

УДК 57.087

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ ЛИСТА МЕБИУСА НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ВНЕ МАГНИТОПРОВОДА

¹Арутюнов Ю.А., ²Возовиков И.Н., ³Митрофанов А.А., ³Чащин Е.А.,
³Шеманаева Л.И., ⁴Живаев С.Н.

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

²ФГБУ «Центральная клиническая больница восстановительного лечения» филиал «Медико-санитарной части № 169 Федерального медико-биологического агентства России», Лобня, e-mail: info5773712@yandex.ru;

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

⁴ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, e-mail: ser_yoga@inbox.ru

Работа направлена на решение проблемы совершенствования существующих методов МКГ-диагностики, основанных на регистрации наиболее информативного параметра электромагнитного поля сердца, описывающего функциональный статус миокарда. В приближении гипотезы о влиянии топологии магнитопровода на его приведенные характеристики, в области малых интенсивностей магнитных полей, сопоставимых с влиянием собственной намагниченности структуры, миокард сердца рассмотрен как совокупность магнитных доменов, которые связывают микроскопические магнитные характеристики с макроскопическими свойствами. Предложен алгоритм анализа влияния топологии магнитопровода на распространение электромагнитного поля, и разработано в среде прикладного программирования Delphi, программное средство, моделирующее с учетом влияние топологии магнитопровода распространение электромагнитного поля. Показана качественная возможность характеристики функционального статуса миокарда по результатам измерения напряженности магнитного поля.

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

THE EFFECT OF TOPOLOGY OF THE MOBIUS STRIP ON THE MAGNETIC CHARACTERISTICS OF THE FIELD OUTSIDE THE MAGNETIC CIRCUIT

¹Arutyunov Yu.A., ²Vozovikov I.N., ³Mitrofanov A.A., ³Chaschin E.A.,
³Shemanaeva L.I., ⁴Zhivaev S.N.

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

²Central Clinical Hospital Rehabilitation branch Medical sanitarnitarnoy part number 169 the Federal Medical-Biological Agency of Russia, Lobnya, e-mail: info5773712@yandex.ru;

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

⁴Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovskiy, e-mail: ser_yoga@inbox.ru

The work is aimed at solving the problem of improving the existing methods of diagnosis of ICH, based on registration of the most informative parameter of the electromagnetic field of the heart, which describes the functional status of the myocardium. Heart Myocardium considered as a collection of magnetic domains which bind the microscopic magnetic characteristics and macroscopic properties. It has been done with the approximation of the hypothesis of the magnetic topology influence on its reduced characteristic in the area with low intensity magnetic fields comparable to own magnetization influence of structure. An analysis algorithm of influence of the magnetic topology on the distribution of the electromagnetic field has been proposed. Using Delphi application programming environment developed a software tool that models taking into account the effect of the magnetic topology distribution of the electromagnetic field. Qualitative possible to characterize the functional status of the myocardium by measuring the magnetic field strength was shown.

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

Болезни миокарда занимают центральное место в патологии сердца, поскольку практически любая недостаточность деятельности сердечно-сосудистых систем связана именно с мышечной недостаточностью миокарда, причем не только в случаях его самостоятельного заболевания. Исследования, выполненные ранее, показали [7, 12–14],

что изменение формы миокардиальных волокон, их эпи- и эндокардиальная ротация, нарушение работы ионных каналов в местах с недостаточной перфузией закономерно приводят к изменениям в регистрируемом магнитном поле сердца. Однако магнитокардиография (МКГ) достаточно специфична и, несмотря на высокую чув-

ствительность по отношению к изменениям миокарда, в том числе и в случаях, когда анализ ЭКГ неинформативен, а проведение нагрузочных проб противопоказано, имеет существенные недостатки, связанные в первую очередь с тем, что анализ результатов МКГ выполняется, в основном, на основании визуальной классификации карт, путем сравнения их с неким «образом» нормальной карты. Т.е. анализ результатов МКГ основывается на наиболее информативных, но плохо формализуемых признаках и правилах. Также визуальный анализ магнитокардиографических карт имеет существенные недостатки, свойственные визуальной классификации любых медицинских изображений, а именно: необходимость довольно длительного периода обучения и относительно слабая воспроизводимость результатов.

