

Обоснование целесообразности применения аморфной стали в магнитопроводах трансформаторно-выпрямительных устройств летательных аппаратов

ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ВАВИЛОВ В.Е., ГУСАКОВ Д.В., МЕДНОВ А.А.

Исследованы трансформаторно-выпрямительные устройства с магнитопроводами из аморфной стали. Показаны особенности применения аморфных сплавов и проведен их сравнительный анализ. Изготовлены экспериментальные образцы трансформаторно-выпрямительных устройств двух типов с магнитопроводом из различных аморфных сталей. Выполнено компьютерное моделирование тепловых процессов трансформаторно-выпрямительных устройств с магнитопроводом из аморфной стали. Проведено экспериментальное исследование удельных потерь в магнитопроводе. Результаты испытаний показывают, что по массогабаритным показателям трансформаторы с магнитопроводами из аморфной стали незначительно превышают трансформаторы из прецизионных магнитомягких сплавов или электротехнических сталей.

К л ю ч е в ы е с л о в а: трансформаторно-выпрямительное устройство, магнитопровод, аморфная сталь, потери холостого хода, массогабаритные показатели

Выпрямительные трансформаторы относятся к специальным типам трансформаторов, так как по условиям работы имеют ряд существенных особенностей, которые должны быть учтены при их проектировании и эксплуатации.

Выпрямительный трансформатор предназначен для решения следующих задач [1]:

согласования напряжения сети с напряжением, требуемым нагрузкой;

преобразования (увеличения) числа фаз для сглаживания выпрямленного напряжения и тока; определения нулевой точки для включения вентилей по лучевым схемам;

изоляции сети переменного тока от сети постоянного тока;

улучшения формы первичного тока из сети; построения сложных схем.

Наиболее массовая область применения фазо-преобразующих устройств на трансформаторах связана с созданием многопульсовых выпрямительных агрегатов, предназначенных для питания потребителей постоянного тока [2]. Одной из основных областей применения таких агрегатов является авиакосмическая отрасль, в которой используются трансформаторно-выпрямительные устройства (ТВУ). Это статические индуктивные преобразователи, относящиеся к вторичным системам электропитания (СЭС) летательного аппарата, служащие для преобразования напряжения 115/200 В переменной частоты тока 400 Гц в выпрямленное напряжение 27 В. Важная особенность таких преобразователей следующая: основную часть времени

полета летательного аппарата они работают в режиме холостого хода, при котором основные потери приходится на магнитопровод трансформатора ТВУ.

При проектировании ТВУ систем электроснабжения летательного аппарата разработчики пытаются добиться оптимального компромисса между такими критериями, как массогабаритный показатель и минимум тепловых потерь (максимальный КПД) [3]. Одним из способов снижения тепловых потерь является использование аморфной стали, применение которой позволит снизить потери холостого хода ТВУ в 10–15 раз [4–10].

В статье дается обоснование целесообразности применения магнитопроводов из аморфной стали в трансформаторах ТВУ летательных аппаратов для снижения потерь холостого хода при сохранении массогабаритных показателей устройства.

Основное содержание. Первым объектом исследования является ТВУ, состоящее из витого трехстержневого трансформатора с первичной цепью, соединенной по схеме «звезда», и двумя вторичными обмотками со схемами соединения «звезда» и «треугольник» и 12-пульсного мостового выпрямителя с уравнительным реактором. Вторым объектом исследования – ТВУ, выполненное из трех однофазных трансформаторов на магнитопроводах в виде тора с одной первичной обмоткой по схеме соединения «звезда» и тремя вторичными обмотками, одна из которых имеет схему «звезда» и две другие – «зигзаг», соединенных с 18-пульсным мостовым выпрямителем без уравнительного реактора.

