

5. Vountesmeri V. Audio frequency magnetoresistive watt-converter // IEEE. Trans. Instrum. and Meas. – 2002. – № 51. – P. 63–66.
6. Vountesmeri V., Martynyuk A. Magnetoresistive thin film sensor for active RF power // Sensors and Actuators: A Physical. – 1998. – № 69. – P. 21–26.

Вытяганец А.И. Средства измерения активной мощности на низких и средних частотах "IN SITU" Приведены основные способы измерения активной мощности на низких и средних частотах "in situ" и определена перспективность использования для этих целей магниторезистивных преобразователей электромагнитного поля на основе ферромагнитных пленок.	Vytyaganets A.I. Means of measurement of active capacity on low and average frequencies "IN SITU" The basic ways of measurement of active capacity on low and average frequencies "in situ" are given and perspectives of use for these purposes of magnetoresistive converters of an electromagnetic field on basis ferromagnetic tapes is determined. The list of tasks of further research these tapes are determined.
---	--

УДК 621.396

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОЛЯ В ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІЙ СИСТЕМІ МЕТОДОМ МАГНІТНОГО ЗОНДУ.

Бульба О.П., Осінов А.М., Вунтесмері Вол.С.

Розглянуто метод магнітного зонду на основі ферромагнітного резонансу для дослідження структури електромагнітного поля в електродинамічній системі. Обґрунтування методу проведено на прикладі електромагнітної хвилі H_{10} в прямокутному хвилеводі. Проведено експериментальне дослідження структури електромагнітного поля системи діелектричний хвилевод на металевій основі.

Вступ

Дослідження структури поля в складній електродинамічній системі (ЕС) проводиться різними методами. В порожнистих резонаторах застосовують в основному метод малих збурень [1]. Недоліком методу при застосуванні його для хвилеводів є те, що збурюючі тіла повинні мати досить великі розміри, що зменшує точність їх позиціонування. В закритих хвилеводних системах і резонаторах структуру електромагнітного поля (ЕМП) досліджують також методом активного зонду [2], наприклад, електричним (ємнісний штир) або магнітним (екранована індуктивна петля) зондами через отвори в стінках хвилеводу або резонатора. Розміри зондів, а також розміри додатково прорізаних отворів і щілин мають бути такими, щоб структура поля, що вимірюється, мало спотворювалась і додаткові втрати і реактивності, що вносяться у пристрій, були досить малими. Таким методом можна проводити вимірювання тільки безпосередньо на стінках хвилеводу або резонатора. Вимірювання розподілу поля в об'ємі ЕС і в відкритих системах супроводжується великими похибками за рахунок впливу провідників зондів. Дещо зменшити вплив провідників можна зробивши їх високоомними. Для дослідження розподілу статичних та квазістатичних електричних полів використовується метод електrolітичної ванни [3], яким можна досліджувати структуру поля тільки хвилі T -типу. Амплітуда хвиль, що поширюються в будь-якому напрямку,

а також сам напрямок можуть бути визначені при використанні направлених зондів [5]. Гальваномагнітним зондом [7] можна вимірювати розподіл вектора Пойнтинга в перерізі як одномодового так і багатомодового хвилеводу [8], але тільки на його поверхні.

Постановка задачі

Наведені недоліки стимулювали пошук інших методів вимірювання розподілу ЕМП в складних ЕС при мінімальному впливі зонду на отримані результати, наприклад, в хвилеводах з багатомодовим режимом поширення хвиль та в хвилеводах з неоднорідним діелектричним заповненням.

Ми вибрали магнітний зонд у вигляді феритової кульки малого діаметру намагніченої до насичення зовнішнім магнітним полем в режимі феромагнітного резонансу. Такий феритовий резонатор (ФР) із монокристалу залізо-іттрієвого гранату (ЗІГ) має високу добротність і при малому діаметрі вносить значне збурення ЕМП, яке можна легко зафіксувати. Малі розміри ФР забезпечують точне визначення його положення в ЕС і малий вплив на структуру вимірюваного ЕМП (в тому числі завдяки відсутності провідників). Взаємодія ФР з ЕМП ЕС відбувається через магнітну складову кругової поляризації правого обертання відносно напрямку зовнішнього магнітного поля.

