

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №1 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-1.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/23TVN117.pdf>

Статья опубликована 20.02.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Арутюнов Ю.А., Дробязко А.А., Крылов А.И., Митрофанов А.А., Чашин Е.А., Шашок П.А. Сравнительный анализ влияния топологии магнитопровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии для магнитопровода с различными геометрическими параметрами // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №1 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/23TVN117.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

Грант РФФИ № 14-07-00468

УДК 621.3

Арутюнов Юрий Артемович

ФГБУ «Научно-клинический центр спортивной медицины федерального медико-биологического агентства России»
Россия, Москва

Ведущий научный сотрудник

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: double-spiral@yandex.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=9311

Дробязко Александр Александрович

ООО «Двойная спираль», Россия, Москва

Инженер

E-mail: omegaversion@yandex.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=880781

Крылов Александр Игоревич

ООО «Двойная спираль», Россия, Москва

Инженер

E-mail: omegaversion@yandex.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=534393

Митрофанов Андрей Анатольевич

ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева», Россия, Ковров¹
Декан

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: kanircha@list.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=385251

Чашин Евгений Анатольевич

ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева», Россия, Ковров

Заведующий кафедрой «Электротехники»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: kanircha@list.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=42261

¹ 601910, Владимирская обл., г. Ковров, ул. Маяковского, 19

Шашок Павел Александрович

ООО «Двойная спираль», Россия, Москва

Инженер

E-mail: omegaversion@yandex.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=880773

Сравнительный анализ влияния топологии магнитопровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии для магнитопровода с различными геометрическими параметрами

Аннотация. В работе выполнена экспериментальная проверка гипотезы о влиянии топологии магнитопроводов на приведенные характеристики свойств магнито-мягких ферромагнетиков в области малых интенсивностей магнитных полей, сопоставимых с влиянием собственной намагниченности структуры. В статье приведены методика проведения эксперимента и результаты исследований на образцах-имитаторах влияния топологии магнитопровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии в диапазоне частот 50 - 15000 Гц. На образцах-имитаторах, выполненных в виде замкнутых стержневых сердечников, в которых топология замкнутого магнитного контура при одинаковом объеме магнитопровода выполнена с различным осевым моментом инерции сечения магнитопровода, 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 10% и уменьшается как с увеличением осевого момента инерции сечения магнитопровода, так и с удалением от начального нелинейного участка основной кривой намагничивания. Полученные результаты можно использовать для моделирования дефектов магнитопровода, а также использовать для формирования эталонных сигналов при различных повреждениях исследуемых образцов.

Ключевые слова: топология Мебиуса; магнитопровод; электромагнитное поле; катушка намагничивания; системы сбора, обработки и передачи информации; активное сопротивление; индуктивность

Введение

Результаты исследований, выполненных ранее [1, 2] показали, что в диапазоне частот 50-15 000 Гц для магнитомягких ферромагнетиков, изменение топологии магнитопровода с тороидальной на тороидальную с топологией Мебиуса, при увеличении величины магнитной индукции приводит к изменению активных потерь в магнитопроводе, которое может достигать до 10% при одновременном изменении индуктивности. Причем в зависимости от спина мебиусного магнитопровода, тока намагничивания и частоты индуктивность может, как увеличиваться, так и уменьшаться до 15% по сравнению с аналогичными измерениями на магнитопроводе тороидальной топологии. Однако качественного изменения приведенных магнитных и электромагнитных характеристик при изменении топологии магнитопровода не наблюдалось.

Одной из причин, вызывающих отмеченную зависимость, может являться влияние топологии магнитопроводов на приведенные характеристики свойств магнито-мягких ферромагнетиков в области малых интенсивностей магнитных полей, сопоставимых с влиянием собственной намагниченности структуры [3]. Действительно, известно, что сердечники трансформаторов, выполненные из ферромагнитных материалов, 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 [4, 5]. Однако, если ферромагнитное тело поместить во внешнее магнитное поле, то под действием этого поля векторы намагниченности становятся параллельны [8, 10]. Поэтому в области малых значений токов, текущих через измерительные обмотки трансформатора, полагаем, что векторы намагниченности направлены в одну сторону и «механически» меняют свое направление при прохождении зоны «Мебиусной закрутки». Это делает актуальной экспериментальную проверку влияния соотношения габаритных параметров магнитопровода на электромагнитные характеристики традиционных и мебиусных магнитопроводов.

