

УДК 621.3: 537

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ ЗАМКНУТОГО МАГНИТНОГО КОНТУРА НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРА

¹Арутюнов Ю.А., ²Дробязко А.А., ³Шашок П.А., ³Чашин Е.А.

¹Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий Федерального медико-биологического агентства, Москва, e-mail: double-spiral@yandex.ru;

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

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

В работе проведено сравнительное экспериментальное исследование гипотез о влиянии топологии Мебиуса на распространение магнитного поля в магнитопроводе. Разработан опытный образец и приведены результаты экспериментального исследования сравнительных показателей электромагнитных свойств магнито-мягких ферромагнетиков в замкнутой магнитной цепи с различной топологией в диапазоне частот 50 Гц – 15 кГц. Экспериментально определено монотонное изменение индуктивности, что показывает на отсутствие в исследуемом диапазоне ферромагнитного резонанса. Показано, что изменение топологии магнитопровода не приводит к качественному изменению приведенных характеристик, однако с увеличением величины магнитной индукции наблюдается изменение активных потерь в магнитопроводе, которое может достигать до 10% при одновременном изменении индуктивности. Экспериментально подтверждена гипотеза о том, что магнитопроводе векторы намагниченности направлены в одну сторону и «механически» меняют свое направление при прохождении «зоны Мебиусной закрутки».

Ключевые слова: Мебиус, ферромагнетик, трансформатор, электромагнитные свойства

THE INFLUENCE OF THE CLOSED MAGNETIC CIRCUIT ON THE ELECTROMAGNETIC BEHAVIORS OF THE TRANSFORMER

¹Arutyunov Yu.A., ²Drobyazko A.A., ²Shashok P.A., ³Chaschin Ye.A.

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

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

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

A comparative experimental study of the hypotheses about the influence of the Möbius topology on the propagation of a magnetic field in a magnetic circuit is carried out. A prototype has been developed and the results of an experimental study of the comparative characteristics of the electromagnetic properties of magnetically soft ferromagnetics in a closed magnetic circuit with various topologies in the frequency range 50 Hz – 15 kHz were given. The monotonic change in inductance was determined experimentally, which indicates the absence of ferromagnetic resonance in the investigated range. It was shown that a change in the magnetic circuit topology does not lead to a qualitative change in the reduced characteristics. However, as the value of the magnetic induction increases, the active losses in the magnetic circuit are changed, and can reach up to 10% with a simultaneous change in inductance. The hypothesis that the magnetization vectors are directed to one side and «mechanically» change their direction during the passage of the «Möbius twist zone» was experimentally confirmed.

Keywords: Möbius, ferromagnet, transformer, electromagnetic properties

Большинство образцов общепромышленного электрооборудования (трансформаторы, электрические двигатели и пр.) содержат магнитопровод, выполненный из ферромагнитного материала. 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. Результаты исследований, выполненные нами ранее на магнитопроводах, содержащих участки с топологией Мебиуса показали, что в трансформаторах с зам-

кнутым магнитным контуром, изменение топологии магнитопровода оказывает влияние на электромагнитные характеристики трансформатора вызывая изменение в уровне потерь в базовом и мебиусном варианте до 15% [1]. Для объяснения полученных эффектов была выдвинута гипотеза о том, что при распространении магнитного поля в магнитопроводе векторы намагниченности направлены в одну сторону и «механически» меняют свое направление при прохождении «зоны Мебиусной закрутки» [2].

В то же время, анализ литературных источников показал [5-8], что в магнитных сердечниках тороидального типа, выпол-

ненных из изолированной ферромагнитной ленты магнитное поле распределяется по сечению неравномерно, в результате чего внутренние и внешние слои намагничиваются неодинаково или неодновременно. Поэтому замена сердечников на сердечники с топологией Мебиуса позволяет исключить неравенство длин внешнего и внутреннего слоя, поскольку любой слой проходит и по внешней и по внутренней частям сердечника. И соответственно обеспечить равенство значимой длины всех слоев, что по мнению авторов позволит влиять на процесс перемагничивания, который в этом случае пойдет равномерней и быстрее. В этом приближении электромагнитные характеристики трансформаторов с топологией Мебиуса должны обладать значимой нормальной дисперсией, причем дисперсионная характеристика должна терпеть разрыв на частоте ферромагнитного резонанса.