Теоретичне обґрунтування методу

Потужність, що поглинається у ФР пропорційна квадрату амплітуди магнітного поля з круговою поляризацією [4] $P_{\phi} = \frac{\omega}{2} \text{Im}(H^* \tilde{\chi} H) v$, де $\tilde{\chi}$ - тензор магнітної сприйнятливості; v – об'єм ФР. Отже, за допомогою ФР при різних напрямках сталого магнітного поля можна зняти розподіл квадрату магнітної складової ЕМП кругової поляризації правого та лівого обертання відносно напрямку координатних осей. При цьому слід встановити зв'язок між магнітною складовою ЕМП кругової поляризації і іншими складовими поля в вибраній системі координат. В загальному випадку магнітна складова поля в будь-якій площині буде мати еліптичну поляризацію. Це поле може бути утворене двома взаємно перпендикулярними лінійно поляризованими полями з довільними амплітудами і фазами. Велика вісь еліпса поляризації нахилена відносно координатних осей на деякий кут, що залежить також від різниці фаз лінійно поляризованих полів. У хвилеводах різниця фаз між поздовжніми і поперечними відносно вісі хвилеводу складовими поля дорівнює 90° . При цьому осі еліпса поляризації розташовані вздовж координатних осей. Поздовжні

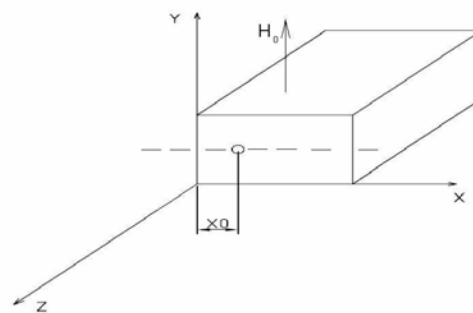


Рис.1

і поперечні складові магнітного поля можна знайти як суму і різницю право- і ліво-поляризованих магнітних складових поля. Перевірити це твердження можна на хвилеводі з відомим розподілом полів. Розглянемо співвідношення між складовими електромагнітного поля у прямокутному хвилеводі розмірами $23 \times 10 \text{ мм}^2$ з хвилею H_{10} , діаметр ФР 0,8 мм (рис. 1).

Складові поля в хвилеводі запишемо як:

$$H_z = -jH \cos\left(\pi \frac{x}{a}\right) e^{-\beta z}, \quad H_x = \frac{2a}{\lambda_{x\phi}} H \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) e^{-\beta z}, \quad E_y = -\frac{2a}{\lambda} ZH \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) e^{-\beta z} \quad (1)$$

Сума поперечної і поздовжньої складових магнітного поля має еліптичну поляризацію в площині xz . Вектор магнітного поля при $z=0$:

$\vec{H} = \vec{e}_x \frac{2a}{\lambda_{x\phi}} H \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) - \vec{e}_z jH \cos\left(\pi \frac{x}{a}\right) = \vec{e}_+ H_+ + \vec{e}_- H_-$. Визначимо орти поля з круговою поляризацією через орти поля з лінійною поляризацією і навпаки:

$$\vec{e}_+ = \vec{e}_x - j\vec{e}_z \quad \vec{e}_- = \vec{e}_x + j\vec{e}_z \quad \vec{e}_x = 0,5(\vec{e}_+ + \vec{e}_-) \quad \vec{e}_z = j0,5(\vec{e}_+ - \vec{e}_-)$$

Розклавши еліптично поляризоване магнітне поле на два поля з круговими поляризаціями правого та лівого обертання, встановимо їх зв'язок з лінійно поляризованими полями хвилеводу

$$\begin{aligned} \vec{H} &= 0,5(\vec{e}_+ + \vec{e}_-) \frac{2a}{\lambda_{x\phi}} H \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) - j0,5(\vec{e}_+ - \vec{e}_-) jH \cos\left(\pi \frac{x}{a}\right) = \\ &= \vec{e}_+ 0,5H \left[\frac{2a}{\lambda_{x\phi}} \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) + \cos\left(\pi \frac{x}{a}\right) \right] + \vec{e}_- 0,5H \left[\frac{2a}{\lambda_{x\phi}} \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) - \cos\left(\pi \frac{x}{a}\right) \right] = \vec{e}_+ H_+ + \vec{e}_- H_- \end{aligned}$$

