

УДК 621.3

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ МАГНИТОПРОВОДА НА ОТКЛИК ПРИ ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

¹Арутюнов Ю.А., ²Дробязко А.А., ²Крылов А.И.,

³Чащин Е.А., ²Шашок П.А., ³Шилов И.В.

¹ФГБУ «Научно-клинический центр спортивной медицины федерального медико-биологического агентства России», Москва, e-mail: double-spiral@yandex.ru;

²ООО «Двойная спираль», Москва, e-mail: omegaversion@yandex.ru;

³ФГБОУ ВО «Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева», Ковров, e-mail: kanircha@list.ru

Результаты современных исследований показали, что миокард сердца имеет топологию Мебиуса. Это делает актуальным прогнозирование работы сердца по результатам «визуализации» его внутренней структуры. Работа направлена на решение проблемы совершенствования существующих методов диагностики, основанных на регистрации наиболее информативного параметра электромагнитного поля сердца, описывающего функциональный статус миокарда. В статье приведены методика проведения эксперимента и результаты исследований на образцах – имитаторах влияния топологии магнитопровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии. На образцах-имитаторах, выполненных в виде замкнутых стержневых сердечников, в которых топология замкнутого магнитного контура при одинаковой длине его средней линии и одинаковом квадратном сечении стержней выполнена в двух топологических формах, исследовано влияние топологии магнитопровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии. По результатам экспериментального исследования показано, что разница в уровне потерь в базовом и мебиусном варианте магнитопровода достигает 15%.

Ключевые слова: миокард сердца, топология Мебиуса, магнитопровод, электромагнитное поле

INFLUENCE OF TOPOLOGY OF THE MAGNETIC CONDUCTOR ON THE RESPONSE IN CASE OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC INFLUENCE

¹Arutyunov Yu.A., ²Drobyazko A.A., ²Krylov A.I., ³Chaschin E.A.,

²Shashok P.A., ³Shilov I.V.

¹Scientific-Clinical Center of Sports Medicine Federal Medical-Biological Agency of Russia, Moscow, e-mail: double-spiral@yandex.ru;

²LLC «Double spiral», Moscow, Russia, e-mail: omegaversion@yandex.ru;

³Kovrov State Technological Academy, Kovrov, e-mail: kanircha@list.ru

The results of modern studies have shown that the myocardium of the heart has a Möbius topology. This makes the actual prediction of the heart as a result of «visualization» of its internal structure. The work is aimed at solving the problem of improving existing diagnostic methods based on registering the most informative parameter of the electromagnetic field of the heart, which describes the functional status of the myocardium. The paper presents the methodology of the experiment and the results of research on samples simulators influence on the topology of the magnetic response of the external electromagnetic influences. It is shown by the results of an experimental study on the effect of magnetic samples simulators topology on response by external electromagnetic effects of the difference in the level of losses in the core and the magnetic mebiusnom variant is 15%.

Keywords: myocardium of the heart, the topology of the Möbius, magnetic, electromagnetic field

Известно, что в современной методологии анализа сложных систем, при рассмотрении динамических моделей и построении общих законов поведения и управления, с целью нахождения новых закономерностей и характеристик сложной системы, предлагается проведение аналогий между процессами, относящимися к различным областям науки. В частности, результаты современных исследований показали, что характеристики физико-механики сердечно-сосудистой системы, близкие к результатам физиологических экспериментов достигаются в приближе-

нии, что миокард сердца имеет топологию Мебиуса [1, 7, 8]. Это позволяет, для моделирования электрической активности возбудимых волокон сердца, использовать приближение в виде магнитопровода, выполненного из ферромагнитного материала в виде тора с поверженностью Мебиуса и локальным расположением катушки намагничивания [2, 3, 5]. Для уменьшения затрат на ревизию магнитопроводов с точки зрения развития дефектов как аналогов патологий актуальным представляется исследовать отклик при внешнем электромагнитном воздействии.

Научная новизна

Целью исследований является экспериментальная проверка на образцах-имитаторах возможности оценки отклонения топологии магнитопровода от топологии тора с поверхностью Мебиуса по результатам изменения активного сопротивления и индуктивности катушки намагничивания при внешнем электромагнитном воздействии с частотой 50–15000 Гц различной интенсивности. Полученные результаты можно использовать для моделирования дефектов магнитопровода как аналогов патологий миокарда сердца, а также использовать для формирования эталонных сигналов при различных повреждениях исследуемых образцов.