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

Материалы и методы исследования

Экспериментальный трансформатор выполнен по кольцевой схеме, внешний вид исследуемых образцов приведен на рис. 1. В комплекте, приведенном на рис. 1, элемент сердечника с закрепленными на нем катушками 2, 3, является съемным и используется для любого типа исследуемых топологических форм.

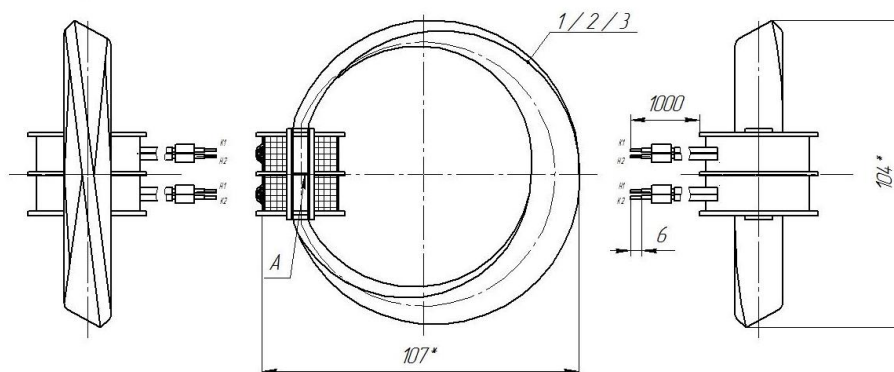


Рисунок 1. Конструкция экспериментального трансформатора (разработано авторами)

В соответствии с известными рекомендациями [9], магнитопровод 1 (см. рис. 1) во всех предусмотренных методикой образцах представляет собою согнутую в кольцо, раскованный из прутка диаметром 20 мм, полосу длиной 310 мм прямоугольного сечения 5×16 мм (образцы серии А) и 9×9 мм (образцы серии В), выполненный из материала с торговым названием Magnifer 50® по стандарту DIN 17745, являющийся аналогом отечественного пермаллоя 47НК ГОСТ 10995-74. Предусмотрено после каждого деформирования заготовок материала осуществлять их совместный изотермический отжиг для рекристаллизации структуры материала и снятия остаточных напряжений. Согласно паспорту, на материал предельное относительное удлинение при деформации данного материала составляет 40%. С помощью пакета твердотельного моделирования «Autodesk Inventor Professional» была определена максимальная степень деформации материала в предложенной конструкции, которая составляет не более 32,5%. Таким образом, в конструкции магнитопровода, с указанным

поперечным сечением гарантированно обеспечено отсутствие разрывов на его поверхности при выполнении операции скручивания в петлю Мебиуса. На согнутом магнитопроводе, после его фиксации, обеспечивающей непосредственное касание месте стыка, зафиксированы две идентичные катушки: первичная и вторичная. Для уменьшения магнитного сопротивления место стыка магнитопровода предварительно смазывается по плоскости сопряжения ферритовой пастой ФП-5 ТУ 6-05-5076-76.

Оценку влияния топологии магнитопровода выполним в частотном диапазоне 50-15000 Гц, в соответствии с известной методикой [1] определения 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:

$$L = \frac{\left(\frac{U_T}{U_{\dot{E}}} R_{\dot{E}}\right)^2 - 2\left(\frac{U_T}{U_{\dot{E}}} R_{\dot{E}}\right)kr + r^2}{2\pi f \left(\frac{U_T}{U_{\dot{E}}} R_{\dot{E}}\right) \sqrt{1-R^2}}, \quad R = \frac{\left(\frac{U_T}{U_{\dot{E}}} R_{\dot{E}}\right)^2 - 2\left(\frac{U_T}{U_{\dot{E}}} R_{\dot{E}}\right)kr + r^2}{\left(\frac{U_T}{U_{\dot{E}}} R_{\dot{E}}\right)k - r}$$