Основные параметры ТВУ обоих типов:

расчетная мощность, В.А	10500
первичное напряжение, В	115/200
вторичное напряжение, В	27
частота, Гц	400–800
нагрузка, Вт	9000

Для определения массогабаритных показателей и потерь в магнитопроводе были рассчитаны ТВУ двух типов с различными типами аморфных сплавов: 5БДСР, 1СР производства ПАО «Ашинский метзавод» [11], АМАГ 321 производства ОАО «Мстатор» [12] и Metglas Alloy 2605CO производства HitachiMetals [13]. Результаты расчетов представлены

Как видно из табл. 1 и 2, оба типа ТВУ имеют наименьшие потери холостого хода при выполнении магнитопровода из сплава 5БДСР, однако при этом будет иметь и наибольшую массу, что является важным критерием для летательного аппарата. Наибольшими потерями холостого хода среди аморфных сталей обладает ТВУ с магнитопроводом из сплава АМАГ 321. Наименьшей массой и достаточно низкими потерями холостого хода обладают ТВУ с магнитопроводом из сплава Metglas Alloy 2605CO и 1СР.

Такое же ТВУ с магнитопроводом из холоднокатаной электротехнической стали 3424 обладает немного меньшей массой, однако потери холостого хода в 10 раз превышают потери в магнитопроводе из аморфной стали. В то же время при выполнении магнитопровода трансформатора ТВУ из аморфного сплава стоимость изготовления устройства значительно снижается, а низкие потери холостого хода существенно сокращают расходы при эксплуатации. Использование прецизионной магнитно-мягкой стали 49К2ФА в качестве магнитопровода ТВУ незначительно снижает массу устройства,

однако потери холостого хода в таком случае соизмеримы с потерями в ТВУ с магнитопроводом из холоднокатаной электротехнической стали.

Моделирование. Для определения температуры нагрева обмоток ТВУ при эксплуатации было проведено его компьютерное моделирование в программной среде Ansys IcePac. При компьютерном моделировании использовался магнитопровод трансформатора из аморфного сплава 1СР. Обмотка трансформатора выполнена из термостойкого провода ПНЭТ-имид с температурным индексом 220 °С [14]. Устройство первого типа имеет принудительное воздушное охлаждение, а ТВУ второго типа такого охлаждения не имеет.

Результаты моделирования ТВУ первого типа показывают, что максимальная температура обмоток в номинальном режиме при температуре окружающей среды 20 °С с обдувом вентилятора составляет 118,616 °С, магнитопровода – 51,6594 °С. Максимальная температура обмоток ТВУ второго типа в номинальном режиме составляет 105,579 °С при температурном индексе обмоточного провода ПНЭТ-имид 220 °С. Температура центральной обмотки выше ввиду пространственного расположения, осложняющего обдув торцевой поверхности.

Экспериментальные исследования удельных потерь в магнитопроводе из аморфной стали. В результате экспериментальных исследований были получены зависимости удельных потерь в исследуемых образцах аморфной стали от частоты перемагничивания, магнитной индукции и температуры. На рис. 1, а–в представлены зависимости удельных потерь для магнитопровода из стали 5БДСР типа Е при различных частотах перемагничивания для двух значений исследуемой температуры (20 и 80 °С).

Таблица 1

Сравнение ТВУ первого типа с магнитопроводами, выполненными из различных сплавов (масса металла обмоток 2,48 кг)

Параметр	Аморфный сплав					
	5БДСР	1СР	АМАГ 321	Metglas Alloy 2605CO	Сталь 3424	49К2ФА
Масса магнитопровода, кг	4,04	3,5	2,92	2,76	2,87	1,51
Потери в магнитопроводе, Вт	4,44	10,85	17,5	8,27	60,46	50,56

Таблица 2

Сравнение ТВУ второго типа с магнитопроводами, выполненными из различных сплавов (масса металла обмоток 2,48 кг)

Параметр	Аморфный сплав					
	5БДСР	1СР	АМАГ 321	Metglas Alloy 2605CO	Сталь 3424	49К2ФА
Масса магнитопровода, кг	7,15	6,21	5,17	4,89	3,23	2,36
Потери в магнитопроводе, Вт	7,87	19,25	31,02	14,67	109,94	73,87

