення електромагнітної безпеки. Важливе значення має проблема аналізу характеристик електромагнітної сумісності близько розташованих антен, зокрема, розрахунок захисних екранів, інші теоретичні і практичні завдання.

Ближні поля електромагнітних випромінювачів мають складну просторову структуру [1], тому теоретичний аналіз хвильових процесів поблизу подібних випромінювачів можливий тільки шляхом комп'ютерного моделювання випромінювачів із заданими розмірами при заданій довжині хвилі.

Широке застосування у сфері технічного захисту інформації рамкових провідних антен обумовлює необхідність розробки нових підходів і методик для експериментального дослідження їх просторових характеристик.

Аналітичний розрахунок просторових значень вектора електромагнітної індукції рамкової антени.

Магнітне поле струму індуктивного джерела може бути обчислено як векторна сума (суперпозиція) полів, що створюються окремими елементарними ділянками струмів (закон Біо-Савара-Лапласа) [2]:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3},$$

де  $d\vec{l}$  – вектор елемента провідника довжиною  $dl$ , проведений у напрямку протікання струму (Рис.1);

$\vec{r}$  – радіус-вектор, проведений з цього елемента провідника в задану точку простору;

$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \left(\frac{Гн}{м}\right)$  – магнітна постійна.

Враховуючи, що розміри джерела поля значно менше довжини хвиль (система квазістаціонарна), фазовим запізненням можна знехтувати.

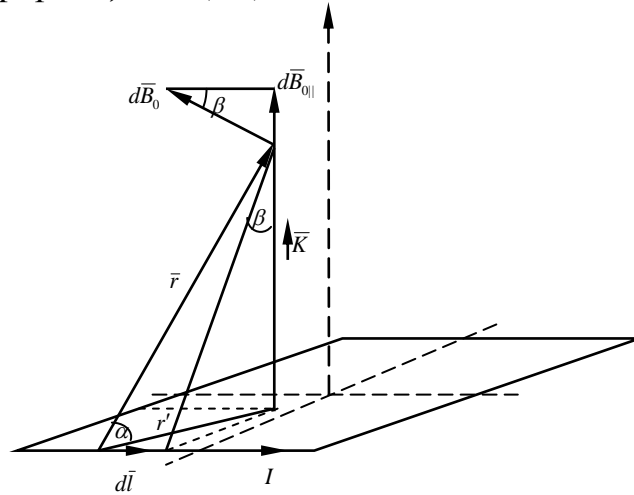


Рис. 1. Розрахункова схема ближнього поля рамкової антени

Модуль вектора магнітної індукції (рис.1)

$$\bar{B}_0 = \frac{\mu_0 I_1 W_1}{4\pi} \oint_l \frac{\sin \alpha \sin \beta}{r^2} dl$$

де  $I_1$  - величина струму в рамці;  $W_1$  - число витків рамки;  
 $\alpha$  - кут між векторами  $d\bar{l}$  і  $\bar{r}$ ;  $\beta$  - кут між векторами  $d\bar{B}_0$  і  $d\bar{B}_{0||}$ .

Нами визначено просторовий розподіл значень вектора магнітної індукції рамкової антени розміром 0,7x0,6 м (рис. 2).