Цель исследования

Наличие двух гипотез, позволяющих описать полученные ранее результаты, делает актуальным проведение сравнительных исследований показателей электромагнитных свойств магнитопровода с топологией Мебиуса с целью экспериментального определения наличия или отсутствия разрыва на частоте ферромагнитного резонанса.

Материалы и методы исследования

В связи со сложностью теоретического учета значимых показателей для определения частоты ферромагнитного резонанса, экспериментальную оценку влияния топологии магнитопровода выполним в частотном диапазоне 50-15000 Гц, в соответствии с известной методикой [4]. Определение сравнительных показателей электромагнитных свойств проводится согласно схеме замещения (рис. 1).

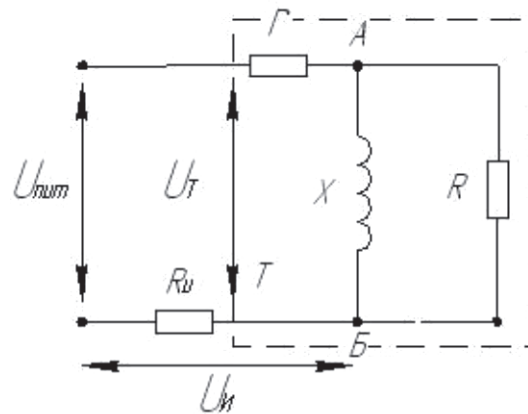


Рис. 1. Расчетная электрическая схема эксперимента

В приближении расчетной схемы имеем

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

$$R = \frac{\left(\frac{U_T}{U_{из}} R_{из}\right)^2 - 2\left(\frac{U_T}{U_{из}} R_{из}\right) kr + r^2}{\left(\frac{U_T}{U_{из}} R_{из}\right) k - r}$$

где L, R – индуктивная и активная составляющие катушки намагничивания с сердечником различной топологической формы (рис. 2); $U_{из}$ – напряжение на измерительном резисторе $R_{из} = 1$ Ом, численно равно 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 .

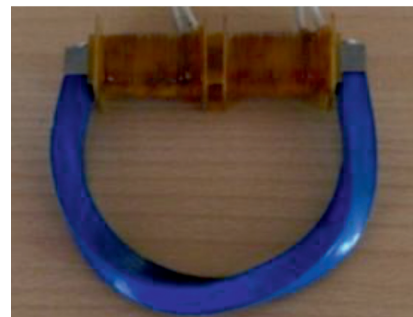
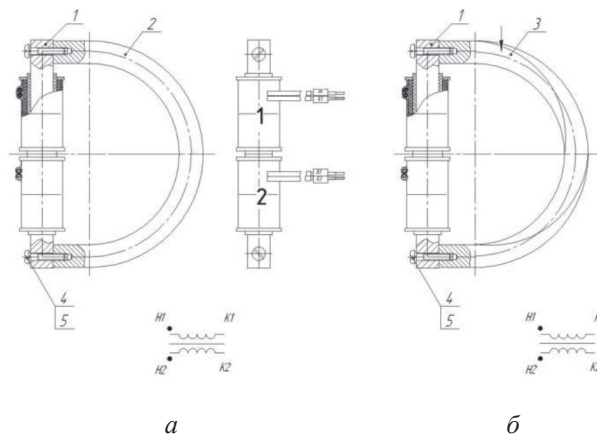


Рис. 2 Конструкция экспериментального трансформатора: а – с контрольным ярмом; б – с мёбиусным ярмом; в – фотография опытного образца, 1 – стержень единый, 2 – контрольное ярмо, 3 – мёбиусное ярмо