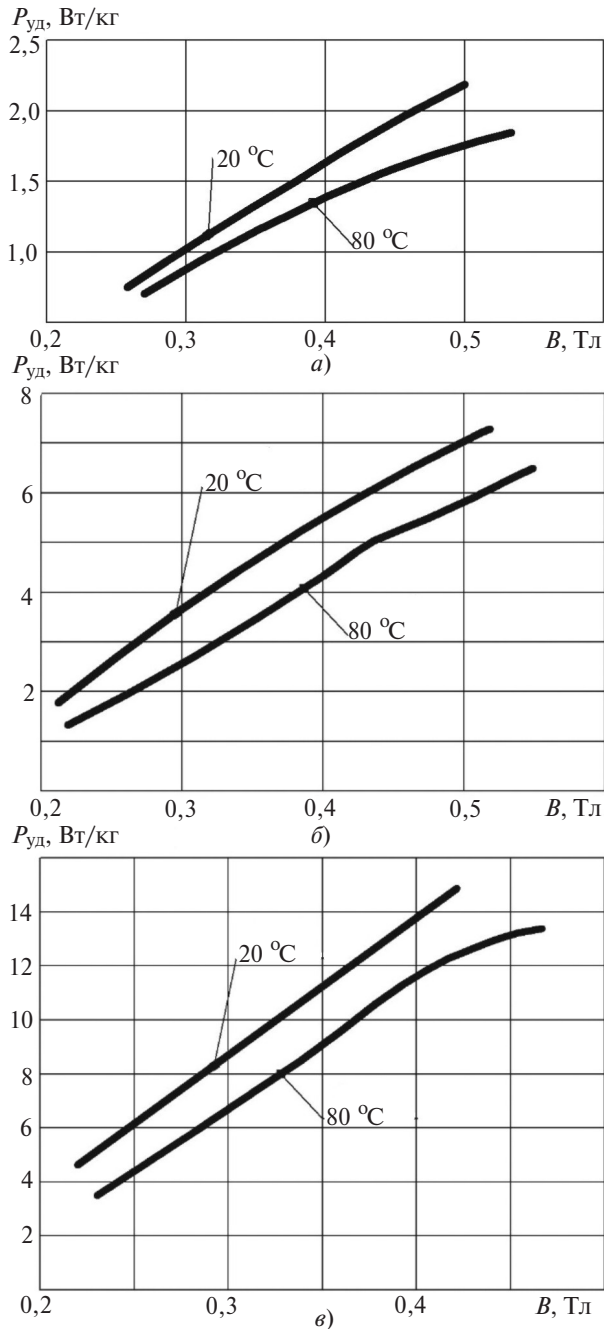


Рис. 1. Зависимость удельных потерь в магнитопроводе из стали 5БДСР типа Е при температуре 20 и 80 °С и частоте перемагничивания: а – 400 Гц; б – 1000 Гц; в – 2000 Гц

Из полученных экспериментальных данных видно, что с увеличением температуры образцов удельные потери в магнитопроводе снижаются. Так, при частоте перемагничивания 400 Гц и магнитной индукции 0,5 Тл удельные потери при повышении температуры с 20 до 80 °С снижаются на 15–17%. При этом в области более низких значений индукции (например 0,25 Тл) данное снижение составляет всего 3–5%, т.е. температурное снижение удельных потерь сильно зависит от магнитной индукции или от площади петли гистерезиса. Из этого можно сделать вывод, что потери на вих-

ревые токи в магнитопроводах из аморфной стали слабо зависят от температуры, при этом потери на гистерезис для аморфных сплавов имеют значительную зависимость от температуры. Аналогичные выводы можно сделать и для экспериментальных зависимостей на рис.1,б и в.

Аналогичные результаты были получены для образцов 5БДСР типов Т и В. При этом снижение удельных потерь у образцов данных типов под действием температуры на 2–3% меньше, чем у образца типа Е. Это объясняется тем, что тип Е имеет прямоугольную петлю гистерезиса, площадь которой больше, чем у петель гистерезиса образцов типов В и Т. На рис. 2 приведены экспериментальные петли гистерезиса для образцов типа Е.

