

Експериментално определяне на електромагнитните свойства на нано-ферофлуиден материал

Валентин Матеев¹⁾, Анелия Терзова¹⁾ и Илиана Маринова¹⁾
Технически университет - София, катедра "Електрически апарати",
email: vmateev@tu-sofia.bg, aterzova@tu-sofia.bg, iliana@tu-sofia.bg

Резюме: В тази статия са предложени метод и измервателна система за определяне на магнитната проницаемост на течни нано-ферофлуидни материали. Методът се основава на изменението на резонансната честота на измервателна намотка, предизвикано от изследваната течна феромагнитна проба. За определяне на изменението на честотата е предложена измервателна система, използваща прецизен импедансен анализатор Agilent 4294A, позволяващ определяне на честотата с точност до 1 mHz. Методът и измервателната система са приложени за определяне на магнитна проницаемост на ферофлуидни проби от Fe₃O₄. Методът е високочувствителен и позволява изследване също на диамагнитни и парамагнитни материали, като изследваната проба може да бъде със сравнително малки размери.

Ключови думи: - магнитна проницаемост, резонансен метод, нано-ферофлуид,

1. Въведение

Определянето на електромагнитните свойства на течни материали с висока точност е изключително важно за редица индустриални приложения. Особен интерес предизвиква определянето на магнитната проницаемост на нано-ферофлуидни материали. Тези данни могат да бъдат използвани при анализ на разпределението на електромагнитното поле, статичните характеристики и динамичното поведение на редица електромагнитни изпълнителни устройства, сензори и др. Точното определяне на магнитната проницаемост е значително затруднено от малката разлика спрямо стойността на магнитната проницаемост на вакуум, малкия размер на пробите и силното влияние върху характеристиките на съпътстващи случайни фактори.

За определяне на магнитната проницаемост на слабомагнитни вещества се използват две основни групи методи.

Първата група са методи, измерващи силата, действаща на проба, поставена в нееднородно магнитно поле. [1-2]

Втората група са методи, измерващи коефициента на самоиндукция за определена намотка или взаимната индуктивност между

система от намотки, когато в тях е поставена изследваната проба. [1-3]

В тази статия са предложени метод и измервателна система за определяне на магнитната проницаемост на течни ферофлуидни и слабомагнитни материали. Методът се основава на изменението на резонансната честота на измервателна намотка, предизвикано от изследваната проба. Методът е високочувствителен и позволява изследване също на диамагнитни и парамагнитни материали, като изследваната проба може да бъде със сравнително малки размери.

2. Магнитна Проницаемост

В електромагнетизма магнитна проницаемост μ е физична величина, характеризираща степента на намагнитване на материал, което се изменя в зависимост от приложеното магнитно поле. Величината μ_0 е известна като магнитна константа или магнитна проницаемост на вакуума и има точно определена стойност: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Н/м.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}. \quad (1)$$

Относителна магнитна проницаемост, означена с μ_r , е отношението на магнитната проницаемост на определена материална среда към магнитната константа μ_0 (1).

Относителната магнитна проницаемост е безразмерна величина. За течни феромагнитни материали стойностите и са в диапазона от 1 до 10 единици. За диа и пара магнитните вещества е от 0,9998 до 1,0003.

Ферофлуидът е колоидна стабилна суспензия от ултрафини наноразмерни частици от оксиди на феромагнитни метали, обикновено Fe_3O_4 , с размер на частиците от 1 до 100 nm, които са поставени в антикоагулантна и антиседиментна среда.

В статията е изследван водно разтворим ферофлуид (Fe_3O_4) със свойства при температура 40°C : плътност $\rho = 1190 \text{ kg/m}^3$, вискозитет $\eta = 4.75 \times 10^{-3} \text{ kg/s}\cdot\text{m}$, среден размер на частиците между 10 - 12 nm. [6]

3. Метод на Работа

Използваният метод принадлежи на групата методи, при които се измерва коефициента на самоиндукция на определена намотка, когато в нея е поставена изследваната проба. Методът използва изменението на резонансната честота - f_R на измервателна намотка, предизвикано от изследваната проба.

Резонансната честота зависи от собствената индуктивност L и капацитет C на намотката (2). Индуктивността от своя страна зависи от магнитната проницаемост на материала, през който преминават силовите линии на магнитния поток. При високи честоти малки промени на магнитната проницаемост може да доведат до съществено изменение на резонансната честота.

