

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ВИТЫМИ ЛЕНТОЧНЫМИ ПЛОСКИМИ И ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ

Л.Э. Рогинская, Д.В. Гусаков

Приведены результаты моделирования и экспериментального исследования процесса намагничивания трехфазного трансформатора с витыми ленточными плоскими и пространственными магнитопроводами. Введены понятия «кольцо» и «стержень» трансформатора с витыми ленточными плоскими и пространственными магнитопроводами. Разработана математическая модель трехфазного трансформатора с витыми ленточными плоскими и пространственными магнитопроводами, на основе которой проведено имитационное моделирование процесса намагничивания трансформатора и экспериментальное подтверждение результатов моделирования. В результате были получены зависимости изменения фазных токов, напряжений, потока в стержне, потока в кольце, ЭДС, наводимая в обмотках в кольце магнитопровода, гармонический состав напряжения в обмотках в стержне и в кольце магнитопровода. Полученные результаты могут быть использованы при определении параметров схемы замещения трехфазного трансформатора с витыми ленточными плоскими и пространственными магнитопроводами с различным характером нагрузки.

Ключевые слова: измерительный трансформатор напряжения, витой ленточный плоский и пространственный магнитопроводы, кольцо, стержень, имитационное моделирование процесса намагничивания трансформатора, экспериментальное исследование трансформатора.

Введение

Конструктивной и механической основой трансформатора является его магнитная система (магнитопровод), которая служит для локализации в ней основного магнитного поля трансформатора. Магнитная система представляет собой комплект пластин или других элементов из электротехнической стали или другого электромагнитного материала, собранных в определенной геометрической форме [1].

Витой ленточный магнитопровод (рис. 1) для трехфазных трансформаторов характеризуется меньшей массой по сравнению с пластинчатым магнитопроводом, меньшими габаритными разме-

рами при той же мощности, более высоким КПД. При изготовлении трехфазных трансформаторов с использованием витого ленточного магнитопровода уменьшается расход провода, снижается трудоемкость при намотке и сборке трансформатора [2].

Витая пространственная конструкция (рис. 2) за счет более равномерного распределения магнитного потока позволяет снизить массу магнитопровода и уменьшить потери холостого хода на 12–15 %. Конструкции ленточных магнитопроводов обеспечивают практически полную механизацию и частичную автоматизацию их изготовления и позволяют осуществить переход от стержня к яру по кривой, совпадающей с направлением

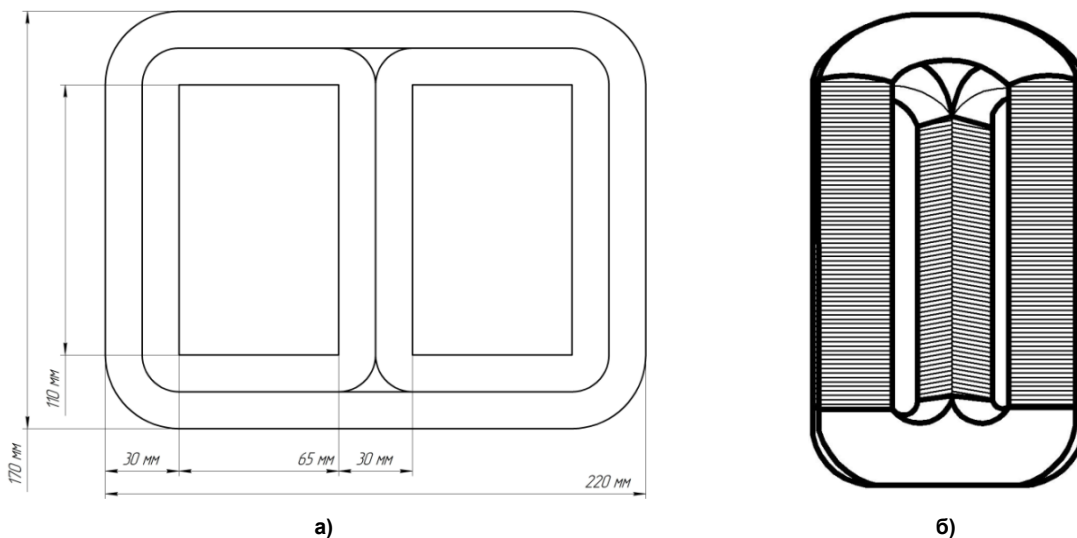


Рис. 1. Конструкция и габаритные размеры экспериментального образца витого ленточного плоского (а) и пространственного (б) магнитопроводов