Экспериментальные исследования ТВУ. По результатам расчетов были разработаны демонстрационные макеты ТВУ первого (рис. 3) и второго (рис. 4) типов. Габаритные размеры магнитопроводов ТВУ приведены на рис. 5. Экспериментальные исследования проводились в нормальных климатических условиях по ГОСТ 15150-69 на специальном стенде. Требования к стенду: выходное трехфазное напряжение $U_{1нл} = 220$ В (не менее), соответствующее разделу 5.1 ГОСТ Р 54073-2010; СЭС переменной частоты (360–800 Гц); нагрузочные модули с номинальным током 1400 А, не менее.

Питание подавалось на три фазы обмотки высокого напряжения $U_{1н} = 200$ В $\pm 10\%$ с частотой $f = 800 \pm 10\%$ Гц. К выводам блока выпрямителей была подключена нагрузка, при этом ток на выводах выпрямителя должен был соответствовать данным табл. 3 и 4. Ток контролировался по амперметрам,

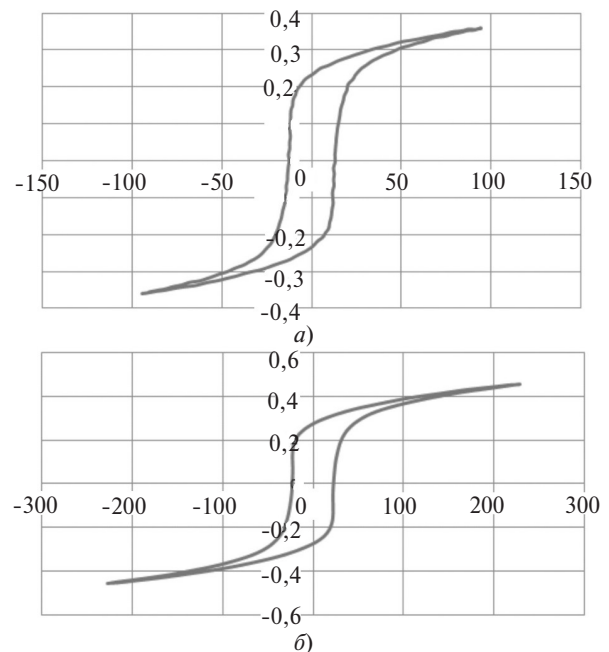
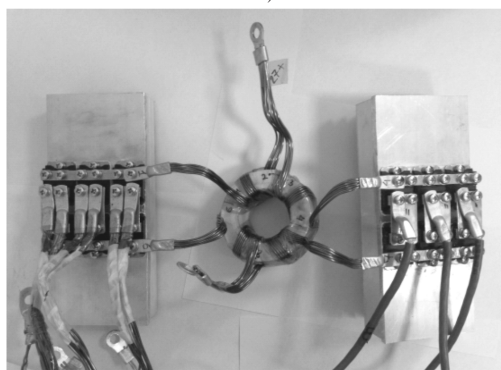


Рис. 2. Динамические петли гистерезиса для аморфной стали типа Е: а – $t = 80$ °С, $f = 400$ Гц (индукция 0,3595 Тл); б – $t = 80$ °С, $f = 2000$ Гц (индукция 0,4561 Тл)



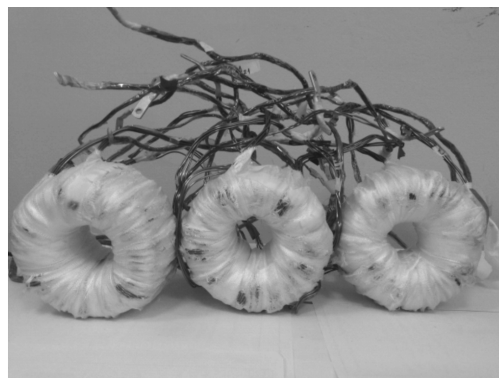
а)



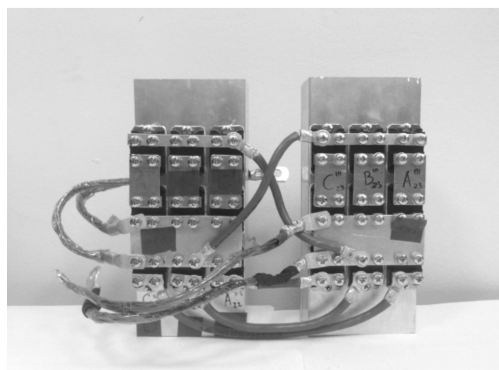
б)