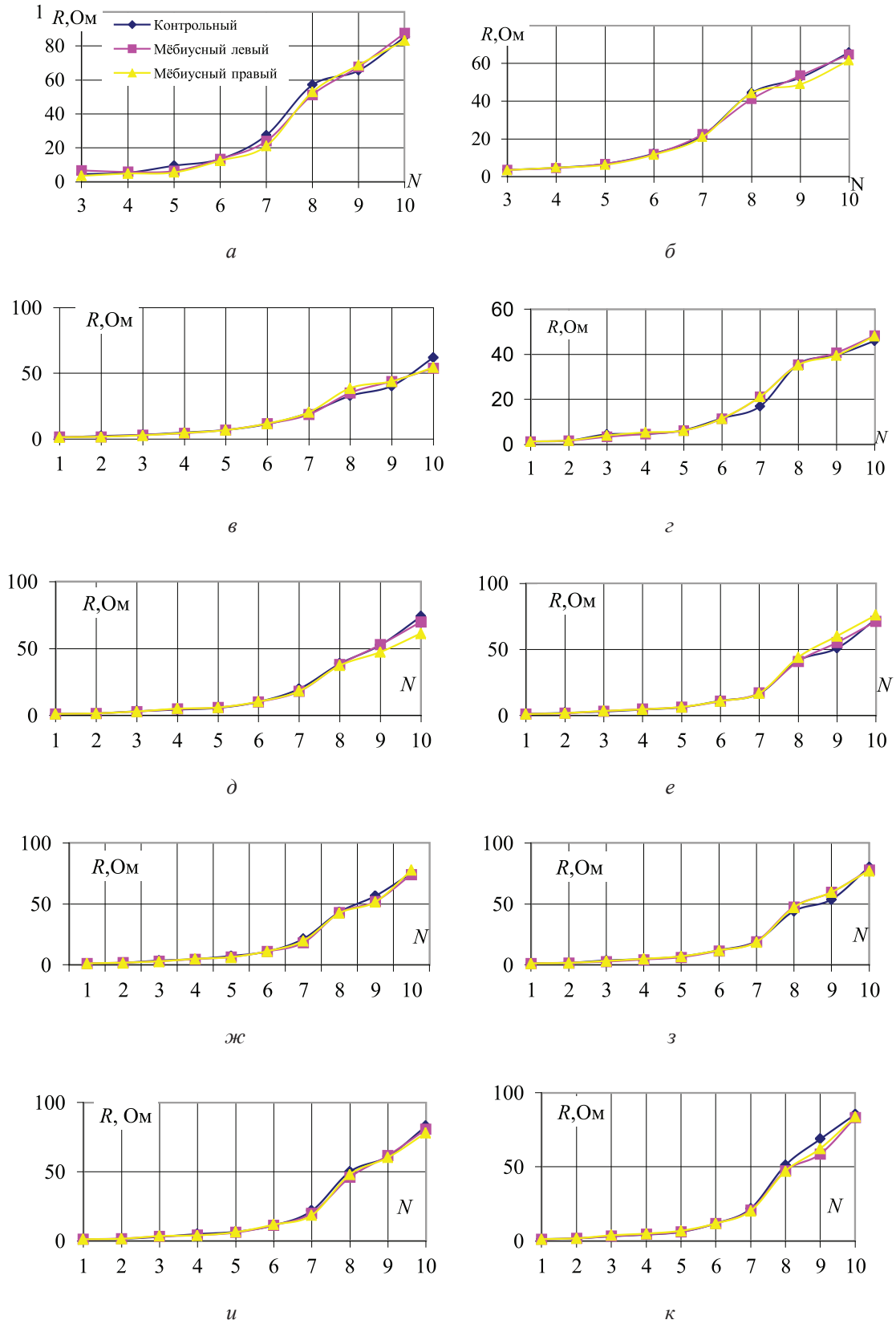


Рис. 3. Активное сопротивление потерь: а – сила тока 0,005 А; б – 0,010 А; в – 0,020 А; г – 0,040 А; д – 0,080 А; е – 0,10 А; ж – 0,12 А; з – 0,14 А; и – 0,16 А; к – 0,18 А, номер частоты N : 1 – 50 Гц, 2 – 100 Гц, 3 – 250 Гц, 4 – 500 Гц, 5 – 1000 Гц, 6 – 2500 Гц, 7 – 5000 Гц, 8 – 10000 Гц, 9 – 12000 Гц, 10 – 15000 Гц