Основываясь на современных представлениях о том, что миокард сердца имеет топологию Мебиуса [5, 6, 10], было высказано теоретическое предположение [1], что для каждого момента времени кардиоцикла результат регистрации магнитных полей отражает функциональный статус миокарда, с точки зрения соответствия топологии исследуемого миокарда и топологии Мебиуса. Исследования, выполненные нами ранее [2], подтвердили гипотезу о влиянии топологии Мебиуса на распространение магнитного поля в магнитопроводе, что позволяет сделать вывод о высокой информативности регистрации напряженности магнитного поля и возможности его использования в целях диагностики и прогнозирования развития патологий в сердечно-сосудистой системе. Это делает актуальным исследование возможности характеристики функционального статуса миокарда по результатам измерения напряженности магнитного поля.

Научная новизна

Известно, что меридиан сердца [5] представляет собой тор с поверхностью Мебиуса. Учитывая, что характерные значения магнитных полей сердца составляют порядка 50 пкТл [4], предложенная нами математическая модель строилась в приближении гипотезы о влиянии топологии магнитопровода на его приведенные характеристики, в области малых интенсивностей магнитных полей, сопоставимых с влиянием собственной намагниченности структуры. Таким образом, в работе миокард сердца рассмотрен как совокупность магнитных доменов, которые связывают микроскопические магнитные характеристики с макроскопическими свойствами. Это делает актуальным с целью решения задачи оцен-

ки функционального резерва деятельности сердца охарактеризовать функциональный статус миокарда по результатам измерения напряженности магнитного поля, выполнить анализ влияния топологии магнитопровода на распространение магнитного поля вне магнитопровода.

Материалы и методы исследования

По аналогии с известной дипольной моделью сердца [5], на основании взаимосвязи электрического и магнитного полей принимаем, что магнитостатическое взаимодействие отдельных компонентов внутри объема намагниченного тела приводит к возникновению собственной магнитостатической энергии этого тела, величина которого может быть определена как

$$U = 0,5 \sum_{i=1}^n m_i \Phi_i, \quad (1)$$

где Φ_i – магнитный потенциал, создаваемый всеми фиктивными магнитными зарядами $\pm m_i$, кроме i -го в месте расположения i -го заряда. Если принять, что магнитные заряды распределены в пространстве с плотностью ρ , тогда выражение (1) удобно записать как

$$U = -0,5 \iiint_V \vec{J}_s \vec{H}_m dV, \quad (2)$$

где V – объем магнетика, J_s – намагниченность, H_m – напряженность.

Видно, что для пространства, заполненного магнитным материалом с намагниченностью J_s , магнитостатическое взаимодействие отдельных элементов объема внутри намагниченного тела приводит к наличию собственной магнитостатической энергии этого тела, и величина поля рассеяния H_m ведет к образованию областей самопроизвольного намагничивания, т.е. доменной структуры. Это позволяет принять миокард сердца как магнитную доменную структуру – совокупность областей в магнитной подсистеме магнитных материалов, которые связывают микроскопические магнитные характеристики с их макроскопическими свойствами. Таким образом, при моделировании магнитного поля будем считать, что процессы намагничивания и перемагничивания определяются свойствами доменной структуры. Оценим влияние доменной структуры на распространение магнитного поля. Для оценки влияния неориентированной поверхности на распространение в ее объеме магнитного поля принимаем энергию анизотропии и обменных взаимодействий пренебрежимо малыми. Также пренебрегаем шириной доменных границ. С учетом сделанных упрощений, в расчетной модели принимаем, что магнитопровод (рис. 1, поз. 1) выполнен из ферромагнитного материала в виде тора с поверхностью Мебиуса и локальным расположением катушки намагничивания (рис. 1, поз. 2).