Материалы и методы исследования

Для оценки влияния неориентированной поверхности выполним, в частотном диапазоне 50–15000 Гц, в соответствии с известной методологией [6] определение сравнительных показателей электромагнитных свойств магнито-мягких ферромагнетиков при использовании их в качестве материалов замкнутых стержневых сердечников, в которых топология замкнутого магнитного контура при одинаковой длине его средней линии и одинаковом квадратном сечении стержней выполнена в двух топологических формах: к – контрольный образец: внешние образующие всех стержней лежат в общих плоскостях (стандартное исполнение, как у обычных сердечников); м – экспериментальный образец: образующие двух замыкающих стержней (двух ярём) перекручены вокруг осей стержня каждая на 90 градусов, образуя, в совокупности друг с другом и с недеформированными стержнями поверхности Мебиуса правого и левого спинов в системе замкнутого магнитопровода.

Магнитопровод экспериментальных образцов выполнен из ферромагнитного материала типа Magnifer с габаритными размерами: внутренний радиус 40 мм, внешний радиус 50 мм, сечение прямоугольное 10 мм. Ток заданной частоты f и силы тока протекает через катушку с числом витков 100. Расчетная электрическая схема эксперимента представлена на рис. 1.

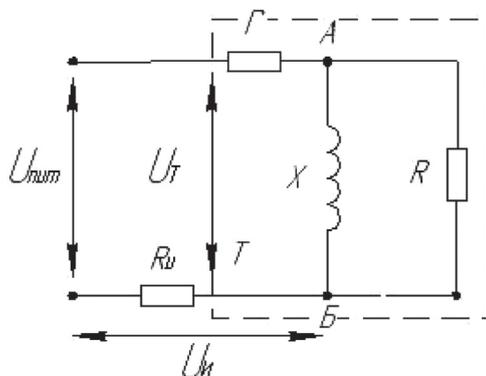


Рис. 1. Расчетная электрическая схема эксперимента

Условные обозначения: r – активное сопротивление намагничивающей обмотки катушки (сопротивление меди); $R_{и}$ – калиброванное активное сопротивление для измерения тока; G_M^k, G_M^m – активная проводимость катушки, обусловленная вихревыми токами; $G_{Г}^k, G_{Г}^m$ – активная проводимость катушки, обусловленная потерями на перемагничивание (магнитным гистерезисом); $G^k = G_{Ф}^k + G_{Г}^k, G^m = G_{Ф}^m + G_{Г}^m$ – активная проводимость намагничивающей катушки; B^k, B^m – индуктивная проводимость намагничивающей катушки; L^k, L^m – индуктивность намагничивающей катушки. В принятых обозначениях верхний индекс к, м соответствует данным при использовании контрольного (к) и мебиусного (м) сердечника

Величина относительного изменения составляющей активного сопротивления намагничивающей катушки, обусловленная свойствами мебиусного сердечника по сравнению с составляющей активного сопротивления намагничивающей катушки, обусловленной свойствами контрольного сердечника:

$$\delta = \frac{R^k - R^m}{R^k} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Исходные расчетные соотношения получаются из двух базовых выражений для комплекса электрического импеданса \dot{Z}_{AB} и для полного электрического импеданса катушки \dot{Z}

$$\dot{Z}_{AB} = \frac{RX^2}{X^2 + R^2} + \frac{R^2 X}{X^2 + R^2} j; \quad (2)$$

$$\dot{Z} = \left(\frac{RX^2}{X^2 + R^2} + r \right) + \frac{R^2 X}{X^2 + R^2} j, \quad (3)$$

где R – активная составляющая сопротивления участка АБ (рис. 1), обусловленная свойствами сердечника; X – реактивная (индуктивная) составляющая сопротивления участка АБ, обусловленная свойствами сердечника.

Перепишем выражения (2), (3) в виде системы алгебраических уравнений

$$\begin{cases} Z^2 = \left(\frac{RX^2}{X^2 + R^2} + r \right)^2 + \left(\frac{R^2 X}{X^2 + R^2} \right)^2; \\ \frac{RX^2}{X^2 + R^2} + r = Zk, \end{cases} \quad (4)$$

где $k = \cos(2\pi f\tau)$ – коэффициент мощности катушки, определяемый через установленный параметр f и измеренное значение временного сдвига τ между величинами $U_{т}$ и $U_{и}$.

Найдем в общем виде решение системы (4):

$$R = \frac{Z^2 - 2Zkr + r^2}{Zk - r}; \quad X = \frac{Z^2 - 2Zkr + r^2}{Z\sqrt{1 - R^2}}. \quad (5)$$

Модуль Z полного электрического импеданса катушки выражается через измеряемые величины $U_{т}$, $U_{и}$, $R_{и}$ следующим образом

$$Z = \frac{U_{т}}{U_{и}} \cdot R_{и}. \quad (6)$$

Модуль индуктивного сопротивления катушки намагничивания:

$$X = 2\pi fL, \quad (7)$$

где L – индуктивность катушки намагничивания с сердечником.