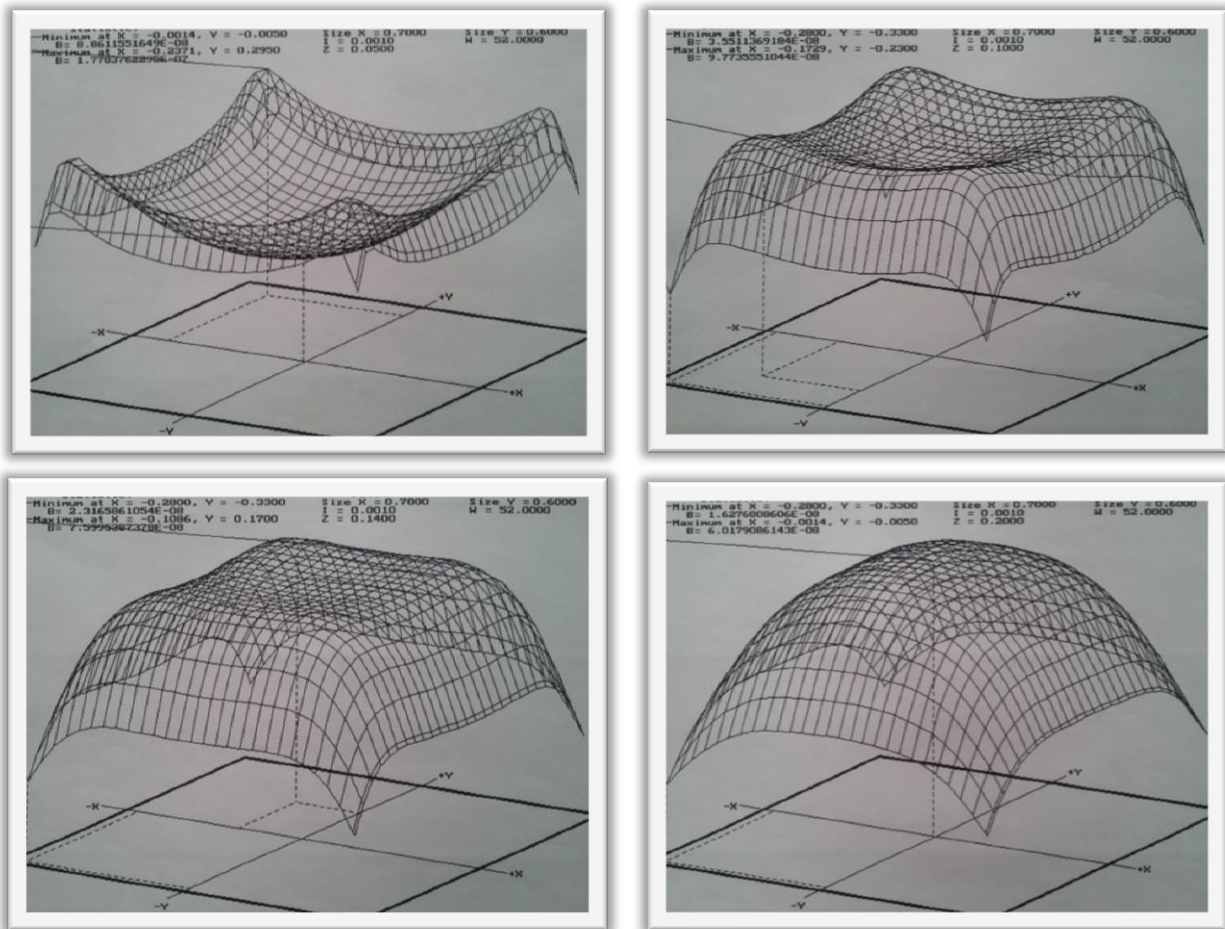


Рис. 2. Фрагменти просторового розподілу вектора магнітної індукції рамкової антени

Експериментальне дослідження просторових характеристик рамкових антен.

Експериментально просторові характеристики ближнього поля рамкової антени пропонується визначати шляхом внесення в задані точки простору пасивних електричних коливальних контурів (ПЕК), налаштованих на частоту поля. Методика досліджень пояснюється схемою взаємодії контура джерела поля і ПЕК (рис.3).

Система індуктивно зв'язаних активного і пасивного електричних коливальних контурів описується системою рівнянь [3]:

$$\begin{cases} e = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt, \\ 0 = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt, \end{cases} \quad (1)$$

де  $e$  – змінна напруга, прикладена до контура джерела поля  $L_1 C_1$ ;  
 $M$  – коефіцієнт взаємної індукції між катушками  $L_1$  та  $L_2$ ,  
 або в символічному вигляді:

$$\begin{cases} \dot{E} = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_M \\ 0 = \dot{I}_1 Z_M + \dot{I}_2 Z_2 \end{cases} \quad (2)$$

де  $Z_1 = r_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})$      $Z_2 = r_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})$  – комплексні опори кожного з контурів;

$\omega$  – кругова частота джерела е. р. с.  $\dot{E}$ ;

$Z_M = j\omega M$  – опір взаємної індукції.

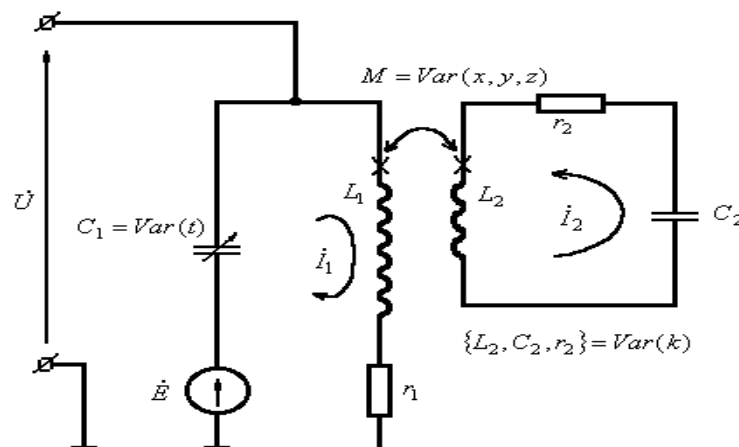


Рис.3. Схема взаємодії контура джерела поля і ПЕК:

$L_1$  - джерело поля;  $L_1 C_1$  - контур джерела поля;  $\dot{E}$  - генератор напруги, що живить контур джерела поля;  $L_2 C_2$  - ПЕК;  $\dot{U}$  - інформативний параметр;  $x, y, z$  - координати внесення ПЕК;  $k$  - поле значень частот настройки ПЕК.

