

Д. т. н. Ю. Ф. ЗІНЬКОВСЬКИЙ, А. І. ВИТЯГАНЕЦЬ

Україна, Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
 E-mail: kivra@kpi.ua, vytiaganets@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ МАГНІТОРЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Проведено тривимірне моделювання структури чутливого елемента магніторезистивного перетворювача активної потужності та показано розподіл струму і напруженості тангенціального електричного поля в ньому. Отримано вираз для розрахунку вхідного опору перетворювача, необхідного для обчислення струму в плівці.

Ключові слова: вимірювальний перетворювач, моделювання, тонка плівка, чутливий елемент.

Вимірювання потужності, яка є основною енергетичною характеристикою пристроїв та систем, займає важливе місце в сучасних електронних системах. Одним з параметрів радіотехнічних та телевізійних систем, комплексів, пристроїв та вузлів є їх активна потужність, яка характеризує інтенсивність електромагнітних процесів. Для керування потужністю систем використовують різні нелінійні елементи і пристрої, які спотворюють та розширюють спектр вихідного сигналу, що погіршує показники систем, процесів та визначає необхідність контролю активної потужності в реальному часі.

Вдосконалення радіотехнічних та телевізійних систем, які використовуються як в електронному зв'язку, так і в технологічних процесах, потребує підвищення чутливості, точності та розширення частотного діапазону вимірювання активної потужності вимірювачами.

Питання вивчення активної потужності розглянуто в роботах багатьох дослідників, наприклад А. Я. Безиковича, Є. З. Шапіро, Г. І. Котенка, В. Ю. Ларіна, І. М. Вікуліна та ін. Аналіз відомих джерел інформації показав, що електродинамічні і феродинамічні вимірювачі потужності характеризуються значною похибкою через нелінійність та гістерезисом, великим власним споживанням енергії, великою чутливістю до зовнішніх магнітних полів, наявністю частотної і кутової похибок, невеликим обертовим моментом. Цифрові вимірювачі потужності мають складну схему обробки сигналу, діапазон частот аналого-цифрових перетворювачів обмежений (сотні МГц), а через відхилення форми кривих вхідних сигналів від синусоїдальних виникають додаткові похибки. До недоліків ватметрів на основі перетворювачів Холла можна віднести значну похибку, пов'язану з термоелектро-

рушійною силою, наявністю випрямляючих контактів в напівпровідниках, низьку чутливість і точність, складну технологію виготовлення, значний розкид параметрів однотипних перетворювачів, сильну залежність опору і коефіцієнта Холла від температури та магнітного поля, наявність залишкової напруги, низьку величину коефіцієнта корисної дії, малий динамічний діапазон вимірювання потужності (30 дБ для перетворювачів Холла і приблизно 40 дБ для електро- та феродинамічних перетворювачів) [1].

Найбільш перспективними вважаються магніторезистивні перетворювачі, оснований на гальваномагнітних явищах у тонких феромагнітних плівках із пермалоевих структур. В порівнянні з напівпровідниковими структурами вони мають на п'ять порядків більше співвідношення сигнал/завада, що разом з відсутністю випрямлення сигналів на контактах стало підставою для вибору саме цього перетворювача для подальшого дослідження.

Метою даної роботи є моделювання структури чутливого елемента магніторезистивного перетворювача і визначення розподілу в ньому струму та напруженості електричного поля.

Чутливий елемент вимірювального перетворювача активної потужності представляє собою намагнічену до насичення феромагнітну плівку, до контактів A і F якої прикладена напруга U (рис. 1). Вздовж розташованої в прямокутній системі координат анізотропної плівки розміщено провідник, струм $I_{пл}$ у якому створює напруженість зовнішнього змінного магнітного поля, компоненти якого дорівнюють

$$h_k = h(I) \cdot \sin(\omega t + \varphi_{h(I)}), \quad (1)$$

де $h(I)$, $\varphi_{h(I)}$ — відповідно, амплітуда і фаза напруженості змінного магнітного поля.