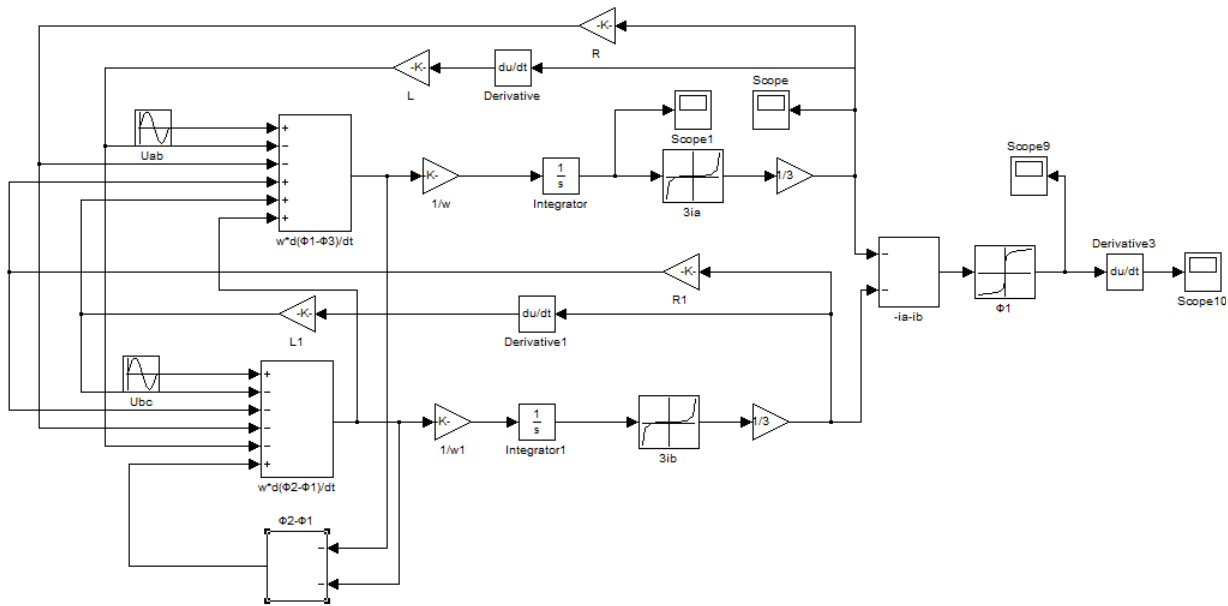


Рис. 2. Имитационная модель намагничивания трансформатора с витым ленточным плоским и пространственным магнитопроводами

магнитного потока, т. е. наиболее полно использовать анизотропные свойства холоднокатаной электротехнической стали [3].

Отличием витого ленточного плоского (рис. 1, а) и пространственного (рис. 1, б) магнитопроводов является разная длина пути магнитного потока для колец магнитопровода. Для витого пространственного магнитопровода она одинакова, а для плоского – разная. Из-за этого витой ленточный магнитопровод характеризуется небольшим отклонением от симметрии намагничивающих токов. Электромагнитные процессы в обоих магнитопроводах одинаковы.

Актуальность рассмотрения таких трансформаторов заключается в возможности компенсации потоков нулевой последовательности в соприкасающихся стержнях подобных трансформаторов [4–17].

Постановка задачи

Примем, что сеть, к которой подключен трансформатор, имеет бесконечную мощность и линейное напряжение сети не зависит от нагрузки. В схеме плоской навитой магнитной системы магнитный поток каждого стержня является геометрической суммой потоков двух навитых колец. Мгновенное значение потока в стержне фазы А можно представить в виде разности потоков а кольцах магнитопровода $\Phi_A = \Phi_I - \Phi_{III}$, поток в стержне фазы В – $\Phi_B = \Phi_{II} - \Phi_I$, поток в стержне фазы С – $\Phi_C = \Phi_{III} - \Phi_{II}$. Поскольку три кольца этой магнитной системы навиваются отдельно, а для удобства сборки между ними должен соблюдаться небольшой технологический зазор, переход магнитного потока из одного кольца в другое затруднен и фактически индукция в каждом кольце

должна быть в $2/\sqrt{3} = 1,155$ раза больше общей расчетной индукции в стержне [1].

Теоретическая часть

Для контура, включающего в себя фазы А и В, уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа [5], будет иметь вид:

$$U_{AB} = i_A R_A + L_{\sigma A} \frac{di_A}{dt} + w_A \frac{d(\Phi_I - \Phi_{III})}{dt} - i_B R_B - L_{\sigma B} \frac{di_B}{dt} - w_B \frac{d(\Phi_{II} - \Phi_I)}{dt}, \quad (1)$$

где U_{AB} – междуфазное напряжение в контуре, включающее в себя фазы А и В; i_A, i_B – токи в первичной обмотке фаз А и В соответственно; R_A, R_B – активные сопротивления первичной цепи фаз А и В соответственно; $L_{\sigma A}, L_{\sigma B}$ – индуктивные сопротивления рассеяния первичной цепи фаз А и В соответственно; w_A, w_B – числа витков первичной обмотки фаз А и В соответственно; Φ_A, Φ_B – магнитные потоки фаз А и В соответственно.