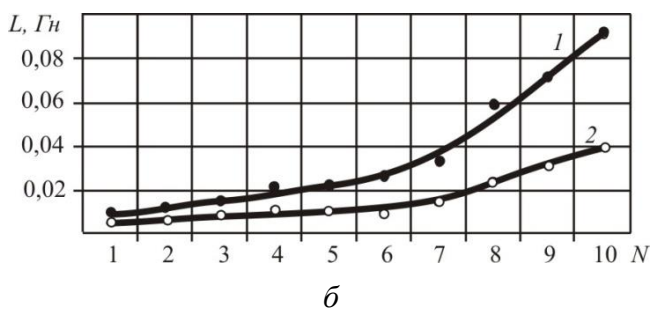
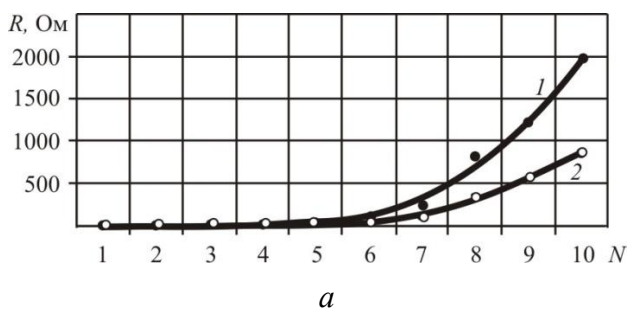
где: L , R - индуктивная и активная составляющие катушки намагничивания с сердечником различной топологической формы (см. рис. 1); $U_{\dot{E}}$ - напряжение на измерительном резисторе $R_{\dot{E}} = 1 \hat{I}$, численно равное току через намагничивающую катушку; U_T - действующее значение напряжения на катушке; r - активное сопротивление намагничивающей обмотки катушки; $k = \cos(2\pi f \tau)$ - коэффициент мощности катушки, зависящий от значений частоты f и временного сдвига τ .

$$\Delta R = \frac{R^{\dot{E}} - R^M}{R^{\dot{E}}} \times 100\%, \quad \Delta L = \frac{L^{\dot{E}} - L^M}{L^{\dot{E}}} \times 100\%$$