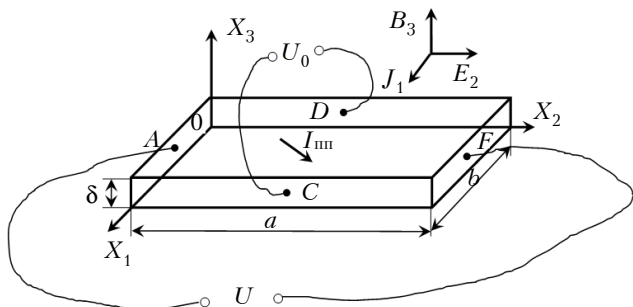


Рис. 1. Магнітна плівка в прямокутній системі координат

Напруженість перетвореного феромагнітною плівкою електричного поля дорівнює

$$E_{0i} = 0,5 \operatorname{Re}(\rho_{ip} J_p^*), \quad (2)$$

де ρ_{ip} , J_p^* — змінні частини, відповідно, питомого магнітоопору (враховує гальваноманітні явища в плівці) і щільності струму, які змінюються з однаковою частотою, але з різними фазами;

i, p — індекси, які відповідають координатам X_1 або X_2 , і позначаються, відповідно, 1 або 2.

Анізотропна тонка магнітна плівка з питомим об'ємним опором ρ та товщиною δ (складає кілька десятків нм) розташована в прямокутній лівій системі координат (рис. 1). Якщо до плівки прикладене магнітне поле з індукцією B , а однорідний струм щільністю J тече в напрямку $0X_1$, тобто $J_1 \neq 0$, $J_2 = J_3 = 0$, то напруженість результуючого електричного поля, створеного в об'ємі плівки, з врахуванням рівняння (2), має вигляд [2, 3]

$$E_i = \rho_{i1} J_1 + \rho_{i1p} J_1 B_p + \rho_{i1pk} J_1 B_p B_k, \quad (3)$$

де i, p, k — індекси, які відповідають координатам X_1 , X_2 або X_3 , і позначаються, відповідно, 1, 2 або 3.

Відмітимо, що оскільки при розглядуванні конфігурації у намагніченій до насичення феромагнітній плівці перемагнічування відбувається тільки в її площині, ми не розглядатимемо вплив аномального ефекту Холла на плівку.

Опис компонентів електричного поля вздовж координатних осей має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} E_1 &= \rho_{11} J_1 + \rho_{1111} J_1 B_1^2 + \rho_{1122} J_1 B_2^2 + \rho_{1133} J_1 B_3^2, \\ E_2 &= \rho_{213} J_1 B_3 + (\rho_{2112} + \rho_{2121}) J_1 B_1 B_2; \\ E_3 &= \rho_{312} J_1 B_2 + (\rho_{3113} + \rho_{3131}) J_1 B_1 B_3. \end{aligned} \quad (4)$$

За відсутності магнітного поля, тобто при $B_1 = B_2 = B_3 = 0$, можна записати

$$\begin{aligned} E_1 &= \rho_{11} J_1; \\ E_2 &= E_3 = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

У випадку $B_1 = B_2 = 0$, $B_3 \neq 0$

$$E_1 = \rho_{11} J_1 + \rho_{1133} J_1 B_3^2,$$

$$E_2 = \rho_{213} J_1 B_3;$$

$$E_3 = 0. \quad (6)$$

У випадку $B_1 = B_2 \neq 0$, $B_3 = 0$

$$E_1 = \rho_{11} J_1 + \rho_{1111} J_1 B_1^2,$$

$$E_2 = (\rho_{2112} + \rho_{2121}) J_1 B_1 B_2 = \rho_{2112} J_1 B_{110}^2;$$

$$E_3 = 0, \quad (7)$$

де B_{110} — магнітна індукція в напрямку $[110]$.

Анізотропію магнітоопору визначимо з рівняння (7)

$$\Delta \rho = \rho_{11} - \rho_{1111} = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}, \quad (8)$$

де $\rho_{\parallel}$, $\rho_{\perp}$ — питомий опір провідного матеріалу у випадках, коли вектор індукції направлений нормально до площини пластини і коли він направлений паралельно вектору щільності струму відповідно.

Вихідна напруга між контактами C і D плівки дорівнює

$$\bar{U}_0 = \int_C^D \bar{E} d\bar{X}_1 \cong \bar{E} \bar{x}_1 b, \quad (9)$$

де $\bar{x}_1$ — орт у напрямку осі $0X_1$.

Для побудови практичної тривимірної моделі до існуючої математичної моделі магніторезистивної структури [2, 3] проведемо розрахунок розподілу струму і електромагнітного поля з використанням редактора топології EMSight пакету програм Microwave Office, оскільки ці величини пов'язані з точністю перемноження вхідних сигналів. Використовуваний при цьому електродинамічний метод моментів ґрунтується на розв'язанні в спектральній області рівнянь Максвелла, сформованих для тривимірного пристрою, який знаходиться в прямокутному корпусі, заповненому планарним кусочно-ламаним шаруватим середовищем.