звідки $H_+ = 0,5H \left[\frac{2a}{\lambda_{x\phi}} \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) + \cos\left(\pi \frac{x}{a}\right) \right]$, $H_- = 0,5H \left[\frac{2a}{\lambda_{x\phi}} \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) - \cos\left(\pi \frac{x}{a}\right) \right]$

На середній частоті робочого діапазону хвилеводу при $\lambda_{x\phi} = 2a$

$$\begin{aligned} H_+^2 &= 0,25 H^2 \left[\sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) + \cos\left(\pi \frac{x}{a}\right) \right]^2 = \\ &= 0,25 H^2 \left(1 + 2 \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) \cos\left(\pi \frac{x}{a}\right) \right) = 0,25 H^2 \left(1 + \sin\left(2\pi \frac{x}{a}\right) \right) \\ H_-^2 &= 0,25 H^2 \left[\sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) - \cos\left(\pi \frac{x}{a}\right) \right]^2 = \\ &= 0,25 H^2 \left(1 - 2 \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) \cos\left(\pi \frac{x}{a}\right) \right) = 0,25 H^2 \left(1 - \sin\left(2\pi \frac{x}{a}\right) \right) \end{aligned}$$

Експериментальні дослідження

Наведемо послідовність дослідження структури поля ЕС, яка була відпрацьована на прикладі хвилі H_{10} в прямокутному хвилеводі:

1. Вимірюємо розподіл квадрата магнітного поля правої та лівої кругових поляризацій H_+^2 і H_-^2 (Рис. 2) [4];

2. Вилучаємо корінь квадратний із виміряного розподілу з врахуванням знаку H_+ і H_- (рис. 3);

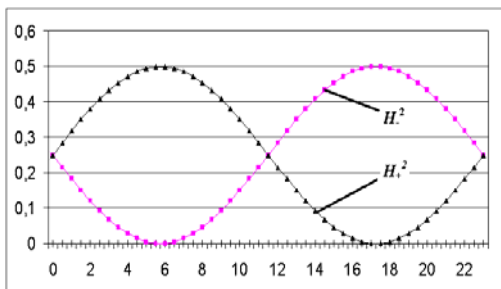


Рис. 2

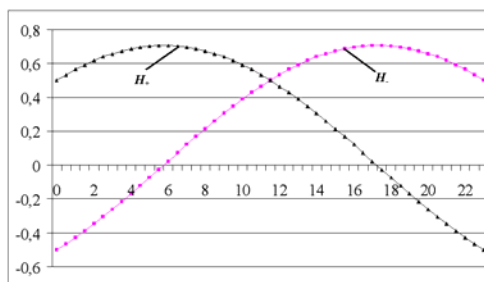


Рис. 3

3. Сума право- і лівополяризованих полів дає поперечну складову магнітного поля $H_x = H_+ + H_-$, а їх різниця поздовжню складову магнітного поля $H_z = H_+ - H_-$ (Рис. 4).

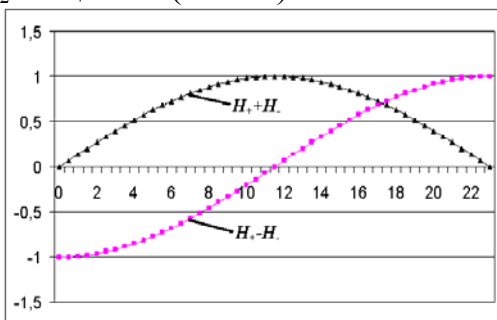


Рис. 4

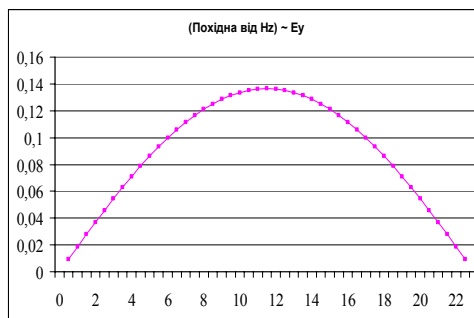


Рис. 5

4. Електричну складову поля знаходимо як похідну від поздовжньої складової магнітного поля (див. рис. 5).