Рис. 3. Демонстрационный макет ТВУ первого типа: а – трехфазный трансформатор; б – мостовой выпрямитель с уравнильным реактором

напряжение – по вольтметру. Температура обмоток контролировалась по встроенным в трансформатор датчикам температуры (термопарам), соединенным с мультиметром. Критерием для прекращения экспе-



а)



б)

Рис. 4. Демонстрационный макет ТВУ второго типа: а – трехфазная группа однофазных трансформаторов; б – мостовой выпрямитель

риментальных исследований была температура обмоток 210 °С, которая достигнута не была.

Как видно из табл. 3 и 4, экспериментальные исследования подтверждают правильность выбран-

Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований ТВУ первого типа

Ток, А	Время выдержки, с	Требуемое напряжение на выходе выпрямителя, В	Напряжение на выходе выпрямителя, В	Максимальная температура обмоток трансформатора по истечении времени выдержки, °С
50 + 10%	60	27	27,8	25
150 + 10%	60+5	24-30	26,59	31
330 + 10%	900+20	24-30	25,06	120
450 + 10%	300+10	не менее 22,7	23,38	185
600 + 10%	5+2	не менее 23,1	21,09	187

Таблица 4

Результаты экспериментальных исследований ТВУ второго типа

Ток, А	Время выдержки, с	Требуемое напряжение на выходе выпрямителя, В	Напряжение на выходе выпрямителя, В	Максимальная температура обмоток трансформатора по истечении времени выдержки, °С
50 + 10%	60	27	26,6	27
150 + 10%	60+5	24-30	25	33
330 + 10%	900+20	24-30	24	88
450 + 10%	300+10	не менее 22,7	20,7	130
600 + 10%	5+2	не менее 23,1	19,3	134

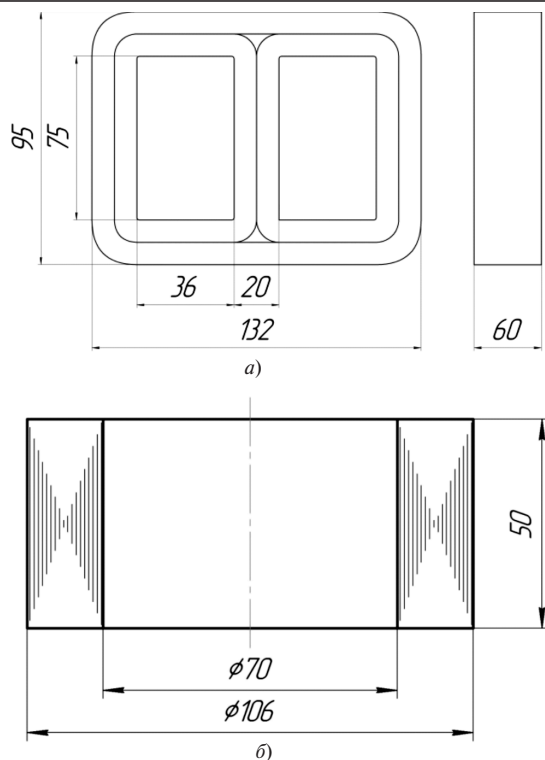


Рис. 5. Габаритные размеры ТВУ: а – первого типа; б – второго типа

ных методик проектирования и конструктивной схемы трансформатора. Важно отметить, что тепловые нагрузки, выявленные у трансформатора при его испытаниях, находятся в пределах допустимых значений. Максимальный температурный порог для обмотки изделия составляет 220 °С. Максимальная температура в наиболее нагруженных режимах составила 187 °С для ТВУ первого типа и 134 °С для ТВУ второго типа. Выявлены незначительные провалы выпрямленного напряжения – менее 10%, что решается дополнительной укладкой одного витка в обмотку. Стоит отметить, что снижение номинальной рабочей температуры при прочих равных условиях позволяет повысить срок службы наиболее уязвимого элемента трансформатора – изоляции обмотки, а следовательно, и всего ТВУ. В то же время следует учитывать, что снижение номинальной рабочей температуры по отношению к допустимому значению температуры ведет к изменению размеров электротехнического устройства.