На рис. 2 показано шарову структуру магніторезистивного перетворювача у тривимірному зображенні, яка представляє собою двопровідну лінію передачі. Чутливий елемент магніторези-

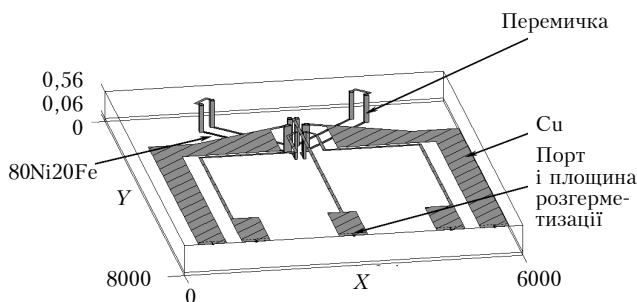


Рис. 2. Тривимірне зображення структури магніторезистивного перетворювача (шари Cu і $80\text{Ni}20\text{Fe}$ збільшені у 1000 разів)

стивного перетворювача складається з двох симетричних петлеподібних ортогональних гілок, елементи яких з'єднані послідовно. Гілки виготовляються електронним напилюванням, відповідно, магніторезистивного (80Ni20Fe) і провідного (Cu) матеріалів на діелектричну підкладку з наступним багатошаровим процесом мікролітографії [1].

До параметрів діелектричних шарів відносяться їх товщина h , відносна діелектрична проникність ϵ_r , тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$. Ці параметри для шару Cu, який служить для закорочування сигналів в структурі, для немагнітострикційного шару на основі сплаву 80Ni20Fe та для шару повітря наведено у таблиці.

Параметри діелектричних шарів [4, с. 34]

Шар	Параметр шару		
	h , мкм	ϵ_r	$\text{tg}\delta$
Cu	0,50	3,38	0
80Ni20Fe	0,06	3,38	0
Повітряний	1,00	1,00	0

Електромагнітна (ЕМ) структура магніторезистивного перетворювача в EMSight створювалась в наступній послідовності.

1. Завдання корпусу в EMSight: задається матеріал для всіх шарів ЕМ-структури, встановлюються граничні умови, визначається загальний розмір структури і проводиться її розбиття на комірки, які будуть використовуватися для специфікації матеріалу провідників структури.

2. Завдання граничних умов: стінки корпусу та його верхня границя — ідеальні провідники, нижня — ситалова підкладка (СТ50-1).

3. Додавання провідників до топології.

4. Додавання перемичок VIA для міжшарового з'єднання підкладки. Верхня і нижня границі перемички замикають провідні форми, як звичайні пласкі провідники. Струм, який протікає через перемичку, моделюється як одноріднонапрявлений об'ємний струм. Одна з основних умов, необхідних для моделювання перемички, — вимоги до її довжини. Приймається, що вона дорівнює товщині діелектричного шару та є коротшою за довжину хвилі.

5. Додавання електричних портів на краю корпусу (крайові порти) і площин розгерметизації. Порти — це дві клеми, які використовуються для моделювання вводу потужності в структуру і виводу її із структури. Фізично порт представляє собою джерело живлення, яке збуджує струм в структурі.

6. Завдання частот моделювання (0,005 — 1,5 МГц).

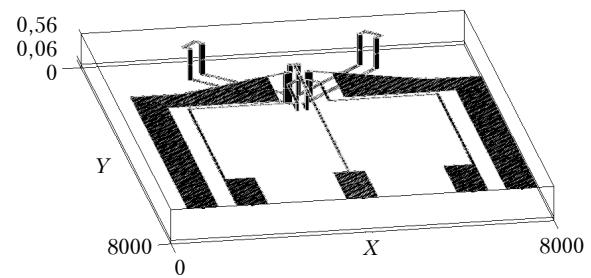


Рис. 3. Візуалізація струму на поверхні провідників

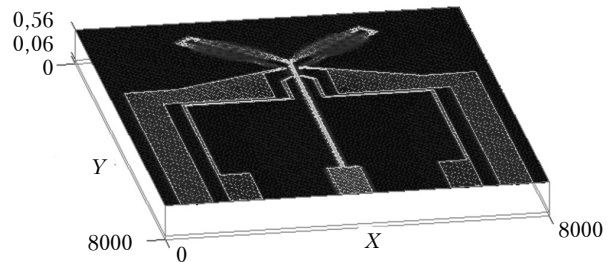


Рис. 4. Візуалізація напруженості електричного поля в площині шару Cu

Редактор топології EMSight програми Microwave Office використовує портові навантаження, щоб показати струми в структурі. На рис. 3, де показане тривимірне зображення стоячих хвиль струмів на металевих поверхнях, візуалізовано векторний розподіл струму.