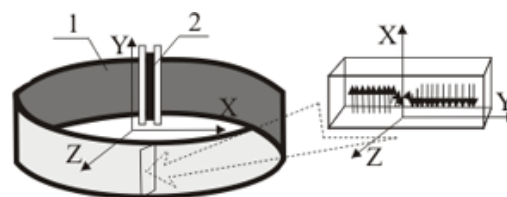


Рис. 1. Модель магнитопровода

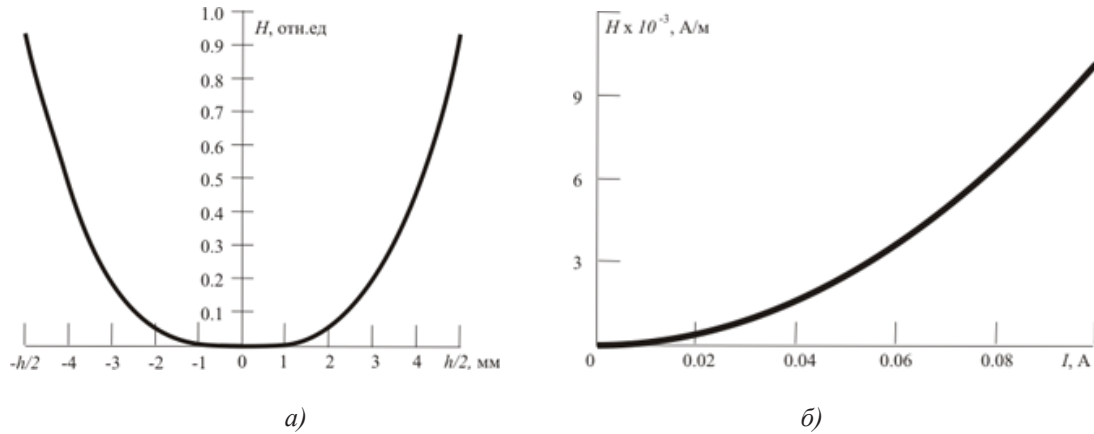


Рис. 2. Распространение электромагнитной волны: а – по сечению магнитопровода; б – в зависимости от силы тока I

