

ГИГАНТСКИЙ МАГНИТНЫЙ ИМПЕДАНС ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДАТЧИКОВ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ОБЛАСТИ БИОПРИЛОЖЕНИЙ

Козлов, Н.В., Волчков С.О., Курляндская Г.В.

Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.

Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

nikita.kozlov@urfu.ru, stanislav.volchkov@urfu.ru, galinakurlandskaya@urfu.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты расчета планарных структур на основе многослойной пленки FeNi/Cu/FeNi, полученные с помощью численного моделирования, а также было проведено моделирование движения магнитных наночастиц (МНЧ) маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) по коронарному сосуду конкретного пациента, геометрия которого получена при плановом обследовании, для оценки возможности диагностики особенностей геометрии кровеносного сосуда с помощью ГМИ датчика. Предложенный подход может быть использован при разработке и тестировании магнитных датчиков, а также в фундаментальных исследованиях особенностей чувствительных элементов.

Ключевые слова: магнитный импеданс, сенсоры, цифровые двойники, биоприложения, коронарные сосуды, численные методы.

GIANT MAGNETOIMPEDANCE FOR THE CREATION OF LOW MAGNETIC FIELD SENSORS IN THE FIELD OF BIOAPPLICATIONS

Kozlov. N.V., Volchkov S.O., Kurlyandskaya G.V.

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Abstract. This article presents the results of calculating planar structures based on a FeNi/Cu/FeNi multilayer film, obtained using numerical simulation, as well as modeling the movement of magnetic nanoparticles (MNPs) of maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) along the coronary vessel of a particular patient, the geometry of which was obtained during a routine examination, to assess the possibility of diagnosing the features of the geometry of a blood vessel using a GMI sensor. The proposed approach can be used in the development and testing of magnetic sensors, as well as in fundamental research of the characteristics of sensitive elements.

Key words magnetoimpedance, sensors, digital twins, bioapplications, coronary vessels, numerical methods.

Введение

Магнитные биосенсоры представляют собой компактные аналитические устройства, включающие чувствительный элемент, интегрированный или

связанный с физико-химическим преобразователем, использующим статические или динамические магнитные эффекты [1]. Эти устройства хорошо востребованы в биомедицинских приложениях, при растущем числе различных тестов и потребности в простых протоколах измерений [2]. В настоящее время показано, что магнитные биосенсоры могут быть созданы на основе различных магнитных эффектов, один из которых – эффект магнитного импеданса (МИ).

Эффект магнитного импеданса (МИ) заключается в изменении комплексного сопротивления ферромагнитного проводника при протекании по нему высокочастотного переменного тока и приложении внешнего магнитного поля. Явление МИ объясняется влиянием внешнего магнитного поля на динамическую магнитную проницаемость и, следовательно, на толщину скин-слоя, что является классическим электродинамическим эффектом [3]. Ранее было показано, что МИ, наблюдаемый в различных магнитных материалах, эффективен для использования в качестве основы магнитных биосенсоров, как для детектирования биомагнитных полей, так и полей рассеяния магнитных частиц, внедренных в биологические системы [4].

Численный расчет в области исследования МИ эффекта на сегодняшний день уже оказало влияние на научный прогресс. Тонкопленочная структура была численно рассчитана ранее, чем аналитическим методом, а результаты таких исследований были достаточно корректны. Эти факты говорят о достаточной степени корректности методики и о качестве полученных научных результатов, чтобы сегодня считать ее жизнеспособной для дальнейших научных исследований.

С учетом высокой сложности и многообразности, а также большого количества персональных особенностей и ключевых характеристик живых систем, численное моделирование позволяет сделать меньше допущений, при работе с ними, что ведет к повышению точности результатов. В данной работе такой подход был реализован в рамках оценочного тестирования возможностей датчика ГМИ при решении задач идентификации геометрии коронарного сосуда со стенозирующим поражением, с помощью помещенных в кровь суспензии из магнитных наночастиц.

Работа предусматривает в себе две части: модель расчета чувствительности сенсора на основе МИ, а также модель коронарного сосуда, которые в сумме дают ответ на задачу о возможности идентификации изменения геометрии, а также ответ на вопрос, какой точности таким методом можно добиться.

Методика расчета

Расчет МИ может быть реализован в рамках классической электродинамики. Величина динамической магнитной проницаемости в рамках

такой задачи может быть вычислена на основе модели, развитой в [5], в которой авторами было решено уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта.

Величина динамической магнитной проницаемости зависящая от намагниченности насыщения M_s , поля анизотропии H_a , демпфирующего параметра Гильберта k и угла распределения осей локальной анизотропии для наведенной анизотропии относительно оси, перпендикулярной длинной стороне прямоугольного элемента ψ , может быть рассчитана следующим образом:

$$\mu = 1 + \frac{\gamma^2 M_s^2 \sin^2 \theta}{H \cos \theta} \left(\frac{1 - ik\omega}{1 - ik\omega - \omega^2} + \frac{1 - ik\omega}{1 - ik\omega - \omega^2} \right) \quad (1)$$

где $\gamma = 2.6 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1} \text{ Гс}^{-1}$, а H - величина приложенного магнитного поля, $f = 2\pi\omega$, где ω - частота переменного тока.