Аналогично для контура, включающего в себя фазы В и С, уравнение будет иметь вид:

$$U_{BC} = i_B R_B + L_{\sigma B} \frac{di_B}{dt} + w_B \frac{d(\Phi_{II} - \Phi_I)}{dt} - i_C R_C - L_{\sigma C} \frac{di_C}{dt} - w_C \frac{d(\Phi_{III} - \Phi_{II})}{dt}, \quad (2)$$

где U_{BC} – междуфазное напряжение в контуре, включающее в себя фазы В и С; i_B, i_C – токи в первичной обмотке фаз В и С соответственно; R_B, R_C – активные сопротивления первичной цепи фаз В и С соответственно; $L_{\sigma B}, L_{\sigma C}$ – индуктив-

Электромеханические системы

ные сопротивления рассеяния первичной цепи фаз B и C соответственно; w_B, w_C – числа витков первичной обмотки фаз B и C ; Φ_B и Φ_C – магнитный поток фаз B и C соответственно.

Уравнения, составленные по закону полного тока для магнитных цепей фаз A, B, C , имеют вид [5]:

$$i_A w_A - i_C w_C = H_1 l_1; \quad (3)$$

$$i_B w_B - i_A w_A = H_2 l_2; \quad (4)$$

$$i_C w_C - i_B w_B = H_3 l_3, \quad (5)$$

где H_1, H_2, H_3 – напряженности магнитного поля в 1, 2 и 3 кольцах магнитопровода трансформатора соответственно; l_1, l_2, l_3 – длины средних силовых магнитных линий в 1, 2 и 3 кольцах магнитопровода трансформатора соответственно.

Для первичных фазных токов при отсутствии нейтрального провода уравнение, составленное по первому закону Кирхгофа [18], запишется:

$$i_A + i_B + i_C = 0. \quad (6)$$

Запишем систему уравнений для трансформатора с витым ленточным плоским и пространственным магнитопроводами:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{AB} = i_A R_A + L_{\sigma A} \frac{di_A}{dt} + w_A \frac{d(\Phi_I - \Phi_{III})}{dt} - \\ - i_B R_B - L_{\sigma B} \frac{di_B}{dt} - w_B \frac{d(\Phi_{II} - \Phi_I)}{dt}; \\ U_{BC} = i_B R_B + L_{\sigma B} \frac{di_B}{dt} + w_B \frac{d(\Phi_{II} - \Phi_I)}{dt} - \\ - i_C R_C - L_{\sigma C} \frac{di_C}{dt} - w_C \frac{d(\Phi_{III} - \Phi_{II})}{dt}; \\ i_A w_A - i_C w_C = H_1 l_1; \\ i_B w_B - i_A w_A = H_2 l_2; \\ i_C w_C - i_B w_B = H_3 l_3; \\ i_A + i_B + i_C = 0. \end{array} \right. \quad (7)$$