где: ΔL , ΔR - изменение индуктивной и активной составляющих катушки намагничивания с сердечником различной топологической формы; R^K , R^M - активная составляющая сопротивление потерь в катушке, L^K , L^M - индуктивная составляющая сопротивления потерь в катушке, индекс K - контрольный образец стандартного исполнения, как у обычных сердечников; индекс M - экспериментальный образец с топологией Мебиуса (см. рис. 1).

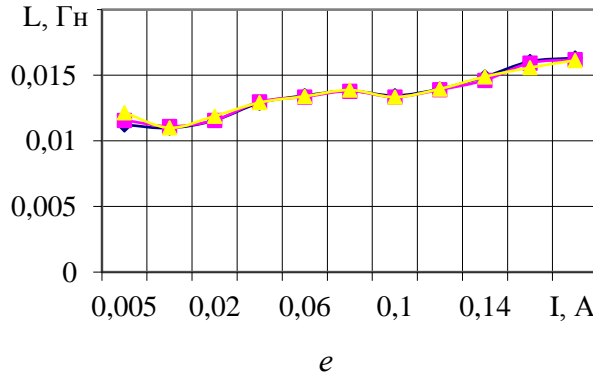
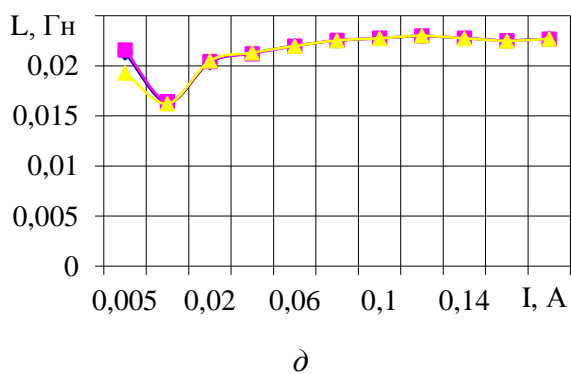
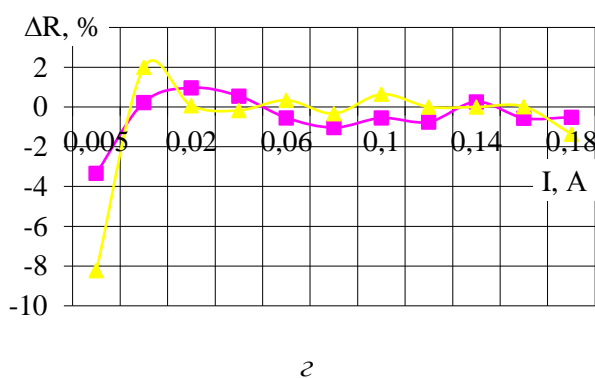
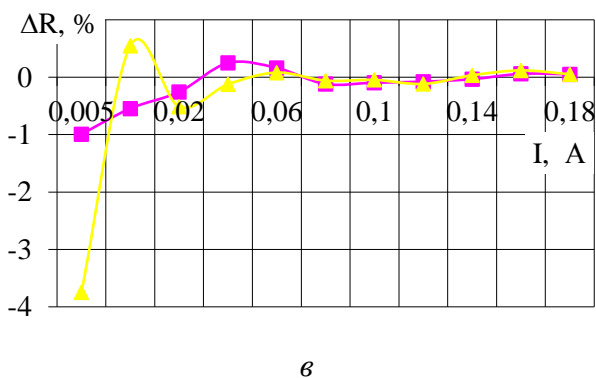
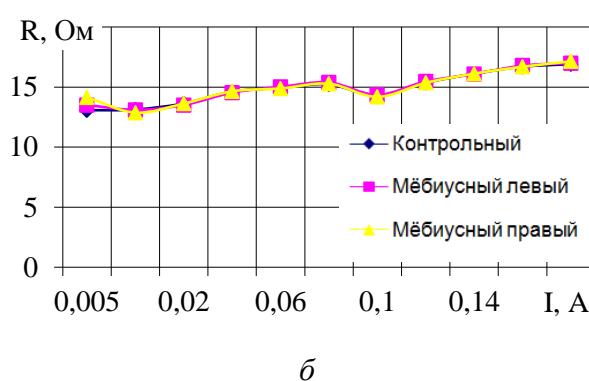
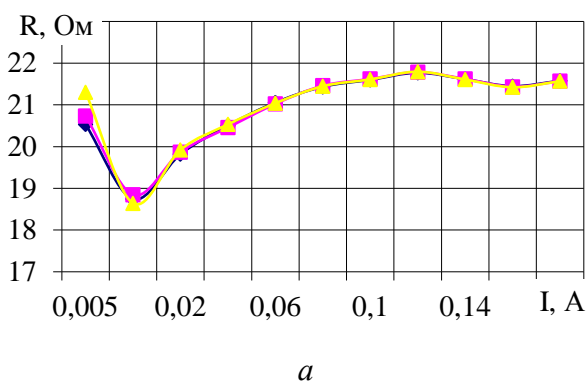
Результаты