Як видно із наведених графіків розподіл електричних і магнітних складових поля в прямокутному хвилеводі відповідає теоретичному (1).

На основі розробленого методу було проведено дослідження структури ЕМП в діелектричному хвилеводі (рис. 6). Експеримент проводився на лабораторному макеті, блок-схема якого представлена на рис. 7.

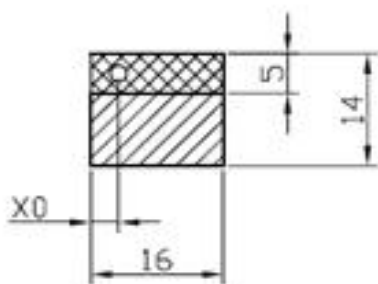


Рис. 6

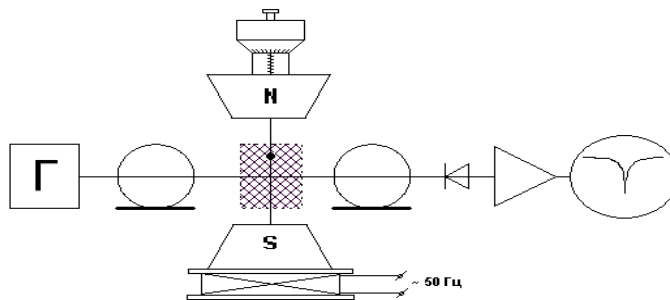


Рис.7

Сигнал з генератора Г, що працює на частоті 6,8ГГц, подається через коаксіально-хвилевідний перехід на діелектричний хвилевід. Вихідний сигнал через хвилевідно-коаксіальний перехід послідовно поступає на детекторну камеру, підсилювач і осцилограф. Розгортка осцилографа синхронізована з частотою 50 Гц. В діелектричному хвилеводі за допомогою постійних магнітів створюється магнітне поле величиною 192 кА/м. На один з полюсів магніту намотана котушка, за допомогою якої її магнітне

поле модулюється з частотою 50 Гц (амплітуда модуляції мала). Частина діелектрика разом з запресованим ФР переміщалась поперек діелектричного хвилеводу. На екрані осцилографа спостерігаємо резонансну криву, ширина якої складає 40 А/м, а амплітуда прямопропорційна квадрату амплітуди магнітної складової поля кругової поляризації правого обертання. Точність переміщення ФР в діелектричному хвилеводі забезпечується мікрометричним гвинтом.

На рис. 8 показано отриманий експериментально розподіл квадрату магнітного поля з правою і лівою круговими поляризаціями H_+^2 і H_-^2 .

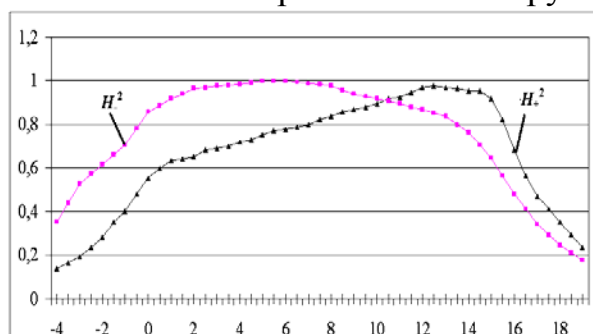


Рис. 8

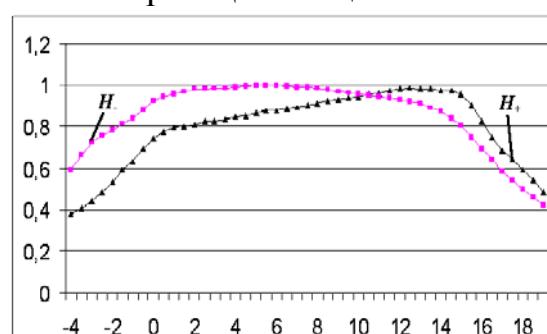


Рис. 9

На рис. 9 відображено результати вимірювання H_+ і H_- після обробки згідно приведеного вище алгоритму, а на рис. 10 - результат розрахунку поперечної і поздовжньої складових магнітного поля в площині xz : $H_x = H_+ + H_-$, $H_z = H_+ - H_-$. Деяка асиметрія розподілу поля пояснюється не ідеально узгодженим навантаженням діелектричного хвилеводу.