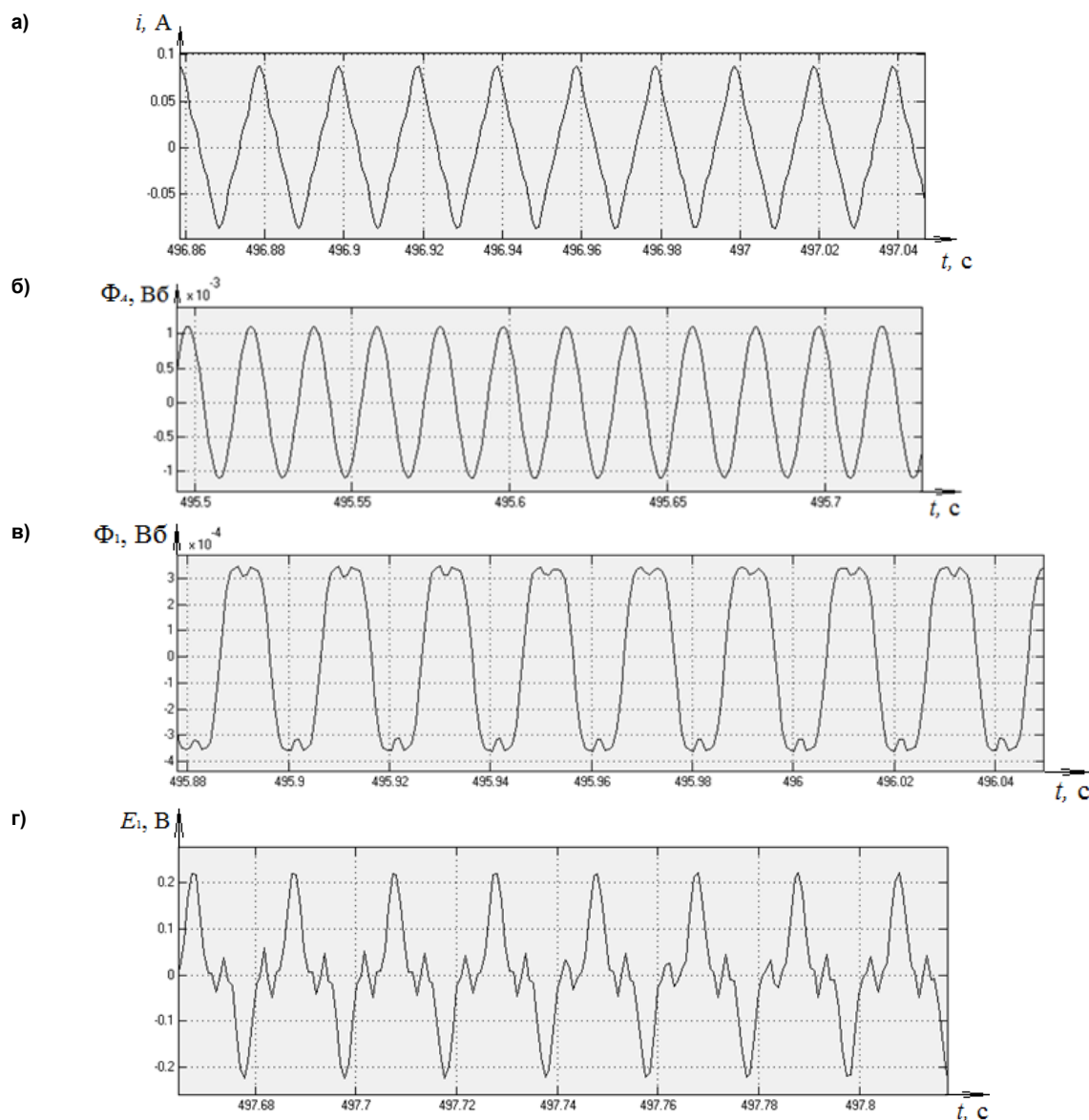


Рис. 3. Осциллограмма тока i_A (а), потока Φ_A в стержне (б), потока Φ_I в кольце (в) и ЭДС E_1 в стержне (г) трансформатора с витым ленточным плоским и пространственным магнитопроводами

На основании систем уравнений (1)–(7) в программном пакете MatLab составлена имитационная модель намагничивания трансформатора с витым ленточным плоским и пространственным магнитопроводами (см. рис. 2) [19].

В результате моделирования были получены и проанализированы зависимости (рис. 3).

Как видим, кривая тока в фазе A трансформатора (рис. 3, а) несинусоидальна, но она не содержит гармоник, кратных трем. Поток Φ_A в стержне фазы A трансформатора (рис. 3, б) имеет практически синусоидальную форму, т. е. на выходе трансформатора искажения формы напряжения не будет. Поток в кольце трансформатора Φ_1 (рис. 3, в) несинусоидален и имеет седлообразный характер [20]. На рис. 3, г представлена кривая изменения ЭДС E_1 в кольце трансформатора. Как видим, ЭДС в кольце имеет заостренную форму и третью гармоническую составляющую.

На рис. 4 представлены гармонические составляющие ЭДС E_1 в кольце (рис. 4, а) и напряжения U_A в стержне (рис. 4, б) трансформатора с витым ленточным плоским и пространственным

магнитопроводами. Видно, что гармонические составляющие ЭДС E_1 в кольце, помимо основной содержат третью гармонику (более 50 %). Гармонические составляющие напряжения U_A в стержне трансформатора содержат только основную гармонику.

Для проверки адекватности имитационной модели был проведен эксперимент.

Практическая значимость, предложения и результаты внедрений, результаты экспериментальных исследований

Было проведено экспериментальное исследование трансформатора с витым ленточным плоским магнитопроводом со следующими параметрами (см. рис. 1, а):

1) обмотки: первичные – 80 витков, вторичные – 20 витков, на одном стержне – 10.

2) провод: ПЭВ-2, $S = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

На рис. 5 представлена схема экспериментального исследования.

Для измерений параметров трансформатора использовался цифровой осциллограф (Fluke 124).