Выполним определение сравнительных показателей электромагнитных свойств магнито-мягких ферромагнетиков в замкнутой магнитной цепи с различной топологией. Активное сопротивление катушки $r=7$ Ом. Количество витков - 250. Результаты исследования уровня потерь в магнитопроводе для исследованных вариантов приведены на рис. 2. Влияние топологии магнитопровода на изменение активной и индуктивной составляющей уровня потерь приведены на рис. 2.



1 - образец серии А; 2 - образец серии В; N - частота равная значениям: 1 - 50 Гц, 2 - 100 Гц, 3 - 250 Гц, 4 - 500 Гц, 5 - 1 кГц, 6 - 2,5 кГц, 7 - 5 кГц, 8 - 10 кГц, 9 - 12 кГц, 10 - 15 кГц

Рисунок 2. Зависимость изменения активной (а) и индуктивной (б) составляющих сопротивления контрольной намагничивающей катушки при $I=0,005$ А (разработано авторами)



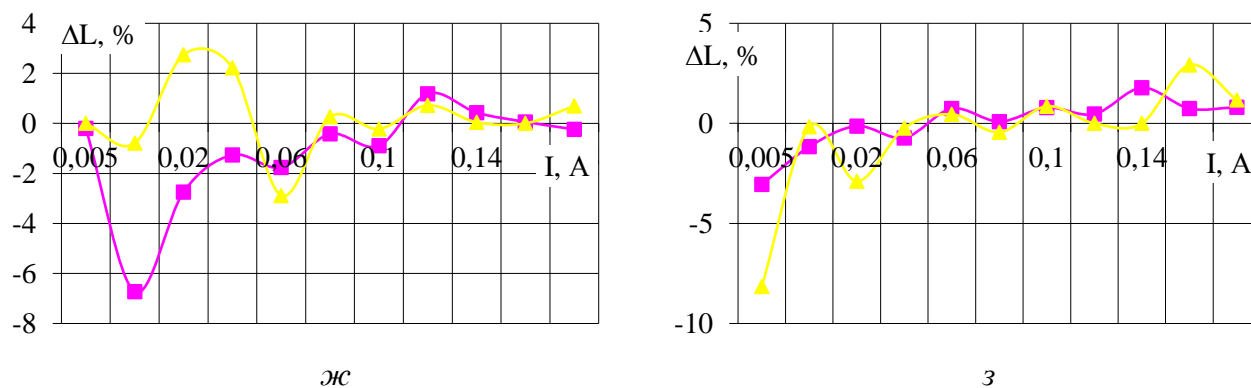


Рисунок 3. Зависимость изменения активной (а, б) и индуктивной (д, е) составляющих сопротивления намагничивающей катушки и относительной разницы потерь (в, г, ж, з) при $f=500$ Гц (разработано авторами): а, в, д, ж - образец серии А; б, г, е, з - образец серии В

Обсуждение

Видно, что при равных параметрах катушек образцов А и В активное сопротивление потерь увеличивается примерно в два раза во всем диапазоне частот, что не связано с изменением объема магнитопровода, величина которого в образцах серий А и В отличается не более чем на 1,25% и составляет $24,8 \times 103 \text{ мм}^3$ и $25,1 \times 103 \text{ мм}^3$ соответственно. Таким образом, можно полагать, что изменение уровня потерь показывает чувствительность используемой методики к распространению магнитного поля в магнитопроводе. Так же видно, что с увеличением частоты, уровни активных и реактивных потерь магнитопроводе, возрастают. Известно, что активное сопротивление не должно существенно изменяться с изменением частоты [6]. Однако, полученные зависимости качественно соответствуют известным экспериментальным данным [1], выполненным по использованной методике проведения эксперимента, согласно которой нелинейное изменение активного сопротивления связано с тем, что в используемой схеме замещения (1, 2), не учтена межвитковая емкость обмотки катушки. Таким образом, поскольку целью эксперимента является относительное сравнение свойств магнитопроводов с различной топологией, то выявленная проблема верифицируемости расчетной схемы не уменьшает ценности приведенных на графиках экспериментальных данных, а качественное соответствие поведения кривых (см. рис. 2) всех исследованных серий образцов показывает на достоверность результатов.

Рассмотрим влияние топологии магнитопровода на изменение активной и индуктивной составляющей уровня потерь. Видно, что для фиксированной частоты, с увеличением тока текущего через катушку, активное (см. рис. 3, а, б) и реактивное (см. рис. 3, д, е) сопротивления потерь возрастают незначительно для базового и мебиусных вариантов образцов обеих серий А и В. Причем в образцах серии А разница относительного уровня потерь, в Мебиусном исполнении по сравнению с базовым вариантом той же серии, до 2 раз меньше. В частности, для частоты 500 Гц в образце серии А активное сопротивление потерь отличается от базового варианта на 4% (см. рис. 3, а, в), а для той же частоты в образце серии В - относительная разница достигает 8% (см. рис. 3, б, в). Аналогичные изменения наблюдаются и для реактивного сопротивления (см. рис. 3, ж, з).

Таким образом, результаты измерений показали чувствительность изменение сопротивления потерь к изменению топологии в образцах серий А и В. Отметим, что существенная разница в изменении уровня потерь в мебиусном и базовом вариантах, достигается только на начальном этапе намагничивания (сила тока 0-0,01 А). При дальнейшем увеличении магнитодвижущей силы Iw (где I - сила тока, текущего через катушку, w - число

витков в катушке) уровень потерь возрастает незначительно, а разница, вызванная изменением топологии магнитопровода, нивелируется. Так же из результатов измерений видно, что спин магнитопровода неоднозначно влияет на величину относительного изменения уровня активных и реактивных потерь при изменении магнитодвижущей силы. В частности, для серии *B* (см. рис. 3, г) относительная разница активных потерь в базовом и мебиусном магнитопроводах, например, для правого спина изменяется с -8% до +2% (см. рис. 3, г). Аналогичным образом для образцов серии *A*, относительная разница активных потерь в базовом и мебиусном магнитопроводах, например, для левого спина изменяется с -4% до +0,5% на частоте 500 Гц. Это позволяет предположить связь с процессами, связанными с распространением магнитного потока в магнитопроводе.