Рішення системи рівнянь (2) має вигляд:

$$\dot{I}_1 = \dot{E} \frac{Z_2}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2}; \quad (3)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{E} \frac{-Z_M}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2}; \quad (4)$$

Вхідний опір системи зв'язаних контурів, визначений з (3),

$$Z_{\text{вх.1}}(j\omega) = Z_1 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_2} \quad (5)$$

відрізняється від вхідного опору поодинокого контура на величину внесеного опору ,

$$Z_{\text{вн.1}} = \frac{\omega^2 M^2}{Z_2}$$

який кількісно відображає вплив струму пасивного контура  $\dot{I}_2$  на величину струму в контурі джерела поля  $\dot{I}_1$ .

У загальному випадку зв'язані контури становлять для джерела навантаження, еквівалентна схема, якого наведена на рис.4. Незалежно від характеру опору зв'язку та налаштування ПЕК, внесений *активний* опір

$$r_{вн.1} = \frac{x_{св}^2}{|Z_2|^2} r_2 \tag{6}$$

завжди позитивний (внесення ПЕК призводить до збільшення витрат енергії в контурі джерела поля). Очевидно, що додаткова витрата енергії дорівнює тій її частині, яка передається з контура джерела поля в ПЕК.

Характер внесеного *реактивного* опору протилежний характеру реактивного опору ПЕК:

$$x_{вн.1} = -\frac{x_{св}^2}{|Z_2|^2} x_2 \tag{7}$$

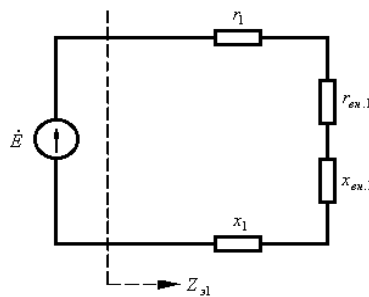


Рис.4. Еквівалентна схема зв'язаних контурів при відсутності резонансу

Активна  $r_{ен.1}$  і реактивна  $x_{ен.1}$  складові внесеного опору  $Z_{вн.1}$  зростають зі збільшенням опору зв'язку  $x_{зв}$  і визначаються величиною реактивного опору ПЕК  $x_2$ .

Найбільшу величину внесений активний опір має в разі збігу частот настройки ПЕК, контура джерела поля і генератора, який його живить:

$$r_{вн.1} = \frac{x_{св}^2}{r_2} = r_{вн.1max} \tag{8}$$

Величина внесеного активного опору зменшується тим більше, чим більше відхилення частоти ПЕК від частоти контура джерела поля.

Внесення реактивного опору з вторинного контура в первинний відбувається тільки в тому випадку, коли пов'язані контури не налаштовані на частоту джерела.

Викладене створює принципову можливість дослідження просторових характеристик ближнього поля рамкових антен шляхом внесення в задані точки простору ПЕК, налаштованих на частоту поля. Інформативним параметром при цьому може бути обраний енергетичний параметр – амплітуда вихідної напруги контура джерела поля.

Напруга на джерелі поля

$$\dot{U} = \dot{I} Z_{зL1}, \tag{9}$$

$$\text{де } Z_{зL1} = (r_1 + r_{ен.1}) + j(x_{L1} + x_{ен.1}) \tag{10}$$

Враховуючи, що втрати енергії в конденсаторі зазвичай невеликі, всі власні втрати енергії в контурі джерела поля віднесені до котушки індуктивності  $L_1$  (рис.3).

Беручи до уваги, що  $\dot{I}_1 = \dot{E} / Z_{з1}$ ,

$$\dot{U} = \dot{E} \frac{(r_1 + \frac{\omega^2 M^2}{|Z_2|^2} r_2) + j(x_{L1} - \frac{\omega^2 M^2}{|Z_2|^2} x_2)}{(r_1 + \frac{\omega^2 M^2}{|Z_2|^2} r_2) + j(x_{L1} - \frac{\omega^2 M^2}{|Z_2|^2} x_2)} \tag{11}$$

Аналіз виразу (11) показує, що зміна напруги на джерелі поля визначається зміною знаменника. Збільшення активного опору контура джерела поля призводить до зменшення напруги на джерелі поля  $L_1$ . Отже, по зменшенню напруги на джерелі поля  $\dot{U}$ , викликаного збільшенням незворотних втрат енергії, можна судити про наявність у ближній зоні джерела поля ПЕК, частота настройки якого співпадає з частотою поля. При цьому необхідно забезпечити достатньо ефективний зв'язок котушки ПЕК з джерелом поля.