Работа выполнена по проектной части государственного задания 8.1277.2017/ПЧ «Исследования, разработка и внедрение перспективных электромеханических преобразователей для автономных объектов с гибридной силовой установкой».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булгаков А.А. Новая теория управляемых выпрямителей. – М.: Наука, 1970, 320с.

2. Мятёж С.В. Трансформаторные преобразователи числа фаз с улучшенными энергетическими показателями: Дисс. ... канд. техн. наук. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2003.

3. Коняхин С.Ф. Исследование и разработка бортовых трансформаторно-выпрямительных устройств с многоканальным преобразующим трактом: Автореф. дисс.... канд. техн. наук. – М.: Московский энергетический институт, 2009.

4. Wagner Angelo da Silva, Alberto M. Jorge, Osmar Ogashawara. Weight reduction of amorphous alloy core electrical transformers for aircraft applications. – International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), 2016, pp. 144–148.

5. Mohammad Jafari, Zahra Malekjamshidi, Gang Lei; Tianshi Wang, Glenn Platt, Jianguo Zhu. Design and Implementation of an Amorphous High-Frequency Transformer Coupling Multiple Converters in a Smart Microgrid. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (2), pp. 1028–1037.

6. Jian Guo; Shibo Li. Study on no-load loss of amorphous alloy control transformer based on the finite element analysis. – IEEE International Conference of Online Analysis and Computing Science (ICOACS), 2016, pp. 16–19.

7. Atabak Najafi; Ires Iskender. Reducing losses in distribution transformer using 2605SA1 amorphous core based on time stepping finite element method. – International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015, pp. 1–4.

8. Xiaojing Liu, Youhua Wang, Md. Rabiul Islam, Gang Lei, Chengcheng Liu, Jianguo Zhu. Comparison of electromagnetic performances of amorphous and nanocrystalline core-based high frequency transformers. – 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014, pp. 2028–2032.

9. Wang Xin, Zhao Jinlong, Huang Dexu, Gao Xianjin. Optimization design and parametric drawing of Amorphous Alloy Transformer. – 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2012, pp. 422–425.

10. Jinli Wang, Wanxing Sheng, Li Wang, Honglei Yang. Study on technical and economical efficiency of amorphous alloy transformer and on-load capacity regulating transformer in distribution network application. – China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2014, pp. 30–34.

11. ПАО «Ашинский металлургический завод»: <http://www.amet.ru/>

12. ОАО «Мстатор»: <http://www.mstator.ru/>

13. Hitachi Metals America Ltd: <http://www.hitachimetals.com/>

14. АО «Псковкабель»: <http://pskovkabel.ru/>

[16.10.2017]

А в т о р ы: Исмаилов Флор Рашитович окончил Уфимский авиационный институт в 1973 г. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию «Электромеханические элементы систем управления со сложной геометрией подвижной части». Заведующий кафедрой «Электромеханика» Уфимского государственного авиационно-технологического университета (УГАТУ).

Вавилов Вячеслав Евгеньевич окончил УГАТУ в 2010 г. В 2013 г. защитил кандидатскую диссертацию «Гибридные магнитные подшипники и их системы управления (исследования и разработка)». Доцент кафедры «Электромеханика» УГАТУ.

Гусаков Денис Валерьевич окончил УГАТУ в 2011 г. В 2016 г. защитил кандидатскую диссертацию «Электротехнический комплекс для диагностики и

предотвращения перенапряжений с использованием антирезонансного трансформатора напряжения». Старший преподаватель кафедры «Электромеханика» УГАТУ.

Меднов Антон Александрович окончил УГАТУ в 2016 г. Аспирант, инженер кафедры «Электромеханика» УГАТУ.