На базе разработанного ранее стенда и методики исследования влияния топологии магнитопроводов на магнитные и электромагнитные свойства [3] проведены испытания образцов серии *A* и *B*. Исследования выполнены во всем диапазоне работ магнитопровода от начального нелинейного участка, линейного участка и участка насыщения. Результаты исследований показали, что увеличение магнитодвижущей силы, равно как и осевого момента инерции сечения магнитопровода, т.е. увеличение основания прямоугольного сечения и уменьшение его высоты при сохранении площади сечения ярма и объема магнитопровода сопровождается снижением влияния топологии Мебиуса. Полученные результаты подтверждают ранее выдвинутую гипотезу о том, что векторы намагниченности, обусловленные наличием доменной структуры ферромагнитного материала, направлены в одну сторону и «механически» меняют свое направление при прохождении зоны «Мебиусной закрутки». Так же экспериментально показано, что спин магнитопровода с топологией Мебиуса неоднозначно влияет на величину относительного изменения уровня активных потерь при изменении как частоты, так и силы тока. Таким образом, для одной и той же силы тока, текущего через обмотку магнитопровода, относительная разница потерь в базовом и мебиусном магнитопроводах зависит от частоты и может отличаться как в большую, так и в меньшую стороны. Одной из причин, вызывающих отмеченную зависимость, может являться наличие эффекта, связанного с затухающим гармоническим изменением значения напряженности от глубины проникновения в ферромагнитный материал [7].

Заключение

В работе проведен сравнительный анализ влияния топологии магнитопровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии, экспериментально исследована на образцах имитаторах возможность 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. Показана возможность оценки дефектов магнитопровода, выражаемых как отклонение топологии, по результатам измерения активного сопротивления и индуктивности катушки намагничивания при работе в начальной области основной кривой намагничивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнов Ю.А. и др. Влияние топологии магнитопровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии / Арутюнов Ю.А., Дробязко А.А., Крылов А.И., Чашин Е.А., Шашок П.А., Шилов И.В. / Современные наукоемкие технологии. - 2016. - №10-1. с. 29-32.
2. 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>.
3. 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.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. - М.: Высш. шк., 1964. - 750 с.
5. Вонсовский С.В. Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферримагнетиков. - М.: Наука, 1971. - 805 с.
6. Герасимов В.Г. Основы промышленной электроники / В.Г. Герасимов, О.М. Князьков, А.Е. Краснопольский, В.В. Сухоруков. Под ред. В.Г. Герасимова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. 1986. 336 с.
7. Гордеев А.Б. Моделирование остаточной магнитной индукции в ферритовых элементах магнитореологических трансформаторов гидравлических виброопор // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. - 2008. - №2. с. 147-151.
8. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: М.: Высш. шк., 1983 г. - с. 345.
9. Налимов В.В. Теория эксперимента. - М.: наука, 1971. - 208 с.
10. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и их применения. - М.: МИР, 1987. - 420 с.

Arutyunov Yuri Artemovich

Scientific-Clinical center of sports medicine federal medical-biological agency of Russia, Russia, Moscow
E-mail: double-spiral@yandex.ru

Droblyazko Aleksandr Aleksandrovich

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

Krylov Alexander Igorevich

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

Mitrofanov Andrey Anatolevich

Kovrov state technical academy, Russia, Kovrov
E-mail: kanircha@list.ru

Chaschin Yevgeny Anatolevich

Kovrov state technical academy, Russia, Kovrov
E-mail: kanircha@list.ru

Shashok Pavel Aleksandrovich

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

Comparative analysis of the impact of topology on magnetic response when an external electromagnetic action to the magnetic circuit with different geometric parameters

Abstract. The article carries out the experimental verification of the hypothesis of the magnetic circuit topology influence on a given characteristics of properties of soft ferromagnetic materials in the field of low-intensity magnetic fields which are comparable to the effect of its own magnetization of the structure. The paper presents the methodology of the experiment and the results of studies on the imitator samples. The influence of the magnetic topology on the response of the external electromagnetic influences had been researched in the frequency range 50 - 15000 Hz. Imitator samples made in the form of closed bar cores in which the topology of the closed magnetic circuit with the equal volume made with different magnetic axial moment of inertia of the magnetic circuit. Experimental results have shown that the difference in the loss level in the base version of the magnetic circuit and in the Möbius version reaches 10% and decreases both with increase of the axial magnetic moment of inertia and the distance from the initial nonlinear section of the normal magnetization curve. The results can be used to simulate of the magnetic circuit defects and for generating of the desired signals at different faults of the samples.

Keywords: the topology of the Möbius; magnetic; electromagnetic field; coil magnetization; system for the collection, processing and transmission of information; active resistance; inductance