Из выражения (4) с учетом (5)–(7) получим:

$$L = \frac{\left(\frac{U_T}{U_H} R_H\right)^2 - 2\left(\frac{U_T}{U_H} R_H\right)kr + r^2}{2\pi f \left(\frac{U_T}{U_H} R_H\right) \sqrt{1 - R^2}} \quad (8)$$

Тогда выражение (4) принимает вид:

$$R = \frac{\left(\frac{U_T}{U_H} R_H\right)^2 - 2\left(\frac{U_T}{U_H} R_H\right)kr + r^2}{\left(\frac{U_T}{U_H} R_H\right)k - r} \quad (9)$$

Формулы (8) и (9) являются базовыми расчетными формулами.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты измерений и расчетов (1)–(9) приведены на рис. 2–4. На рис. 2, 3 приведены зависимости активного сопротивления

потерь R и индуктивности L от частоты, форма которых является характерной и не изменяется во всем диапазоне 0,005...0,18 А протекающего через катушку силы тока.

Видно, что с ростом частоты сопротивление R возрастает, а индуктивность L уменьшается. Характер и форма изменения зависимостей, приведенные на рис. 2, при изменении силы остаются аналогичными во всем диапазоне изменения силы тока текущего через катушку (рис. 3).

Известно, что активное сопротивление и индуктивность не должны существенно изменяться с изменением частоты [4]. Таким образом, характер зависимости активной и индуктивной составляющих сопротивления катушки от частоты, представленный на рис. 2, 3, свидетельствует о том, что в результате измерений и расчетов, произведенных в соответствии с канонической схемой

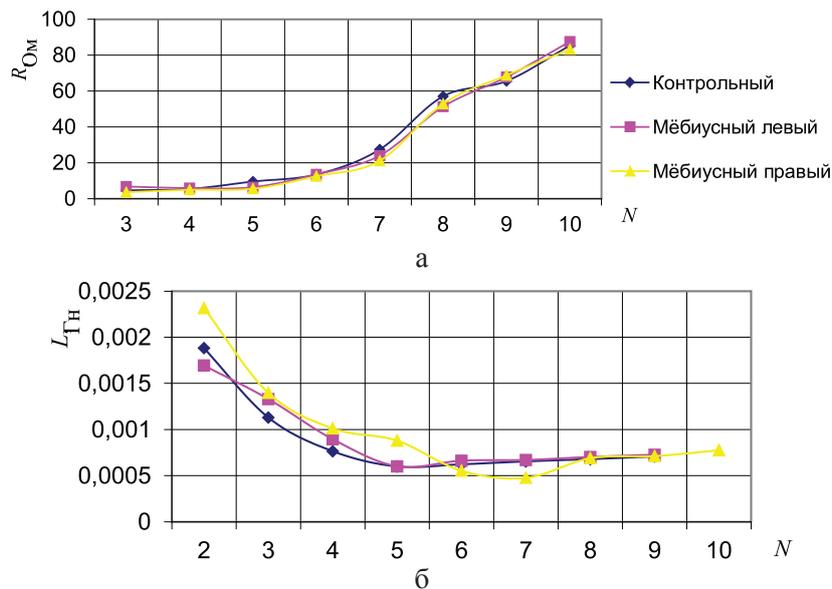


Рис. 2. Зависимость изменения активной (а) и индуктивной (б) составляющих сопротивления намагничивающей катушки при $I = 0,005$ А, N – частота равная значениям: 1 – 50 Гц; 2 – 100 Гц; 3 – 250 Гц; 4 – 500 Гц; 5 – 1000 Гц; 6 – 2500 Гц; 7 – 5000 Гц; 8 – 10000 Гц; 9 – 12000 Гц; 10 – 15000 Гц

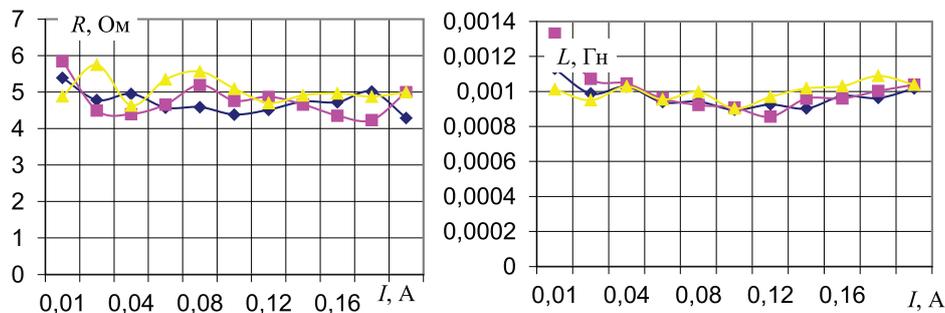


Рис. 3. Зависимость изменения активной (а) и индуктивной (б) составляющих сопротивления намагничивающей катушки при $f = 500$ Гц