Для вычисления частотной и полевой зависимости МИ был использован коммерческий пакет программ Comsol Multyphysics. Более подробно методика и ее тестирование представлены в ранних работах авторов [5].

Уравнения, описывающие процесс движения наночастиц оксида железа в потоке крови по кровеносному сосуду, решались численно с использованием трех модулей пакета COMSOL Multiphysics. Для моделирования динамического поведения кровотока с МНЧ использовалась гемодинамическая модель уравнения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости без массообмена [54-55].

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] = -\nabla [-p\vec{I} + \eta(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)] + \vec{f}_m \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (3)$$

где \vec{u} – вектор скорости, p – давление, ρ – массовая плотность, $\vec{f}_m = (\vec{M}_{ff} \cdot \nabla) \vec{H}$ – магнитостатические силы при условии, что магнитные частицы не взаимодействуют друг с другом. Более подробное описание метода расчета и особенностей построения сеточного разбиения указаны в ранних работах авторов [6].

Результаты и обсуждение

В первой части работы было проведено моделирование отклика МИ пленочной структуры. Данная часть показывает возможности использования численного моделирования в деятельности научных групп для выполнения целого ряда задач, начиная с сравнения результатов экспериментов для оценки их качества проведения, и, заканчивая, подбором оптимальных характеристик материала под выполнение требуемых поставленной задачей показателей и построением цифровых двойников.

Работа была выполнена на примере трехслойной пленочной структуры типа “сэндвич” с крайними слоями с характеристиками пермаллоя состава $Fe_{19}Ni_{81}$ и центральным слоем с характеристиками меди. Параметры и характеристики расчета представлены в ранней работе [5].

Согласно результатам расчета (рис.1), максимум импеданса для тонкопленочной структуры наблюдался при частоте возбуждающего тока около 20 МГц и определялся преимущественно намагниченностью насыщения и особенностями нанесения одноосной магнитной анизотропии.

На примере данной модели была получена чувствительность 80%/Э, что примерно соответствует возможности изменения магнитного поля датчиком с таким образом в качестве чувствительного элемента на уровне 10^{-5} Э.

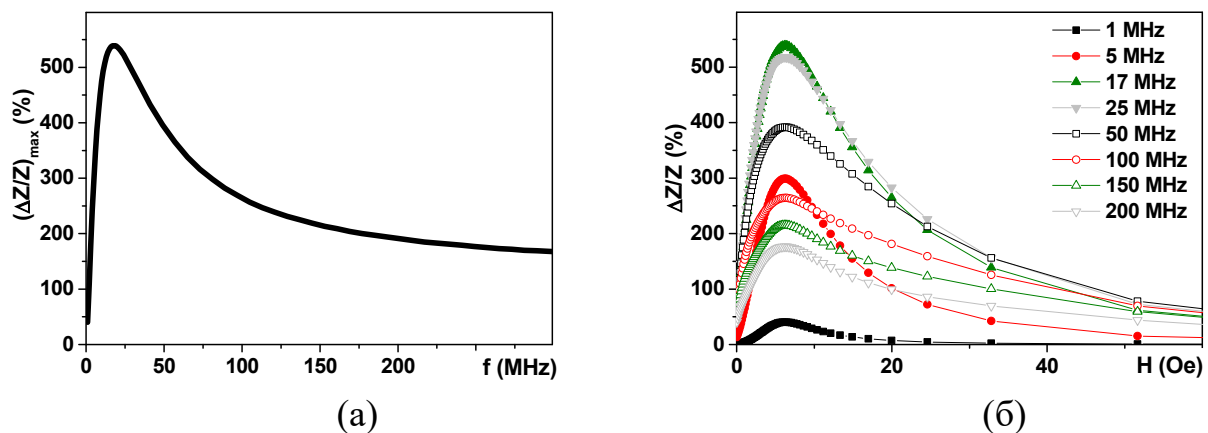


Рисунок 1 – Результаты численного расчета зависимости МИ-соотношения тонкой пленки структуры типа $[FeNi]/Cu/[FeNi]$ (а); Результаты численного расчета МИ-соотношения тонкой пленки в области положительных полей при варьировании частоты переменного тока (б).[5]

Помимо оценки чувствительности элементов, есть вторая часть задачи построения цифровой модели физического процесса – моделирование объекта исследования. В нашем случае таким объектом является коронарный сосуд в движущимися по нему частицами маггемита, которые при наличии внешнего магнитного поля создают поля рассеяния, изменяя его распределение результирующее распределение полей в пространстве. Детали расчета, а также описание методики и детализированный анализ результатов представлен в работе [6]. На рис. 2 (вставка) показана индивидуальная геометрия коронарной артерии с четырьмя анализируемыми сечениями (линейными срезами, перпендикулярными локальной оси сосуда в выбранной точке): два сечения в почти прямолинейных участках (2 и 4) с разными диаметрами сосуда и два других сечения в области изгиба. Для каждого сечения проводился отдельный расчет. Поэтому внешнее магнитное поле всегда прикладывалось параллельно оптимальному положению поперечного сечения.