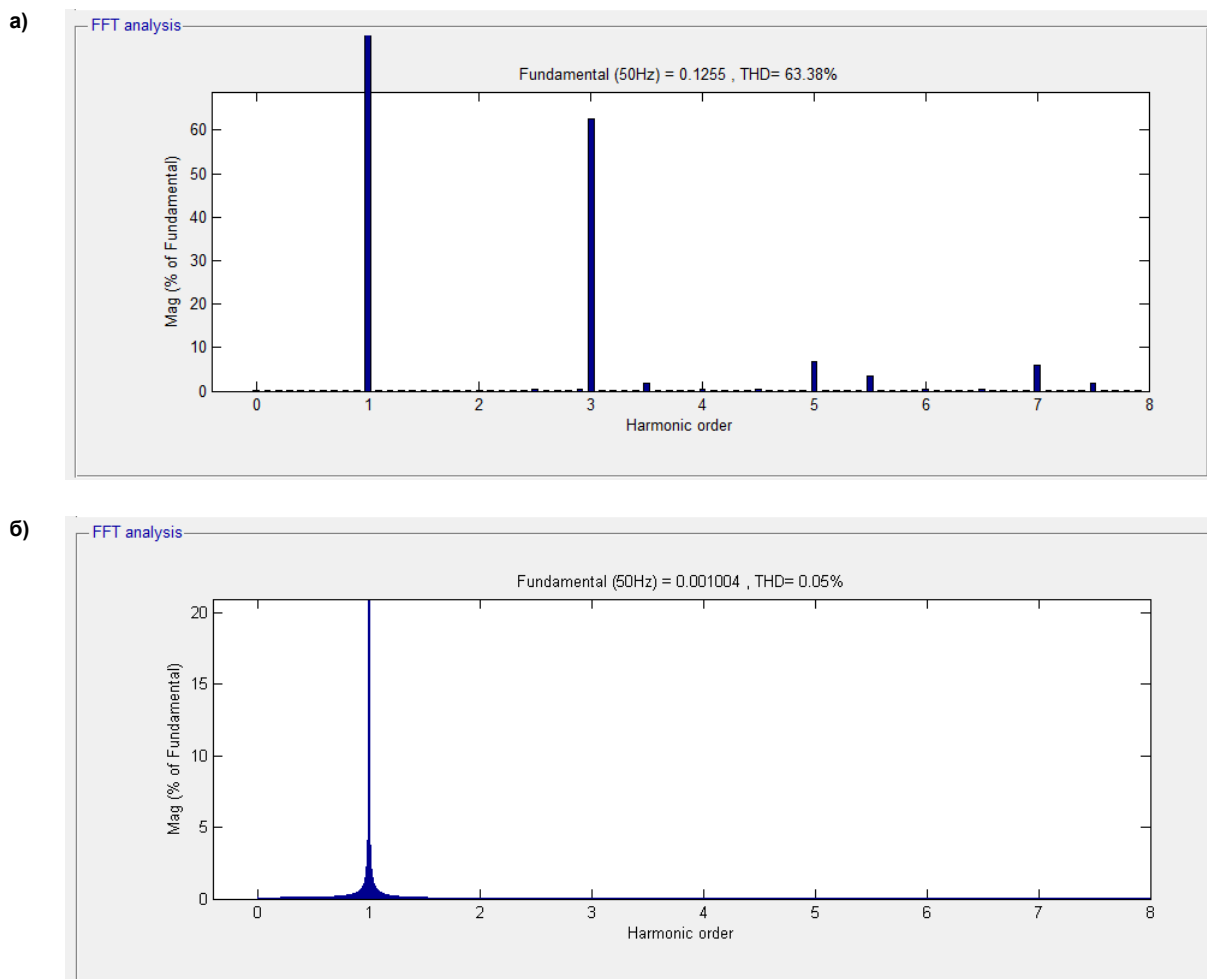


Рис. 4. Гармонические составляющие ЭДС E_1 в кольце (а) и напряжения U_A в стержне (б) трансформатора с витым ленточным плоским и пространственным магнитопроводами

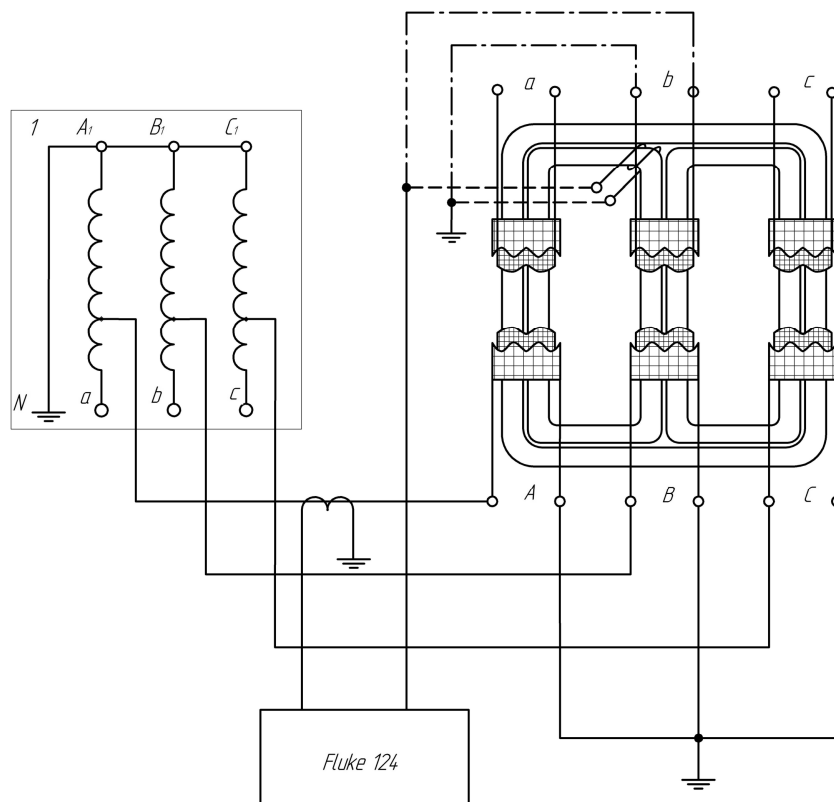


Рис. 5. Схема экспериментального исследования: 1 – автотрансформатор. Штриховой линией показано измерение напряжения в кольце, а осевой – измерение напряжения в стержне

Далее приведены результаты экспериментального исследования трансформатора с витым ленточным плоским магнитопроводом: кривая напряжения фазы A в кольце трансформатора (рис. 6, а) и кривая напряжения в стержне фазы A трансформатора (рис. 6, б)

Как видим из рис. 6, а и 7, а, напряжение фазы A в кольце магнитопровода содержит третью гармоническую составляющую. А в напряжении фазы A в стержне магнитопровода содержится только основная гармоническая составляющая (рис. 6, б; 7, б).