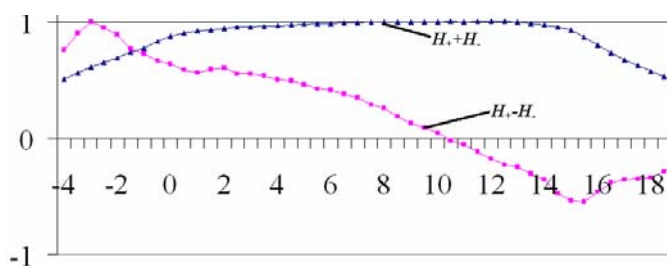


Рис. 10

Висновки

Метод магнітного зонду на основі феромагнітного резонансу може бути використаний для дослідження структури полів в тих випадках, коли інші методи виявляються неефективними, супроводжуються значними похибками, що можуть значно вплинути на результат, або ж є складними в технічній реалізації. Найчастіше ускладнення виникають при дослідженні структури полів в діелектричних резонаторах, діелектричних хвилеводах, в мікрострічкових [6] та копланарних лініях, в хвилеводах з неоднорідним діелектричним заповненням та в багатомодових хвилеводах. Саме в цих випадках метод може бути застосований з найбільшою ефективністю. Виключенням є феритові прилади НВЧ діапазону, наприклад, вентиля, циркулятори, які мають власне магнітне поле.

Література

1. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. -М.: Связь, 1971. 420с.

2. Конструирование СВЧ-устройств и экранов/Под ред. А.М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1983. 400 с.
3. Чернушенко А.М., Майбородин А.В. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазонов волн/ Под ред. А.М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1986. – 336 с.
4. Бокринська О.Я., Вунтесмері В.С., Кисляковський А.В. Ферромагнітний резонанс у техніці сантиметрових хвиль., «Техніка», Київ, 1966, 107 с.
5. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах: Пер. с нем./Под ред. В.Н. Сретенского. – М.: Гос. изд-во физико-математ. лит-ры, 1963. – 364 с.
6. L. Rothe, Experimentelle Ermittlung der magnetischen Feldverteilung auf einer Microstrip-Leitung mittels Storkorpermessungen, Vortage der 2. Internationalen Konferenz uber Mikrowellenferrite, v.23, bis 27. September 1974 in Suhl/DDR, p.350-376.
7. Вунтесмери В.С. Детектирование на основе гальваномагнитных явлений в ферромагнитных пленках//Изв.вузов. Радиоэлектроника. 1976.- Т29, Вып.2. С.39-45.
8. Вунтесмери В. С., Ивкин П. В. Минимизация количества гальваномагнитных датчиков при измерении проходящей мощности в многомодовом волноводе. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 2002. - Т. 45, №8. - С. 32-35.

<p>Бульба О.П., Осипов А.М., Вунтесмери В.С. Исследование структуры поля в электродинамической системе методом магнитного зонда Рассмотрен метод магнитного зонда на основе ферромагнитного резонанса для исследования структуры электромагнитного поля в электродинамической системе. Обоснование метода проведено на примере электромагнитной волны H_{10} в прямоугольном волноводе. Проведено экспериментальное исследование структуры электромагнитного поля системы диэлектрический волновод на металлической основе.</p>	<p>Bulba O.P., Osipov A.M., Vuntsemeri Vol.S. Investigation of a structure field at electro-dynamics system with method of magnet probe The method of a magnetic probe on the basis of a ferromagnetic resonance for research of structure of an electromagnetic field in electro-dynamics system is considered. The substantiation of a method is lead on an example of electromagnetic wave H_{10} in a rectangular wave-guide. The experimental research of structure of an electromagnetic field of system a dielectric wave-guide on a metal basis is lead.</p>
---	--