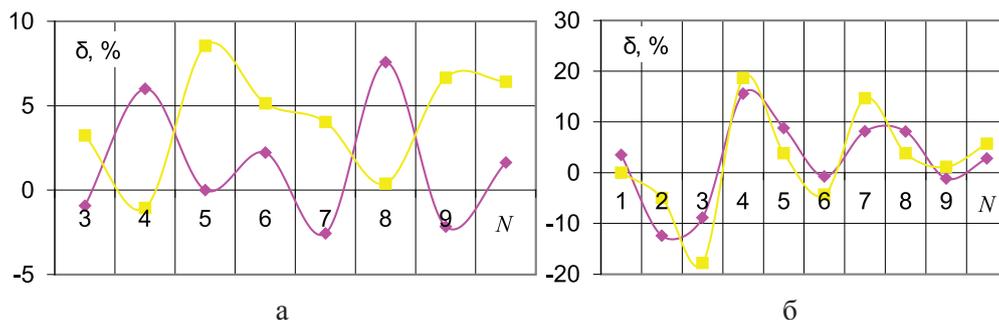


Рис. 4. Относительная разница потерь:
 $a - I = 0,01 A$; $b - I = 0,17 A$

замещения катушки, по всей видимости, не учтена межвитковая емкость обмотки катушки, обуславливающая уменьшение расчетного значения индуктивности с увеличением частоты, по мере удаления частоты от ее резонансного значения. Это подтверждается характером зависимости, представляющим собою ниспадающую ветвь «резонансного колокола». Однако, поскольку целью методики эксперимента является относительное сравнение свойств магнитопроводов с различной топологией, выявленная проблема верифицируемости расчетной схемы не уменьшает ценности приведенных на графиках экспериментальных данных. Рассмотрим влияние топологии магнитопровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии (рис. 4).

Видно, разница в уровне потерь в базовом и мебиусном варианте магнитопровода зависит от частоты и может достигать 15%, что превышает погрешность измерений. Это позволяет предположить связь с процессами, связанными с распространением магнитного потока в магнитопроводе. Косвенно это подтверждается тем, что разница в уровне потерь зависит как от спина мебиусного магнитопровода, так и от уровня магнитного потока в магнитопроводе, а также тем, что с увеличением тока намагничивания и, как следствие, магнитного потока, наблюдается рост разницы и унижается чувствительность от спина магнитопровода.

Заключение

Показано по результатам экспериментального исследования на образцах имитаторах влияния топологии магни-

топровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии, что разница в уровне потерь в базовом и мебиусном варианте магнитопровода достигает 15%. Это позволяет предположить, что выполнение оценки функционального резерва деятельности сердца может быть определено экспериментально по результатам существующих методов диагностики в условиях внешнего электромагнитного воздействия путем сравнения соответствия топологии миокарда и топологии Мебиуса.

Список литературы

1. Арутюнов Ю.А. и др. Влияние топологии Мебиуса на распространение в магнитопроводе магнитного поля / Ю.А. Арутюнов, И.Н. Возовиков, Е.А. Чашин, Л.И. Шеманаева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 5; URL: <http://www.science-education.ru/128-22137>.
2. Арутюнов Ю.А. и др. Влияние топологии магнитопровода на приведенные характеристики магнитомягких ферромагнетиков / Ю.А. Арутюнов, И.Н. Возовиков, Е.А. Чашин, Л.И. Шеманаева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2; URL: www.science-education.ru/129-23144.
3. Арутюнов Ю.А. и др. Влияние топологии листа Мебиуса на магнитные характеристики поля вне магнитопровода / Ю.А. Арутюнов, И.Н. Возовиков, А.А. Митрофанов, Е.А. Чашин, Л.И. Шеманаева, С.Н. Живаев // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 7. – С. 9–14.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1964. – 750 с.
5. Грачев С.В. Новые методы электрокардиографии // под ред. С.В. Грачева, Г.Г. Иванова, А.Л. Сыркина. – М.: Изд-во «Техносфера», 2007. – 549 с.
6. Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 208 с.
7. Хаимзон И.И., Бондарчук Е.П. Электрофизиологическая модель сердца // Клиническая информатика и Телемедицина. – 2011. – Т. 7, Вып. 8. – С. 10–15.
8. Buckberg G.D. Basic science review: The helix and the heart // The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. – 2002. – Vol. 124. – № 5. – P. 75–85.