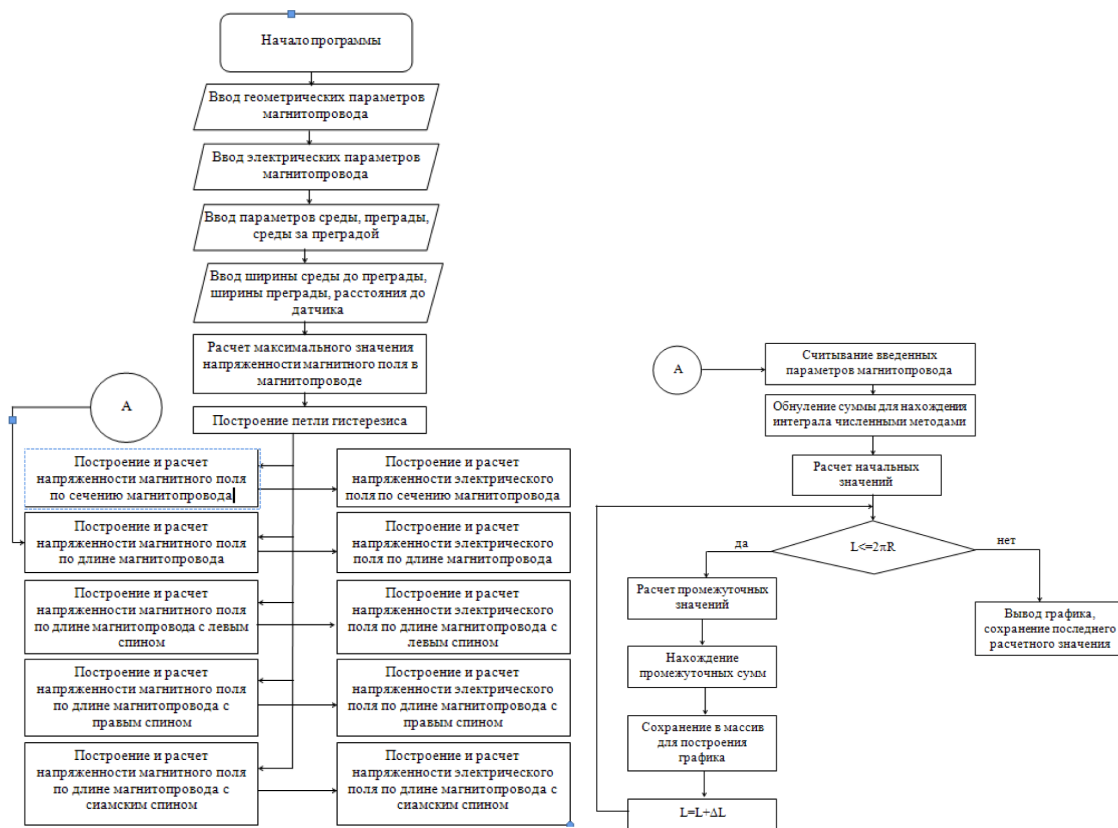


Рис. 3. Блок-схема

Известно, что ферромагнитные тела состоят из областей самопроизвольного намагничивания, векторы намагниченности которых направлены в различные стороны, причем система в целом будет обладать минимумом энергии, если области будут намагничены антипараллельно. Однако, если при решении задачи визуализации внутренней структуры миокарда сердца ферромагнитное тело поместить во внешнее магнитное поле, то под действием этого поля векторы намагниченности становятся параллельны [3]. По-

этому в модели принимаем, что векторы намагниченности направлены в одну сторону и «механически» меняют свое направление при прохождении «зоны Мебиусовой закрутки».

С учетом сделанных допущений и упрощений выполним анализ распространения магнитного поля в торроидальном магнитопроводе с топологией Мебиуса и традиционном торроидальном исполнении. В расчетах принимали, что магнитопровод выполнен из ферромагнитного материала типа Magnifer

с габаритными размерами: внутренний радиус – 40 мм, внешний радиус – 50 мм, сечение прямоугольное 10 мм. Ток частотой 50 Гц и силой до 1 А, вызывающий МДС, протекает через катушку с числом витков 100 (см. рис. 1).

Принимаем, что напряженность магнитного поля задается параметрами тока, текущего через катушку (см. рис. 1):

$$H = I \cdot w/h, \quad (3)$$

где h – ширина магнитопровода; I – сила тока, текущего через катушку; w – число витков.

Тогда распределение магнитного поля по сечению удобно определить относительно средней линии магнитопровода:

$$H_i = \left| \int_0^i H di \right|, \quad (4)$$

где i – шаг по сечению магнитопровода – $h/2$, $(-h/2 + i), \dots, 0, \dots, h/2$.

Распределение магнитной индукции по сечению соответственно:

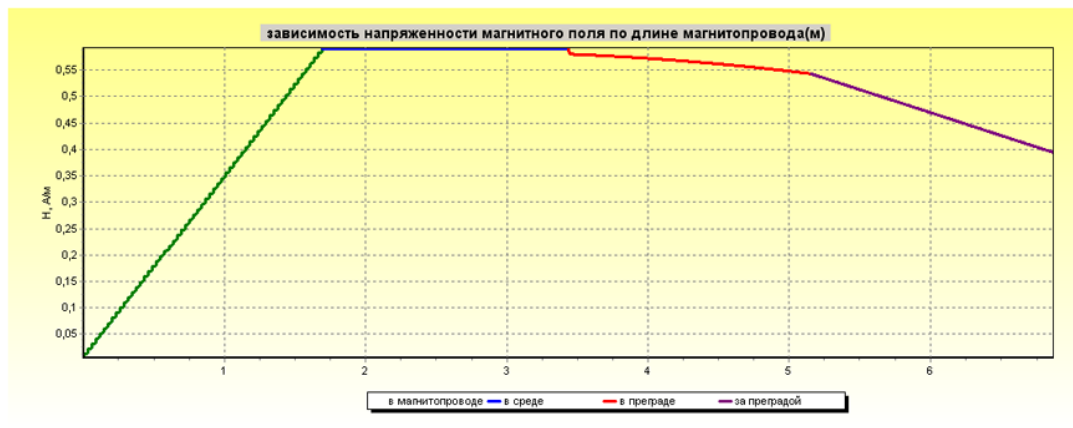
$$B_i = \mu_0 \mu H_i, \quad (5)$$

где B – магнитная индукция, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная составляющая, μ – магнитная проницаемость:

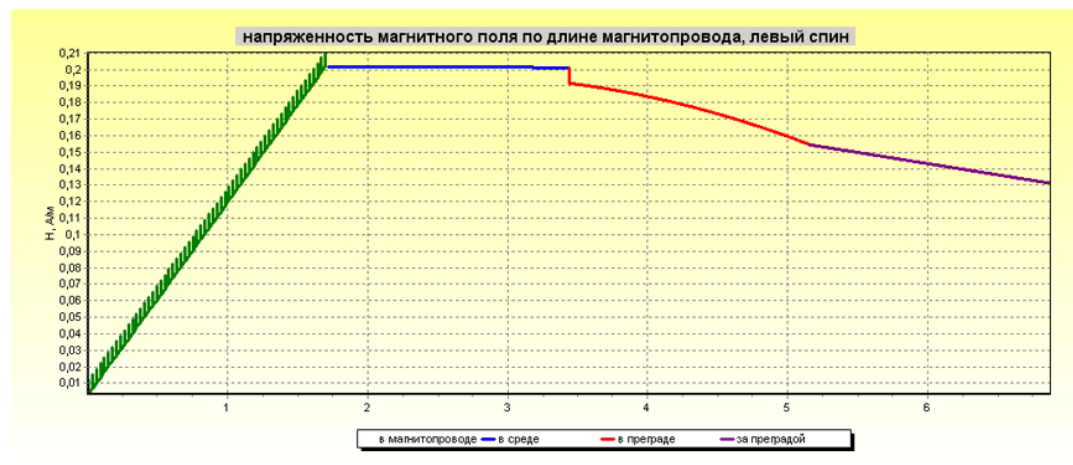
$$\mu = LI/0,4\pi Sw^2, \quad (6)$$

где S – площадь сечения магнитопровода; L – индуктивность.

Результаты расчета, демонстрирующие распространение магнитного поля по сечению магнитопровода и зависимость максимального значения напряженности от силы тока приведены на рис. 2. Видно, что напряженность поля по средней линии магнитопровода намного меньше напряженности поля на его поверхности (рис. 2, а). Неравномерный характер распределения электромагнитной волны качественно соответствует известным представлениям [11] и связан с возникновением магнитного поверхностного эффекта, вызванного затуханием электромагнитной волны. Также видно, что с ростом силы тока, текущего через катушку (рис. 2, б), напряженность магнитного поля нелинейно возрастает и на принятом расчетном интервале силы тока до 0,1 А находится на начальном нелинейном участке, что делает значимым влияние потерь в магнитопроводе.



а)



б)

Рис. 4. График изменения напряженности магнитного поля:
а – базовая топология магнитопровода; б – топология Мебиуса

Пренебрегая потерями на вихревые токи, будем считать, что при периодическом намагничивании ферромагнитного материала потери в сердечнике обусловлены потерями на гистерезис. Оценим влияние гистерезиса методом Релея [11]. Для оценки уровня потерь на гистерезис определим намагничиваемость:

$$J = (\mu + \chi H_{\max})H \pm \frac{\chi}{2}(H^2 - H_{\max}^2), \quad (7)$$

где χ – магнитная восприимчивость, H_{\max} – наибольшее значение напряженности, достигаемое в материале сердечника (см. рис. 2, б).