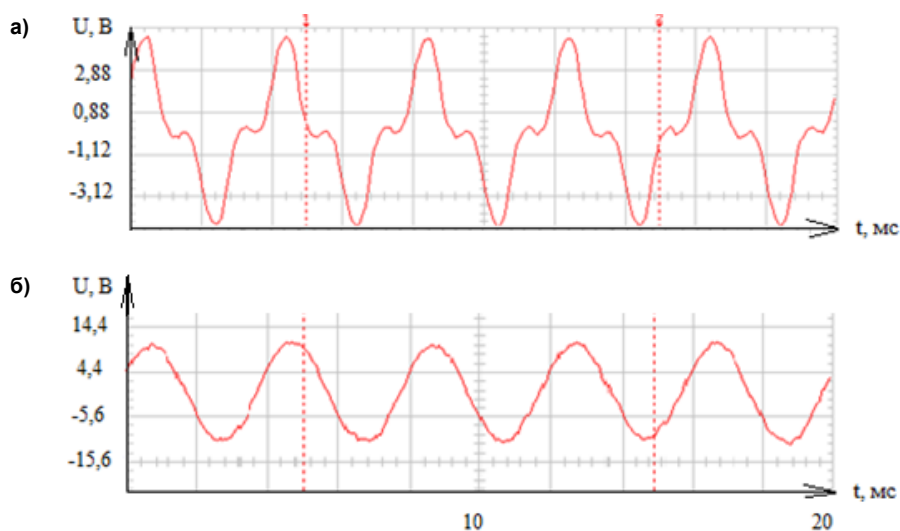


Рис. 6. Осциллограмма напряжения U_1 в кольце (а) и напряжения U_A в стержне (б) трансформатора с витым ленточным плоским магнитопроводом

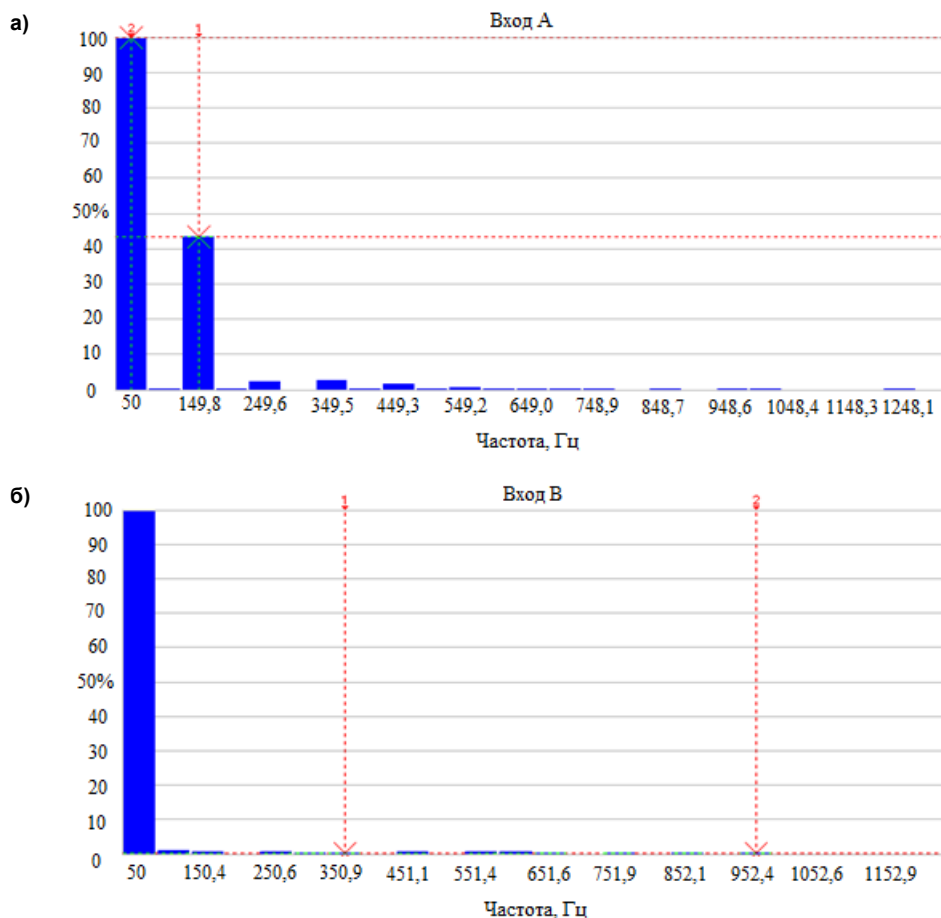


Рис. 7. Гармонические составляющие напряжения U_1 в кольце (а) и напряжения U_A в стержне (б) трансформатора с витым ленточным плоским магнитопроводом

Заключение

В результате верификации было выявлено соответствие теоретических и экспериментальных исследований. Определено, что витой ленточный плоский и пространственный магнитопроводы содержат в напряжении третью гармоническую составляющую в кольце, а в стержне фазы – основную гармонику. Ток в стержне фазы несинусоидален, но не имеет гармоник, кратных трем. Поток в кольце несинусоидален и имеет седлообразный характер. Разница потоков, являющаяся потоком фазы трансформатора, синусоидальна. Таким образом, можно определить параметры схемы замещения трансформатора.