Відбір енергії пасивним контуром, а значить, і зменшення напруги на джерелі поля тим більший, чим більший зв'язок між джерелом поля і котушкою ПЕК і чим менші власні втрати в контурі джерела поля  $r_1 = \rho_1 / Q_{1\text{экв}}$  і ПЕК  $r_2 = \rho_2 / Q_2$  ( $\rho_1$  і  $\rho_2$  – хвильовий опір відповідно контура джерела поля і ПЕК,  $Q_{1\text{экв}}$  і  $Q_2$  – добротність відповідно контура джерела поля і ПЕК). Тому котушки індуктивності  $L_2$  ПЕК слід розміщувати на феритовому стержні з великою початковою магнітною проникністю, який концентрує силові лінії поля і збільшує величину коефіцієнта взаємної індукції  $M$ .

Нами створено лабораторний комплекс для дослідження просторових характеристик ближнього поля рамкових антен та проведення експериментальних досліджень у сфері електромагнітної сумісності технічних засобів. До складу комплексу входять: генератор напруги, що живить контур джерела поля; схема включення рамкової проводової антени; осцилограф; вольтметр; комплект рамкових проводових антен; комплект пасивних електричних коливальних контурів, налаштованих на фіксовані частоти. Фрагмент обладнання комплексу наведено на рис.5.



Рис. 5. Зовнішній вигляд обладнання для дослідження просторових характеристик ближнього поля рамкової антени

Схема виконання вимірювань наведена на рис. 6. Проведені експериментальні дослідження показали хороший збіг з результатами розрахунків.

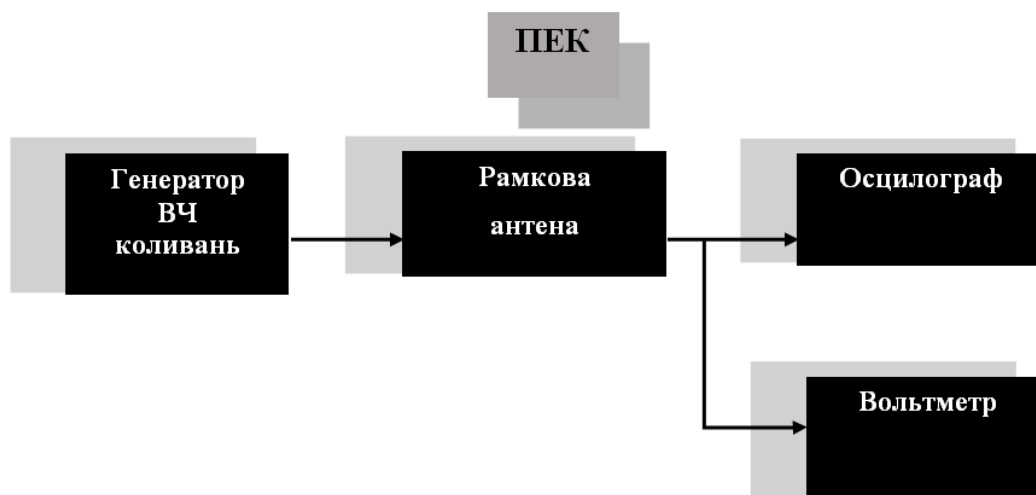


Рис.6. Схема виконання вимірювань

На підставі проведених досліджень розроблено методики аналітичного та експериментального дослідження просторових характеристик ближнього поля рамкових антен, які можуть використовуватися при проведенні наукових досліджень та в навчальному процесі при підготовці фахівців у сфері технічного захисту інформації.

### Висновки

Просторові характеристики ближнього поля рамкових антен експериментально можна визначати шляхом внесення в задані точки простору пасивних електричних коливальних контурів, налаштованих на частоту поля.

Величина відгуку на внесення ПЕК (інформативний параметр  $\dot{U}$ ) визначається еквівалентною добротністю контура рамкової антени, добротністю ПЕК і величиною взаємної індукції між котушками індуктивності рамкової антени та пасивного контура.

### Список цитованої літератури

1. Поля і хвилі в системах технічного захисту інформації: підручник для студентів вищих навчальних закладів. Ч.1. / В.М. Шокало, В.А.Усін, Д.В.Грецьких, В.О. Хорошко, Л.П. Крючкова ; за заг. ред. В.М. Шокало. – Харків: ХНУРЕ ; Колегіум, 2012. – 456 с.
2. Яворский Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. – 8-е изд., перераб. и испр. – М.: ООО «Издательство Оникс»: ООО «Издательство «Мир и Образование», 2006. – 1056 с.
3. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей / Издание 2-е, переработ. и доп., – Л.: «Энергия», 1972. – 816 с.

Надійшла: 16.01.2018

Рецензент: к.т.н. Довбешко С.В.