Тогда магнитная индукция определяется

$$B = \mu_0 \mu J / K_m, \quad (8)$$

где K_m – коэффициент намагничиваемости материала сердечника.

Будем считать, что физические потери на гистерезис обусловлены доменной структурой магнитопровода (см. рис. 1). Также следует отметить, что значи-

тельно большая напряженность поля на периферии магнитопровода, по сравнению с его средней плоскостью, показывает необходимость оценить, как влияет при закручивании магнитопровода в петлю Мебиуса то, что внутренний диаметр переходит во внешний и наоборот. Описание поверхности тора в традиционном исполнении и с поверхностью Мебиуса выполним по аналогии с описанием геометрии зацепления кольцевых винтовых передач [9]:

$$\begin{aligned} x_{b,j} &= [R + h \cos(\phi_b)] \cos(p\phi_j) \\ y_{b,j} &= [R + h \sin(\phi_b)] \sin(p\phi_j), \\ z_{b,j} &= h \cos(\phi_b) \end{aligned} \quad (9)$$

где x, y, z – проекция на координаты (см. рис. 1); b, j – индексы дискретизации по осям x, y соответственно; R, r – внешний и внутренний радиус соответственно; ϕ_b, ϕ_j – углы закручивания в направлении осей x, y соответственно; p – шаг.

$$p = \sqrt{[(2R + r \cos(2\pi)) \cos(4r\pi)]^2 + [(2R + h \sin(2\pi)) \sin(4r\pi)]^2}.$$

При скручивании тора в поверхность Мебиуса деформация доменов происходит в плоскости xu . Тогда, полагая, что домены ориентированы в плоскости xu в направлении периферии, можно записать:

$$\begin{aligned} l_{cpx} &= (l_{cp} + h \cos \phi_b) \cos(l_{cp} \phi_j) \\ l_{cpy} &= (l_{cp} + h \sin \phi_b) \sin(l_{cp} \phi_j), \\ l_{cpz} &= l_{cp} \end{aligned} \quad (10)$$

где l_{cp} – длина средней линии магнитопровода; $l_{cpx}, l_{cpy}, l_{cpz}$ – проекция средней линии магнитопровода на оси x, y, z соответственно.

Алгоритм расчета (1–10) приведен на рис. 3.

Результаты исследования и их обсуждение

Видно (рис. 4), что изменение топологии, при прочих равных начальных условиях, приводит к изменению напряженности магнитного поля на периферии магнитопровода и как следствие величины напряженности магнитного поля на удалении, в том числе за преградой, в качестве которой, в приведенных графиках рассмотрен такой неферромагнитный материал, как кожа. Видно, что максимальное значение напряженности магнитного поля для торроидального магнитопровода базовой топологии и мебиусной топологии различается в 2,9 раза, с 0,59 А/м до 0,20 А/м. Это приводит к изменению напряженности магнитного поля на удалении от магнитопровода, на расстоянии за преградой – также в 3 раза, с 0,39 А/м до 0,13 А/м.

Большинство высокочувствительных магнитометров измеряют индукцию магнитного поля, характер изменения индукции по мере удаления от магнитопровода

аналогичен рис. 4, и величина индукции на расстоянии за преградой также изменяется в 3 раза, с 4,95 Тл до 1,65 А/м. Применительно к миокарду сердца это позволяет предположить о возможности функциональной диагностики путем измерения интенсивности магнитного поля, которое различается для нормального (скрученного миокарда) и патологий.

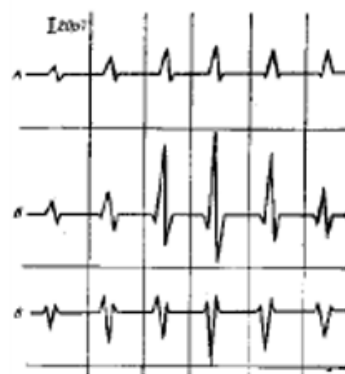


Рис. 5. Усредненные показатели QRS комплекса МКГ здоровых людей (А) с гипертрофией левого желудочка (Б) и с инфарктом миокарда (В) [8]

Вывод о влиянии патологии миокарда на напряженность магнитного поля коррелирует с известными результатами [8], также показывающими, что амплитуда сигнала регистрируемого магнитного поля здорового и больного человека различается (рис. 5), что качественно подтверждает достоверность предложенной модели.