Литература

1. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов / П.М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
2. ООО «Комплект трансформатор». Производство и реализация магнитопровода, г. Николаев. – <http://www.glagolev.mk.ua/magnit.php>.
3. Электрические машины: Трансформаторы: учеб. пособие для электромех. спец. вузов / Б.Н. Сергеев и др.; под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1989 – 352 с.

4. Антирезонансный трехфазный трансформатор напряжения с ленточным магнитопроводом. Патент РФ № 131231 U1, H01F30/12, 16.01.2013.

5. Авдеева, Е.А. Потери активной мощности в трехфазных трансформаторах с круговыми и шестигранными образующими контурами стержней витых пространственных магнитопроводов / Е.А. Авдеева, Р.А. Ставинский // Электротехника и электромеханика / Нац. техн. ун-т «Харьков. политехн. ин-т». – 2014. – № 2. – С. 14–17.

6. Многофазный трансформатор с круговыми обмотками на разных витых магнитопроводах. Патент РФ № 2306628 С1, H01F30/14, 20.09.2007.

7. Чайковский, В.П. Перспективы применения конструкций магнитных систем трансформаторов из витых элементов / В.П. Чайковский, В.А. Матухно, С.А. Игнатенко // Электромашиностроение и электрооборудование / Одесский нац. политехн. ун-т. – 2007. – № 68. – С. 48–51.

8. Ставинский, А.А. Генезис структур и перспективы усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнитопроводами) / А.А. Ставинский // Электротехника и электромеханика / Нац. техн.

ун-т «Харьков. политехн. ин-т». – 2011. – № 6. – С. 33–38.

9. Ставинский, А.А. Формирование структур статических электромагнитных систем на основе нетрадиционных образующих контуров / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева // *Электротехнические и компьютерные системы / Одесский нац. политехн. ун-т.* – 2013. – № 11. – С. 74–81.

10. Магнитопровод. Патент РФ № 2115968 С1, H01F3/04, 20.07.1998.

11. Способ изготовления витых ленточных магнитопроводов. Патент РФ № 2348999, H01F41/02, 10.03.2009.

12. Авдеева, В.А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трёхфазных электромагнитных систем с параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон (потери активной мощности) / В.А. Авдеева // *Электротехника и электромеханика / Нац. техн. ун-т «Харьков. политехн. ин-т».* – 2012. – № 5. – С. 13–17.

13. Авдеева, Е.А. Массо-стоимостные показатели пространственных аксиальных трёхфазных электромагнитных систем с круговыми и шестигранными образующими контурами

стержней витых магнитопроводов / Е.А. Авдеева, Р.А. Ставинский // *Электротехника и электромеханика / Нац. техн. ун-т «Харьков. политехн. ин-т».* – 2014. – № 1. – С. 15–20.

14. Пространственный симметричный магнитопровод. Патент РФ № 2380780 С1, H01F27/25, 27.01.2010.

15. Пространственный магнитопровод для трёхфазного трансформатора. Патент РФ № 115557 U1, H01F27/25, 27.04.2012.

16. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 616 с.

17. Стародубцев, Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности / Ю.Н. Стародубцев – М.: ИП РадиоСофт, 2005. – 320 с.

18. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учеб. / Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2007. – 701 с.

19. Герман-Галкин, С.Г. *Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК: учеб. пособие для вузов / С.Г. Герман-Галкин.* – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

20. Серебряков, А.С. Трансформаторы / А.С. Серебряков. – М.: Издат. дом МЭИ, 2014. – 360 с.

Рогинская Любовь Эммануиловна, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; elm.ugatu@gmail.com.

Гусаков Денис Валерьевич, аспирант кафедры «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; gusakov.den@mail.ru.

Поступила в редакцию 29 июля 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series “Power Engineering”
2014, vol. 14, no. 4, pp. 76–83**

SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF THREE-PHASE TRANSFORMER WITH TWISTED TAPE FLAT AND SPATIAL MAGNETIC CORES

L.E. Roginskaya, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation, elm.ugatu@gmail.com,

D.V. Gusakov, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation, gusakov.den@mail.ru

This paper presents results of simulation and experimental study of the magnetization process of three-phase transformer with twisted tape flat and spatial magnetic cores. The concepts of “ring” and the “core” of the transformer with twisted ribbon planar and spatial magnetic cores were introduced. A mathematical model of three-phase transformer with twisted tape flat and spatial magnetic cores was developed and used for simulations of the magnetization process of the transformer and experimental confirmation of the simulation results. From the result of study we obtained relations of phase current change, the phase voltage, phase magnetic flux,

magnetic flux in the ring, EMF in the ring of the magnetic circuit, harmonic structure of phase voltages and voltage in the ring of magnetic circuit. The results can be used to determine the parameters of the equivalent circuit of three-phase transformer with twisted tape flat and spatial magnetic cores with a different character of the load.