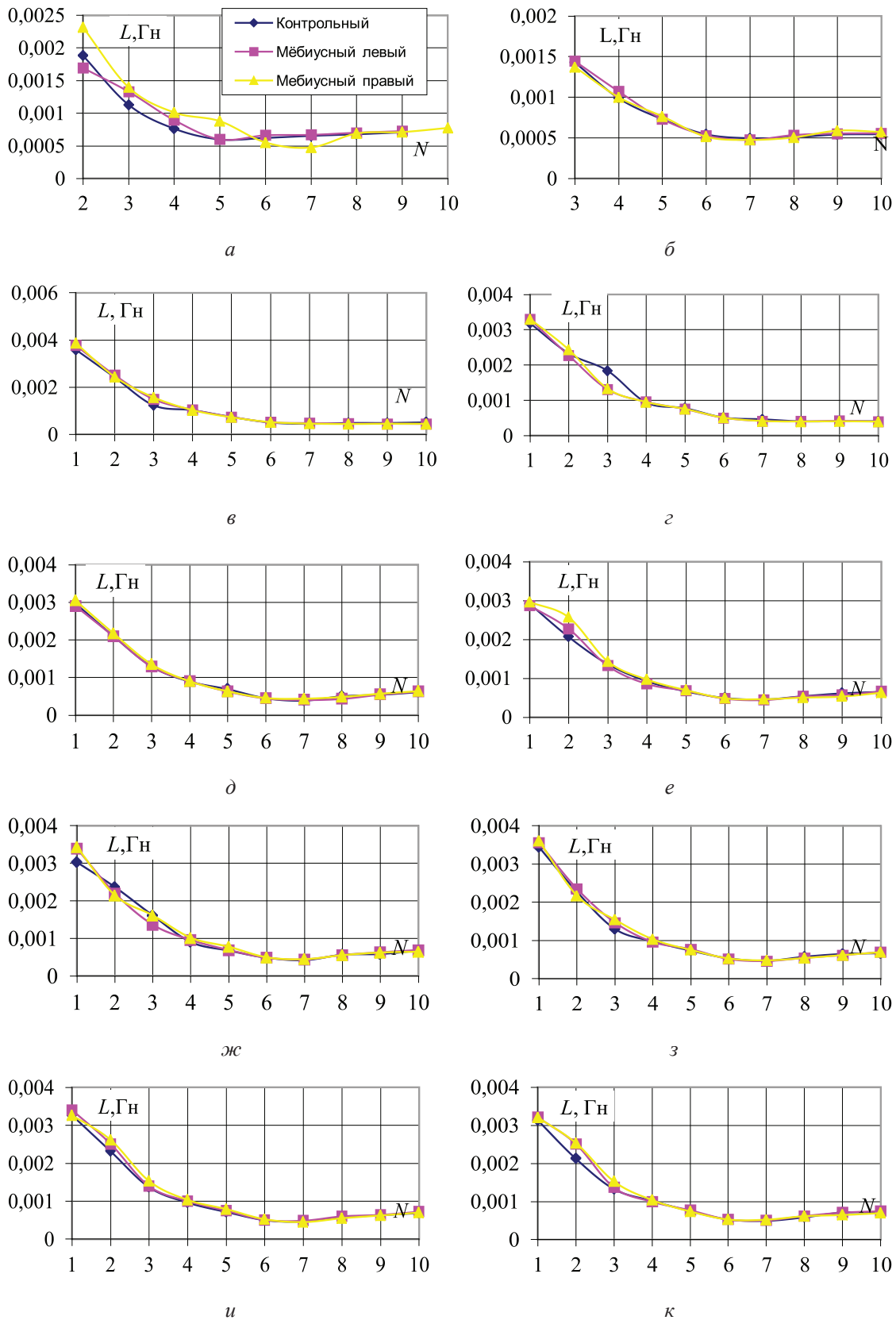


Рис. 4. Зависимость индуктивности от тока намагничивания: *a* – сила тока 0,005 А; *б* – 0,010 А; *в* – 0,020 А; *г* – 0,040 А; *д* – 0,080 А; *е* – 0,10 А; *ж* – 0,12 А; *з* – 0,14 А; *и* – 0,16 А; *к* – 0,18 А, номер частоты N : 1 – 50 Гц, 2 – 100 Гц, 3 – 250 Гц, 4 – 500 Гц, 5 – 1000 Гц, 6 – 2500 Гц, 7 – 5000 Гц, 8 – 10000 Гц, 9 – 12000 Гц, 10 – 15000 Гц