Заключение

Работа направлена на решение проблемы совершенствования существующих методов МКТ-диагностики, основанных на регистрации наиболее информативного параметра электромагнитного поля сердца, описывающего функциональный статус миокарда.

Работа выполнена в приближении гипотезы о влиянии топологии магнитопровода на его приведенные характеристики, в области малых интенсивностей магнитных полей, сопоставимых с влиянием собственной намагниченности структуры, миокард сердца рассмотрен как совокупность магнитных доменов, которые связывают микроскопические магнитные характеристики с макроскопическими свойствами.

Разработан алгоритм анализа влияния топологии магнитопровода на распространение электромагнитного поля, и разработано, в среде прикладного программирования Delphi, программное средство для расчета, с учетом влияния топологии магнитопровода, распространение электромагнитного поля.

Показана качественная возможность характеристики функционального статуса миокарда по результатам измерения напряженности магнитного поля. Полученные значения показывают, что в качестве характеристики, позволяющей прогнозировать развитие патологий сердца, можно использовать параметр, характеризующий функциональный статус миокарда, а именно напряженность или индукцию магнитного поля, величина которой различается в зависимости от топологии магнитопровода до 3 раз.

Возможные области применения – выполнение оценки функционального резерва деятельности сердца.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-07-00468.

Список литературы

1. Арутюнов Ю.А. и др. Влияние топологии Мебиуса на распространение в магнитопроводе магнитного поля // 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 магнитных ферромагнетиков // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2; URL: www.science-education.ru/129-23144.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1964. – 750 с.
4. Готовский М.Ю., Перов Ю.Ф., Чернецова Л.В. Биорезонансная терапия. – М.: «Имедис», 2008. – 176 с.
5. Лисин А.В., Платоненко В.И. Топологические свойства и отношения живых систем. Эффект нелокальности в живых системах // Вестник международной академии наук (Русская секция). – 2009. – № 1. – С. 21–27.
6. Самойлов А.С., Арутюнов Ю.А. Математическое моделирование сердечно-сосудистой системы для исследования гемодинамики, физико-механики и электрофизиологии миокарда новой топологии // Биомедицина. – 2014. – Т. 1, № 3. – С. 104–105.
7. Сосницкий В.Н., Стаднюк Л.А., Сосницкая Т.В. Магнитокardiография: новый взгляд на старые идеи // Сердце и судина. – 2004. – № 4. – С. 73–78.
8. Холодов Ю.А., Козлов А.Н., Горбач А.М. Магнитные поля биологических объектов. – М.: Наука, 1987. – 145 с.
9. Шеманаева Л. И. Геометрия зацепления и автоматизация проектирования кольцевых винтовых передач: диссертация канд. техн. наук. – Ковров: 2002. – 133 с.
10. 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.
11. Harrison R.G. Variable-domain-size theory of spin ferromagnetism // IEEE Trans. Magn. – 2004. – Vol. 40, № 3. – P. 1506–1515.
12. Sosnyts'kyi V.M., Hugenholtz P.G. Magnetocardiogram for the assessment of current density heterogeneity. A torso model study // USIM. – 2005. – № 3. – P. 25–28.
13. Van Leeuwen P., Hailer B., Lange S. et al. Spatial and temporal changes during QT-interval in the magnetic fields in patients with coronary artery disease // Biomed. Tech. (Berl.). – 1999. – Vol. 44. – P. 139–142.
14. Wolk R., Cobbe S.M., Hick M.N., Kane K.A. Functional, structural and dynamic basis of electrical heterogeneity in healthy and diseased cardiac muscle: implications for arrhythmogenesis and antiarrhythmic drug therapy // Pharmacol. Ther. – 1999. – Vol. 84. – P. 207–231.