На рис. 4 представлено візуалізацію тангенціального електричного поля (E -поля) в одній з площин тривимірного представлення, яка демонструє нерівномірний розподіл E -поля в феромагнітній плівці.

В пакеті Microwave Office було змодельовано залежність дійсної (R) та уявної (X) складових розподіленого вхідного опору магніторезистивного перетворювача від частоти f (рис. 5). Для можливості проведення оцінки отриманих результатів були проведені розрахунки цих складових:

$$R = 0,5(l \cdot R_s / h) = 288,4 \text{ Ом}; \quad (10)$$

$$X = -1 / (2\pi f C) = -1,06 \dots -3,18 \text{ Ом}, \quad (11)$$

де l — довжина петлі;

R_s — поверхневий питомий опір плівки;

h — ширина смужки;

C — ємність.

Розходження між значеннями, які отримані за формулами (10) та (11), та тими, що були отримані в процесі моделювання, пояснюються втратами, які обумовлені домішками та шорсткістю поверхні, що не враховується при моделюванні. Одним із способів узгодження результатів моделювання і вимірювань є зменшення провідності провідників на 10–20%.

Таким чином, при відомому значенні прикладеної вхідної напруги можна розрахувати струм,

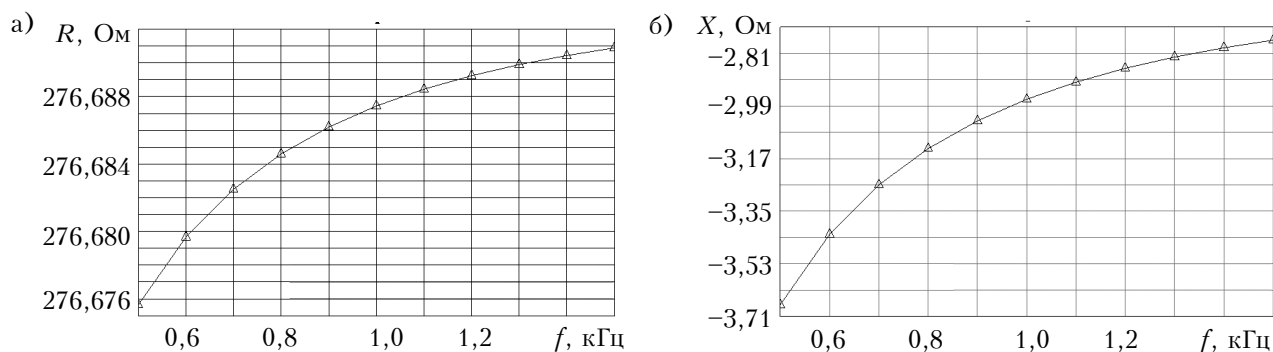


Рис. 5. Залежність дійсної (а) та уявної (б) складових вхідного опору перетворювача від частоти

який протікає у вимірювальному перетворювачі, що необхідно при розрахунку подільника вхідної напруги. Струм в магніторезистивній структурі дорівнює

$$I = U / (R_{\text{стр}} + r), \quad (12)$$

де U — вхідна напруга;

$R_{\text{стр}}$ — опір структури, де мідь «накриває» пермалой;

r — опір плівки.

Оскільки струм у магніторезистивній плівці по фазі випереджує напруженість електричного поля E на $\pi/2$ (як для ємності), а при резонансі намагніченість відстає від E на $\pi/2$ (як для індуктивності), сумарна фаза дорівнюватиме $\pi/2 + \pi/2 = 0$, тому при резонансі буде максимальний вихідний сигнал.

Заключення

Знайдено розподіл та напрямок струму і тангенціального електричного поля (E -поля) при аналізі електромагнітної структури для чутливого елементу перетворювача, який використовується в магніторезистивній системі, призначеній для вимірювання активної потужності в ді-

апазоні частот від 0 (для постійного струму) до сотень мегагерц. Завдяки цьому можна знівелювати паразитні складові струму впоперек структури і тим самим удосконалити топологію чутливого елементу перетворювача.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Витяганець А.І., Вунтесмері В.С. Засоби вимірювання активної потужності на низьких та середніх частотах «in situ» // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2007. — Вип. 34. — С. 112—118.
2. Vountesmeri V., Vytiaganets A. A mathematical model of measuring transformer of active power of middle frequencies // 10th Int. conf. «Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science» (TCSET'2010). — Lviv, 2010.
3. Витяганець А.І. Математична модель магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності середніх частот // Труды III Междунар. молодеж. науч.-технич. конф. «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (РТ-2007). — Україна, Крим, Севастополь, 2007. — С. 245.
4. Зиньковский Ю.Ф., Домнич В.И. Конструирование РЭС. Оценка и обеспечение тепловых режимов. — Киев: УМК ВО, 1990.