Keywords: metering voltage transformer, twisted tape flat and spatial magnetic cores, ring, core, simulation of the magnetization process of the transformer, transformer experimental study.

References

1. Tihomirov P.M.. *Raschet transformatorov* [Calculation of Transformers]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 528 p.
2. OOO "Komplekt transformator". *Proizvodstvo i realizaciya, Nikolaev*, Available at: <http://www.glagolev.mk.ua/magnit.php>.
3. Sergeenkov B.N., Kopylova I.P. (ed.) *Elektricheskie mashini: Transformatori* [Electrical Machines: Transformers]. Moscow, Visshaya Shkola Publ., 1989. 352 p.
4. *Antirezonansnyy trekhfaznyy transformator napryazheniya s lentochnym magnitoprovodom* [Antiresonant-Phase Voltage Transformer Magnetic Core with a Belt]. Patent RF 131231 U1, H01F30/12, 16.01.2013.
5. Avdeeva E.A., Stavinskiy R.A. [Losses of Active Power in Three-Phase Transformers with Circular and Hexagonal Form a Loop of Magnetic Rods Twisted Spatial]. *Elektrotehnika i elektromekhanika* [Electronics and Electrical Engineering], 2014, no. 2, pp. 14–17. (in Ukraine)
6. *Mnogofaznyy transformator s krugovymi obmotkami na raznyh vityh magnitoprovodah* [Multiphase Transformer with a Circular Winding at Different Twisted Magnetic Cores]. Patent RF 2306628 S1, H01F30/14, 20.09.2007.
7. Chaykovskiy V.P., Matuhno V.A., Ignatenko S.A. [Prospects of Application Structures of Magnetic Systems Transformers Twisted Elements]. *Ektromashinostroenie i elektrooborudovanie* [Electrical Engineering and Electrical Equipment], 2007, no. 68, pp. 48–51. (in Ukraine)
8. Stavinskiy A.A. [Genesis Structures and Premises Improvements Transformers and Reactors Conversion Circuits Electromagnetic Systems (Systems with Laminated Magnetic Cores and Twisted)]. *Elektrotehnika i elektromekhanika* [Electronics and Electrical Engineering], 2011, no. 6, pp. 33–38. (in Ukraine)
9. Stavinskiy A.A., Stavinskiy R.A., Avdeeva E.A. [Formation of the Structures of Static Electromagnetic Systems Based on Unconventional Contours]. *Elektrotehnicheskie i kompyuternye sistemy* [Electrical and computer systems], 2013, no. 11, pp. 74–81. (in Ukraine)
10. *Magnitoprovod* [Magnetic Core]. Patent RF № 2115968 S1, H01F3/04, 20.07.1998.
11. *Sposob izgotovleniya vityh lentochnyh magnitoprovodov* [Method of Manufacturing Twisted Tape Cores]. Patent RF № 2348999, H01F41/02, 10.03.2009.
12. Avdeeva V.A. [Comparative Analysis of Planar and Spatial Axial Three-Phase Electromagnetic Systems with Parallel Surfaces Forming Rods and Winding Windows (Active Power Losses)]. *Elektrotehnika i elektromekhanika* [Electronics and Electrical Engineering], 2012, no. 5, pp. 13–17. (in Ukraine)
13. Avdeeva E.A., Stavinskiy R.A. [Massostoimostnye Indicators of Spatial Phase Axial Electromagnetic Systems with Circular and Hexagonal Form a Loop of Magnetic Rods Twisted]. *Elektrotehnika i elektromekhanika* [Electronics and Electrical Engineering], 2014, no. 1, pp. 15–20. (in Ukraine)
14. *Prostranstvennyy simmetrichnyy magnitoprovod* [Spatial Symmetrical Magnetic] Patent RF № 2380780 S1, H01F27/25, 27.01.2010.
15. *Prostranstvennyy magnitoprovod dlya trehfaznogo transformatora* [Spatial Magnetic Phase for a Transformer]. Patent RF № 115557 U1, H01F27/25, 27.04.2012.
16. Lizunova S.D., Lohanina A.K. (eds.) *Silovye transformatory* [Power Transformers]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2004. 616 p.
17. Starodubcev Yu.N. *Teoriya i raschet transformatorov maloy moshhnosti* [Theory and Design of Low Power Transformers]. Moscow, IP RadioSoft Publ., 2005. 320 p.
18. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie cepi* [Theory of Electrical Engineering. Electrical Circuits]. Moscow, Gardariki Publ., 2007. 701 p.
19. German-Galkin S.G. *Matlab & Simulink. Proektirovanie mehatronnih system na PK* [Matlab & Simulink. Designing Mechatronic Systems on Your PC]. Saint Petersburg, KORONA-Vek Publ., 2008. 368 p.
20. Serebryakov A.S. *Transformatori* [Transformers]. Moscow, Moscow Engineering Institute Publ., 2014, 360 p.

Received 29 July 2014