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2)$$

Поставянето на магнитна проба, която може да е феро-, пара- или диа-магнитна, в измервателна намотка със собствена индуктивност $L_{нам}$, води до промяна на индуктивността с ΔL (3). Така

индуктивността L , определяща резонансната честота, е с две компоненти $L_{нам}$ и ΔL , като втората компонента зависи от магнитната проницаемост, формата и размерите на изследваната проба.

$$L = L_{нам} + \Delta L(\mu). \quad (3)$$

Използвайки (2) и (3), за изменението на индуктивността ΔL може да се запише

$$\Delta L = \frac{1}{C(2\pi(f_R + \Delta f))^2} - L_{нам}. \quad (4)$$

За определяне на магнитната проницаемост е необходимо първоначално да бъдат известни собствената индуктивност $L_{нам}$ и капацитет на намотката и съответстващата им резонансна честота f_R . Опитно се измерва новата резонансна честота при наличие на проба в намотката (Фиг.5). Разликата на двете честоти Δf чрез (4) определя ΔL .

От изменението на индуктивността чрез известна аналитична зависимост (5), е определена магнитната проницаемост на проба с известни форма и размери [4]

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r w^2 A}{h}, \quad (5)$$

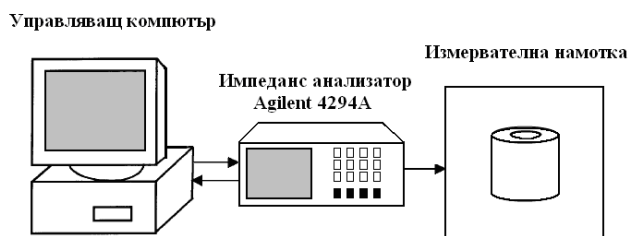
където A е напречното сечение на намотката; w – броят на навивките на намотката и h – височината на намотката. Относителната магнитна проницаемост на изследваната проба в намотката се определя чрез

$$\mu_r = \frac{Lh}{\mu_0 w^2 A}. \quad (6)$$

При така предложената изчислителна методика се пренебрегват влиянието на вихровите токове в пробата, изменението на температурата в пробата и намотката, поляризацията и промяната на вискозитета на ферофлуида.

4. Измервателна Система

За определяне на изменението на честотата е проектирана и реализирана измервателна система, използваща прецизен импедансен анализатор Agilent 4294A, позволяващ определяне на честотата с точност до 1mHz [5].

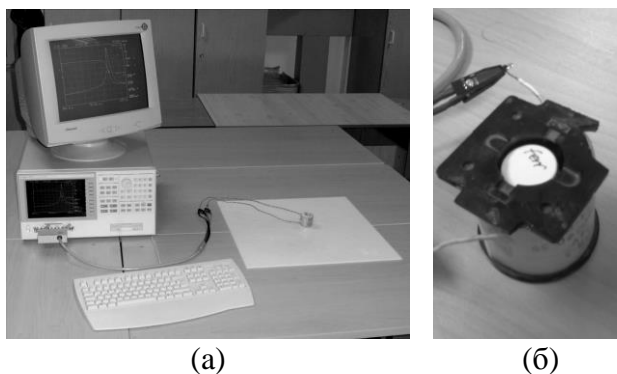


Фиг.1. Блок схема на измервателната система.

Измервателната система с блок схема, показана на Фиг.1, е изградена от прецизен импеданс анализатор Agilent (HP) 4294A, персонален компютър и измервателна намотка. Общ вид на измервателната система е показан на Фиг.2.

Прецизният лабораторен импеданс анализатор Agilent Technologies 4294A се характеризира с честотен обхват 40 Hz – 110 MHz; Обхват по импеданс 10 mΩ – 100 MΩ; Амплитуда на тестовия сигнал: от 5 mV до 1 V или 200 μA до 20 mA; постоянно отместване в границите от 0 V до ± 40 V или 0 mA до ± 100 mA; точност до ± 0.08 %. [5]

За управление на измервателния процес, запис, обработка и визуализация на измерените данни се използва лабораторен персонален компютър.



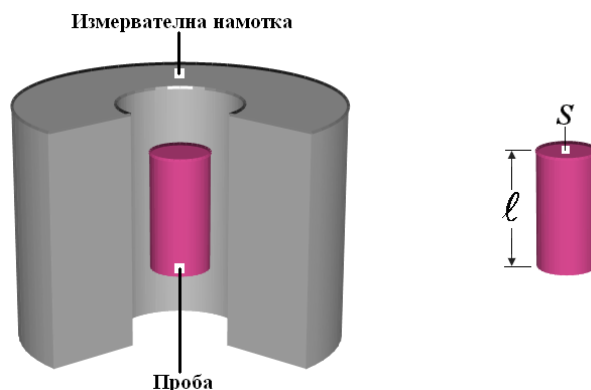
Фиг.2. Общ вид на измервателната система (а) и намотка (б).