Надійшла до редакції 11.08 2017 г.

Ю. Ф. ЗИНЬКОВСКИЙ, А. И. ВЫТЯГАНЕЦ

Украина, Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
E-mail: kivra@kpi.ua, vytiaganets@ukr.net

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МАГНИТОРЕЗИСТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Проведено моделювання структури чутливого елемента магніторезистивного преобразователя активной мощности, показано распределение тока и напряжения тангенциального электрического поля в нем. Получено выражение для расчета входного сопротивления преобразователя, необходимое для нахождения тока в пленке.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, моделирование, тонкая пленка, чувствительный элемент.

DOI: 10.15222/TKEA2017.4-5.10
UDC 621.372

Yu. F. ZINKOVSKY, A. I. VITYAGANETS

Ukraine, NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
E-mail: kivra@kpi.ua, vytiaganets@ukr.net

MODELING THE STRUCTURE OF THE SENSITIVE ELEMENT OF THE MAGNETORESISTIVE CONVERTER

In the analysis of the electromagnetic structure the distribution and direction of current and the tangential electric field (E-fields) are found. The sensing element of the converter, which is used in the magnetoresistive system, is designed to measure active power in the frequency range from DC to hundreds of megahertz. An expression for the input resistance of the measuring transducer of the active power required for calculating the current in the film is obtained.

The simulation of the current distribution and tension of the tangential electric field in the three-dimensional structure of the sensitive element of the magnetoresistive measuring converter of active power was carried out. Knowing the direction of current along the structure it is possible to dampen the parasitic components of the current across the structure, which allows improving the topology of the sensitive element of the converter.

Keywords: measuring transducer, modeling, thin film, sensitive element.

REFERENCES

1. Vytiaganets A. I., Vountesmeri V. S. [Means of measurement of active power at low and medium frequencies «IN SITU»]. *Visnik NTUU "KPI". Ser. Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannya*. 2007, vol. 34, pp. 112-118. (Ukr)
2. Vountesmeri V. S., Vytiaganets A. A. [A Mathematical Model of Transformer of Active Power of Medium Frequencies]. *10th International Conf. Modern Problems*

of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2010). Lviv, 2010.

3. Vytiaganets A. I. [Mathematical model of magnetoresistive measuring transducer of active power of medium frequencies] *3rd Intern. scientific and technical conf., «Sovremennye problemy radiotekhniki i telekommunikatsii» (RT-2007)*. Sevastopol, 2007, pp. 245. (Ukr)

4. Zinkovsky Yu. F., Domnich V. I. *Otsenka i obespechenie teplovykh rezhimov* [Assessment and maintenance of thermal regimes]. Kyiv: UMK VO, 1990. (Rus)

НОВЫЕ КНИГИ

Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлёв Ю. И. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 2. Каскадные устройства: монография.— Одесса: Политехперіодика, 2016.

Книга посвящена прогнозированию показателей надежности каскадных термоэлектрических устройств (КТЭУ) при их проектировании и оценке показателей надежности КТЭУ выбранной конструкции.

Рассмотрены функциональные зависимости, позволяющие оценить как охлаждающие возможности, так и энергетическую эффективность и показатели надежности проектируемого устройства в различных токовых режимах работы. Продемонстрирован подход, позволяющий перейти от расчетов к построению каскадных ТЭУ на основе унифицированных модулей, и подход, который позволяет оценить показатели надежности КТЭУ заданной конструкции. Проанализировано влияние тепловой нагрузки на параметры надежности КТЭУ. Приведены алгоритмы, которые помогут разработчику вести оптимизированное проектирование РЭА с использованием КТЭУ или выбрать оптимальную для поставленной задачи конструкцию КТЭУ.

Предназначена для инженеров, научных работников, а также студентов соответствующих специальностей, занимающихся вопросами надежности элементов электроники и в целом РЭА, а также разработкой и проектированием термоэлектрических устройств.