Экспериментальный трансформатор выполнен по стержневой схеме, конструкция и внешний вид которого изображены на рис. 2. Единый стержень (см. рис. 2 поз. 1) используется во всех предусмотренных методикой экспериментах: как с контрольным ярмом, так и с мёбиусным. Единый стержень представляет собою сборочную единицу, включающую стержень магнитопровода квадратного сечения и зафиксированные на нем две идентичные катушки: первичную 1 и вторичную 2. Контрольное ярмо (см. рис. 2 поз. 2) или ярмо с топологией мёбиуса (см. рис. 2 поз. 3) стыкуются к единому стержню плоскими участками поверхности с предварительно нанесенной ферритовой смазкой типа ФП -5 ТУ 6-05-5076-76, обеспечивающей снижение магнитного сопротивления в месте стыка и фиксируются при помощи винтов. В качестве материала единого стержня и ярма различной топологии (см. рис. 2 поз. 2, 3), составляющих в сборе магнитопровод экспериментального трансформатора, был использован пермаллой 47 НК ГОСТ 10995-74 поставляющийся в виде проката прутком сечением 10×10 мм марки Magnifer 50. Для снижения влияния неучтенных в рассмотренной выше методике эффектов, вызванных влиянием разницы остаточных напряжений из-за различной степени деформации элементов контрольного ярма (см. рис. 2 поз. 2) и мёбиусного ярма с левым и правым спинном (см. рис. 2, поз. 3), а так же для уменьшения влияния вариации электротехнических характеристик материала из которого изготовлены элементы конструкции, все элементы магнитопровода экспериментального трансформатора были изготовлены из одного и того же прутка и после каждого этапа деформации, для снятия остаточного напряжения и рекристаллизации совместно подвергались термообработке путем изотермического отжига. Размеры магнитопровода экспериментального трансформатора определялись из

критерия отсутствия надрывов материала, который выполняется при условии, что относительное удлинение, вследствие деформации при изгибе и кручении, не превышает паспортных значений. Для использованного материала Magnifer 50 указанные значения не должны превышать 40%. Результаты моделирования с использованием программного средства «Autodesk Inventor Professional» показали, что максимальная степень деформации элементов ярма различной топологии составляет не более 32,5%, что не превышает паспортных значений и обеспечивает отсутствие неучтенного влияния вследствие изменения электротехнических свойств материала из-за локального разрушения целостности поверхности.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования влияния топологии магнитопровода на изменение активной и индуктивной составляющей уровня потерь приведены на рис. 3-5. Видно, что с увеличением частоты активная составляющая, являющаяся аналогом уровня потерь в магнитопроводе, монотонно возрастает (см. рис. 3). Величина активного сопротивления R при заданной частоте меняется незначительно независимо от силы тока, протекающей через обмотку (см. рис. 5). При этом разница в уровне потерь в базовом и мёбиусном варианте зависит от частоты и может достигать 15%, что превышает погрешность измерений и может быть вызвано процессами, связанными с распространением магнитного потока в магнитопроводе.