Измервателната система използва специално подбрана намотка с възможно висока резонансна честота като формата и размерите позволяват поставяне на изследваната проба. За изследванията е използвана цилиндрична намотка, показана на Фиг. 2 и Фиг. 3 с вътрешен диаметър $D_2=38mm$, външен диаметър $D_1=68mm$, височина $H=56mm$, брой навивки $w=1600$ и напречно сечение на намотката $A = 840 mm^2$.

Тази измервателна намотка има собствена индуктивност $L_{нам}=62,8 mH$, собствен капацитет $C=2,056 nF$ и съответно резонансна честота $f_R = 44 522,2 Hz$.

Изследваният ферофлуиден материал е поставен в херметичен цилиндричен контейнер за течни проби с диаметър $D=30mm$, надлъжно кръгло сечение $S=706,5mm^2$ и височина $\ell=50 mm$. Обемът на контейнера е $V = 35 ml$.

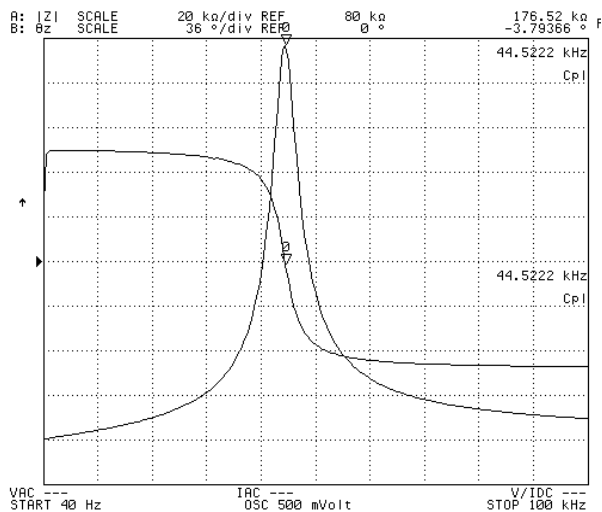
Пробата е разположена съсно и симетрично спрямо центъра на намотката.



Фиг.3. Измервателна намотка.

Промяната на индуктивността на използваната измервателна намотка при промяна на магнитната проницаемост на цилиндричната проба с известни постоянни размери е измерено посредством измервателната система. Изменението на магнитната проницаемост, отговаряща на този промяна на индуктивността е определена с (3), (4) и (6).

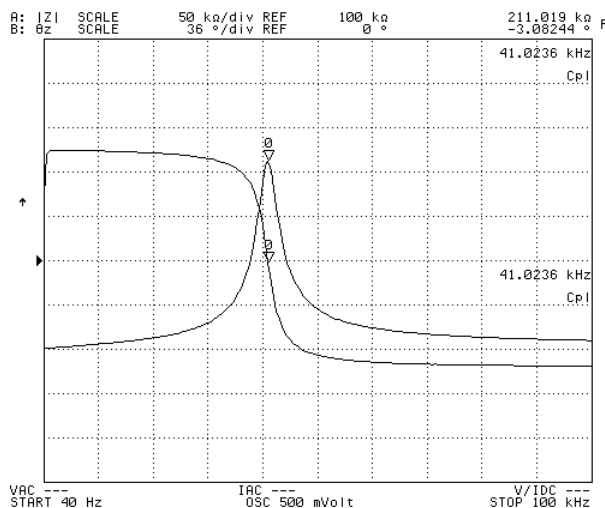
Кривата на измерения импеданс на намотката без наличие на тестова проба е показана на Фиг. 4.



Фиг.4. Резонансен максимум на намотката.

Определен е естественят резонансен максимум при честота от 44 522,2 Hz.

След поставяне на тестовата проба импедансът на намотката е измерен отново. Получената крива на импеданса на намотката след поставяне на пробата е показан на Фиг. 5. Наблюдава се отместване на резонансния максимум, новата резонансна честотата е 41 023,6 Hz.



Фиг.5. Промяна на резонансния максимум при поставяне на проба в намотката.

От измерените данни за изследваната ферофлуидна проба е определено изменение на резонансната честота от $\Delta f = 3\,498,6\text{ Hz}$.

Това изменение е причинено от промяна на индуктивността на намотката $\Delta L = 11,168\text{ mH}$. Това изменение съответства на стойност на относителната магнитна проницаемост на пробата от $\mu_r = 1,2138$.

Получените стойности са систематизирани в Табл. 1.

Таблица 1. Измерени данни

Величина	Единица	Стойност
Работна честота	f kHz	41,0236
Изменение на работната честота	Δf kHz	3,4986
Индуктивност на намотката	L mH	73,9
Изменение на индуктивността	ΔL mH	11,2
Относителна магнитна проницаемост	μ_r	1,2138

Определена е максималната гранична чувствителност на измервателната система, която може да се постигне с тази намотка или $\Delta\mu/\Delta f = 3,604 \cdot 10^{-5}\text{ 1/Hz}$. Така при точност на измерване по честота на анализатора 1mHz, максималната точност на системата за определяне на относителната магнитна проницаемост е $3,604 \cdot 10^{-8}$. Това означава, че относителната магнитна проницаемост μ_r може да бъде определена с точност до осем знака след десетичната запетая. Тази точност може да бъде значително повишена при използване на намотка с по-висока резонансна честота.