Согласно результатам расчета, относительное изменение магнитного поля вблизи кровеносного сосуда составляет порядка 10^{-3} - 10^{-4} % при концентрации МНЧ около 2 масс. %. Наибольшая чувствительность датчиков МИ на основе тонких пленок FeNi/Ti, FeNi/Ag, FeNi/Cu отмечена при значениях внешнего поля, близкого по величине к полю анизотропии датчика (рис.1) - 5 Э. Вблизи данной точки величина полей рассеяния вокруг сосуда будет близка к значению 0,035 Э.

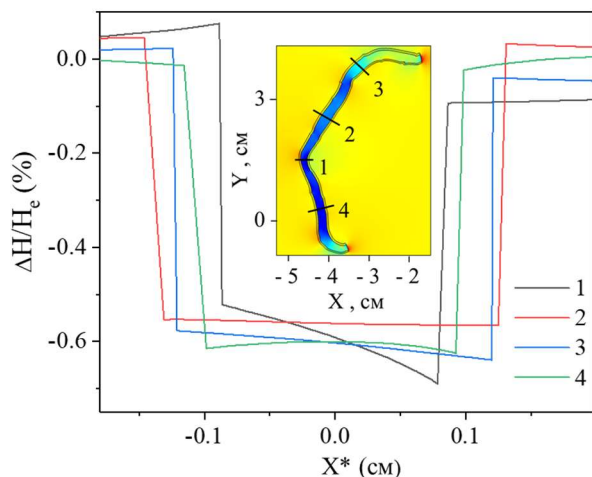


Рисунок 2 – Распределение относительного магнитного поля, соответствующее сечениям, рассчитанное в конкретной геометрии коронарной артерии для конкретного пациента, полученное с помощью ангиографии. X^* - координата разреза, отсчитываемая от локального центра сосуда. На вставке - геометрия сосуда и сечения, по которым проведены основные кривые. [6].

Такие результаты означают, что датчик МИ с чувствительностью 10^{-5} - 10^{-6} Э имеет потенциал детектировать изменение диаметра сосуда порядка нескольких процентов и меньше. Именно этот факт и является ключевым результатом проделанной работы, подтверждающий возможность разработки таких датчиков и демонстрирующий возможности численного моделирования в части оценки перспектив реализации новых разработок.

Данный результат был получен путем разработки двух численных моделей. Их объединение в одну модель, фактически, будет являться полноценным цифровым двойником, выполняющим функции виртуального эксперимента при проработке гипотезы использования МИ в области предложения задачи магнитного биодетектирования.

Заключение

В данной работе продемонстрирована возможность применения численных методов в исследованиях эффекта магнитного импеданса и анализе возможностей его прикладного использования в части магнитного биодетектирования.

Результаты показали, что датчик МИ имеет потенциал детектировать изменение диаметра сосуда порядка нескольких процентов и меньше.

Представленная модель может также быть использована для поиска оптимальных материалов и исследования гемодинамики сосуда.

Аналогичный подход был применен к разработке датчиков малых давлений, а также идентификации положения магнитных объектов в области вокруг датчика. Следующий шаг - объединение моделей датчика и исследуемого объекта в полноценный цифровой двойник, а также приближение модели (особенности геометрии, неоднородности полей) к реальным измерениям.

Библиографический список

1. Анашко А. А., Семиров А. В., Гаврилюк А. А. Магнитоимпедансный эффект в аморфных FeCoMoSiB // Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73, № 4. – С. 49 – 52.

2. Kraus L. GMI modeling and material optimization // Sensors and Actuators A: – 2003. – V. 106. – №. 1-3. – P. 187-194.

3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. – Том VIII: Электродинамика сплошных сред. – М. : Наука, 1982. – С. 299.

4. Blyakhman F. A., Buznikov N. A., et al. Mechanical, Electrical and Magnetic Properties of Ferrogels with Embedded Iron Oxide Nanoparticles Obtained by Laser Target Evaporation: Focus on Multifunctional Biosensor Applications // Sensors. – 2018. – V. 18. – №. 3. – P. 872.

5. Buznikov N. A., Kurlyandskaya G. V. Magnetoimpedance in symmetric and non-symmetric nanostructured multilayers: A theoretical study // Sensors, — 2019. — V. 19. №. 8. — 1761.

6. Kozlov N. V., Chlenova A. A., Volchkov S. O. & Kurlyandskaya G. V., The study of magnetic permeability and magnetoimpedance: Effect of ferromagnetic alloy characteristics // AIP: Conference Proceedings. – 2020. – V. 2313. – P. 030050 (6 pp.).

7. Kozlov N. V., Volchkov S. O., Blyakhman F. A., Chestukhin V. V., Kurlyandskaya G. V., The Modeling of Magnetic Detection of Iron Oxide Nanoparticles in the Stream of Patient-Specific Artery With Stenotic Lesion: The Effects of Vessel

G
e
o
m
e
t
r
y

a
n
d

P
e