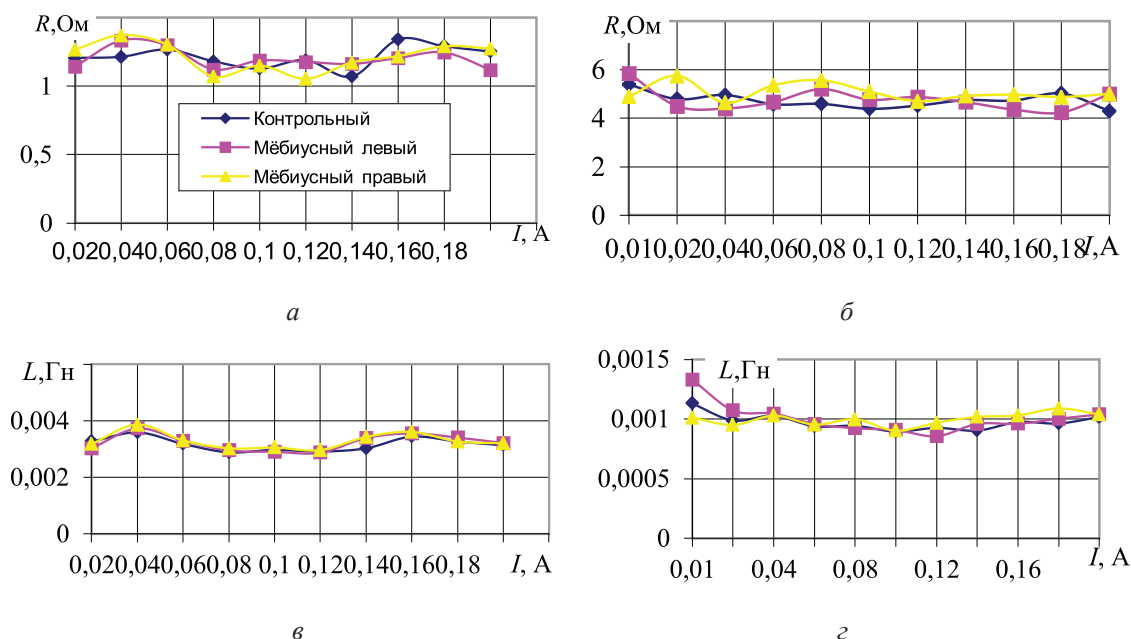


Рис. 5. Зависимость активного сопротивления (а, б) и индуктивности (в, г) от тока намагничивания: а, в – $f = 50$ Гц; б, г – 500 Гц

Косвенно это подтверждается тем, что разница в уровне потерь зависит как от спина мебиусного магнитопровода, так и от уровня магнитного потока в магнитопроводе, а так же тем, что с увеличением тока намагничивания, и как следствие магнитного потока, наблюдается рост разницы и снижается чувствительность к спину магнитопровода. Так же видно, что во всем диапазоне измерений наблюдается монотонное изменение параметров R , что показывает на отсутствие в исследуемом диапазоне ферромагнитного резонанса.

Падающий характер зависимости индуктивности катушки от частоты (см. рис. 4), свидетельствует о том, что в результате измерений и расчетов, произведенных в соответствии с канонической схемой замещения катушки (см. рис. 1), по всей видимости, не учтена межвитковая емкость обмотки катушки, обуславливающая уменьшение расчетного значения индуктивности с увеличением частоты [3]. Однако, поскольку целью методики эксперимента является относительное сравнение магнитных свойств магнитопроводов с различной топологией, то выявленная проблема верифицируемости расчетной схемы не уменьшает ценности приведенных на графиках экспериментальных данных. Из приведенных данных видно, что так же как для активных потерь, имеет место монотонное изменение параметров L , что показывает на отсутствие в исследуемом диапазоне ферромагнитного резонанса. А зависимость от частоты относительной разницы активных и индуктивных потерь подтверждает гипотезу о том, что магнитопроводе векторы намагниченности направлены в одну сторону и «механически» меняют свое направление при прохождении «зоны Мебиусной закрутки». На зависимость от намагниченности, создаваемой ориентированной доменной структурой, так же указывает снижение влияния мебиусной закрутки при увеличении магнитного потока, создаваемого катушкой намагничивания с 20 до 5% (см. рис. 5).

Выводы

В работе выполнено экспериментальное исследование на образцах имитаторах и проведен сравнительный анализ влияния топологии Мебиуса на распространение магнитного поля в магнитопроводе. Разработан стенд и методика исследования влияния топологии магнитопроводов. Разработан опытный образец и построены приведенные характеристики свойств магнито-мягких ферромагнетиков в частотном диапазоне 50-15000 Гц. Показано, что изменение топологии магнитопровода не приводит к качественному изменению приведенных характеристик, однако с увеличением величины магнитной индукции наблюдается изменение 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%. Исследования, выполненные нами, подтвердили гипотезу о влиянии топологии Мебиуса на распространение магнитного поля в магнитопроводе.

Список литературы

1. Влияние топологии Мебиуса на распространение в магнитопроводе магнитного поля / Арутюнов Ю.А., Возовиков И.Н., Чащин Е.А., Шеманаева Л.И. / Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 5; URL: <http://www.science-education.ru/128-22137>.
2. Влияние топологии магнитопровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии / Арутюнов Ю.А., Дробязко А.А., Крылов А.И., Чащин Е.А., Шашок П.А., Шиллов И.В. / Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 10. – С. 29-32.
3. Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 208 с.
4. Сравнительный анализ влияния топологии магнитопровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии для магнитопровода с различными геометрическими параметрами / Арутюнов Ю.А., Дробязко А.А., Крылов А.И., Чащин Е.А., Шашок П.А., Митрофанов А.А. / Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, № 1 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/23TVN117.pdf>.
5. Brown T.J. Mobius capacitor, US Patent 4 599 586.
6. Davis R.D. Non-inductive electric resistor, US Patent 3 267 406.
7. Pond J.M. Mobius resonator and filter, US Patent 6 445 264.
8. Vujevi E.D. Application of the Mobius Strip in ELECTRICAL ENGINEERING // Energija, vol. 56(2007), № 6. – P. 700-711.