При така приложената методика се пренебрегват влиянието на вихровите токове в пробата. Предвид малката стойност на електрическа проводимост на ферофлуида (за изследвания образец $\sigma = 1,27\text{ S/m}$) тези токове нямат съществено значение, както в електромагнитен така и в топлинен аспект. Предвид плътното запълване на съдържащия пробата контейнер и слабия измервателен ток (под 2 mA), могат да се изключат и други смущаващи измерването ефекти, като преместване на течността, поляризация, промяна на вискозитета на ферофлуида и др. За по-нататъчното развитие на тази методика обаче е желателно количествено оценяване на тези ефекти.

5. Заключение

Предложен е метод и средство за определяне на магнитната проницаемост на течни ферофлуидни и слабомагнитни материали. Методът използва изменението на резонансната честота на измервателна намотка, предизвикано от изследваната проба. Методът е високочувствителен и позволява също изследване на диамагнитни и парамагнитни материали, като изследваната проба може да бъде със сравнително малки размери и обем.

Предложената измервателна система може да бъде доразвита по отношение увеличаване точността чрез използване на специално конструирана намотка с нисък капацитет и висока резонансна честота. Предвижда автоматизация на измервателната система с цел осигуряване на по-висока производителност.

Предложената изчислителна методика може да бъде доразвита с отчитане на влиянието на вихровите токове в пробата, изменението на температурата в пробата и намотката, поляризацията и промяната на вискозитета на ферофлуида.

6. Благодарности

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани по договор 132ПД0047-01, от Вътрешния конкурс на ТУ – София – 2013.

6. Литература

- [1] **F. Farmer** *Electrical Measurements in Practice*. Read Books, 2007. 372 p.
- [2] **A. Hubert, R. Schäfer** *Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures*. Springer, 1998. 696 p.
- [3] **В. Чечерников** *Магнитные Измерения*. Издателство Московского Университета, 1969. 386 с.

[4] **П. Калантаров, Л. Цейтлин** Расчет Индуктивностей – Справочная Книга. Энергоатомиздат, 1986. 322 с.

[5] **Agilent Technologies** *Impedance Measurement Handbook*. Agilent Technologies, 2006. 154 p.

[6] **V. Mateev, I. Marinova, Y. Saito**, Coupled Field Modeling of Ferrofluid Heating In Tumor Tissue, *IEEE Transactions On Magnetics*, vol. 49, no. 5, May, 2013, pp. 1793 – 1796.

Данни за авторите:

Валентин Матеев, магистър инженер, ТУ-София (2004) - електротехника. Месторабота: – асистент в катедра „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, ТУ-София. Област на научни интереси: обратни задачи в електромагнетизма и биоелектромагнетизма, интелигентни средства за измерване, числени методи, електромагнитни устройства.

Анелия Терзова, магистър инженер, ТУ-София (2012) - електротехника. Месторабота: асистент и докторант в катедра „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, ТУ-София. Област на научни интереси: електромагнитни устройства, компютърни системи за проектиране, съвременни методи за оптимизация, нано-ферофлуидни материали, компютърни системи за изпитване.

Илиана Маринова, д.т.н. (2010), д-р (1989). Професор, катедра „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, ТУ-София. Област на научни интереси: обратни задачи в електромагнетизма и биоелектромагнетизма, интелигентни средства за измерване, числени методи за моделиране на полета, устройства и процеси, електромагнитни устройства, феромагнитни материали, оптимизация, съвременни средства за визуализация.

Experimental determination of electromagnetic properties of nano-ferrofluid material

Valentin Mateev¹⁾, Aneliya Terzova¹⁾ and Iliana Marinova¹⁾

¹⁾ Technical University of Sofia, Department of Electrical Apparatus,
email: vmateev@tu-sofia.bg, aterzova@tu-sofia.bg, iliana@tu-sofia.bg

Abstract: In this work are presented methods and measurement system for magnetic permeability determination of ferrofluid materials. The method uses the resonance frequency change of measurement coil caused by tested material. The method is highly sensitive and it is suitable for dia- and para-magnetic materials investigation. Developed measurement system employs the Agilent 4294A precision impedance analyzer. Results for relative magnetic permeability of water based ferrofluid material with Fe₃O₄ nano-sized particles are presented in the work.

Key-Words: magnetic permeability, resonant frequency measurements, nono-ferrofluid materials.