Elektrichestvo, 2018, No. 5, pp. 39–44

DOI:10.24160/0013-5380-2018-5-39-44

Assessing the Feasibility of Using Amorphous Steel in the Magnetic Cores of Transformer-Rectifier Units for Aircrafts

ISMAGILOV Flur R. (*Ufa State Aviation-Technological University – USATU, Ufa, Russia*) – Head of Department of Electromechanics, Dr. Sci. (Eng.)

VAVILOV Vyacheslav Ye. (*USATU, Ufa, Russia*) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

GUSAKOV Denis V. (*USATU, Ufa, Russia*) – Senior Lecturer, Cand. Sci. (Eng.)

MEDNOV Anton A. (*USATU, Ufa, Russia*) – Engineer, Ph. D. Student

Transformer-rectifier units with magnetic cores made of amorphous steel are investigated. The specific features pertinent to application of amorphous alloys are shown, and their comparative analysis is carried out. Experimental samples of two types of transformer-rectifier units with the magnetic core made of different amorphous steels have been fabricated. The thermal processes occurring in transformer-rectifier units with the magnetic core made of amorphous steel are simulated on a computer. Specific losses in the magnetic core are experimentally investigated. The results obtained from the performed tests show that transformers with magnetic cores made of amorphous steel only slightly outperform the transformers with magnetic cores made of precision magnetically soft materials or electrical steels in terms of mass and dimensional indicators.

Key words: *transformer-rectifier unit, magnetic core, amorphous steel, no-load losses, performed tests*

REFERENCES

- Bulgakov A.A.** *Novaya teoriya upravlyayemykh vupryamitelei* (A New Theory of Control Rectifiers). Moscow, Publ. «Nauka», 1970, 320 p.
- Myatezh S.V.** *Transformatornye preobrazovateli chisla faz s ulichshennymi energeticheskimi pokazatelyami* (Transformer Phase Converters with Improved Energy Performance): Diss. for the Degree of Cand. Sci. (Eng.). Novosibirsk State Technical University, 2003.
- Konyakhin A.F.** *Issledovaniye i razrabotka bortovykh transformatorov-vupryamitel'nykh ustroystv s mnogokanal'nym preobrazuyushchim traktom* (Research and Development of On-Board Transformer-Rectifier Device with a Multi-Channel Conversion Path): Authors abstract of Cand. Sci. (Eng.). National Research University «Moscow Power Engineering Institute», 2009.
- Wagner Angelo da Silva, Alberto M. Jorge, Osmar Ogashawara.** Weight reduction of amorphous alloy core electrical transformers for aircraft applications. – International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), 2016, pp. 144–148.
- Mohammad Jafari, Zahra Malekjamshidi, Gang Lei; Tianshi Wang, Glenn Platt, Jianguo Zhu.** Design and Implementation of an Amorphous High-Frequency Transformer Coupling Multiple Converters in a Smart Microgrid. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (2), pp. 1028–1037.
- Jian Guo; Shibo Li.** Study on no-load loss of amorphous alloy control transformer based on the finite element analysis. – IEEE

International Conference of Online Analysis and Computing Science (ICOACS), 2016, pp. 16–19.

7. **Atabak Najafi; Ires Iskender.** Reducing losses in distribution transformer using 2605SA1 amorphous core based on time stepping finite element method. – International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015, pp. 1–4.

8. **Xiaojing Liu, Youhua Wang, Md. Rabiul Islam, Gang Lei, Chengcheng Liu, Jianguo Zhu.** Comparison of electromagnetic performances of amorphous and nanocrystalline core-based high frequency transformers. – 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014, pp. 2028–2032.

9. **Wang Xin, Zhao Jinlong, Huang Dexu, Gao Xianjin.** Optimization design and parametric drawing of Amorphous Alloy Transformer. – 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2012, pp. 422–425.

10. **Jinli Wang, Wanxing Sheng, Li Wang, Honglei Yang.** Study on technical and economical efficiency of amorphous alloy transformer and on-load capacity regulating transformer in distribution network application. – China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2014, pp. 30–34.

11. **JSC «Ashinskii metallurgicheskii zavod»:** <http://www.amet.ru/>

12. **JSC «Mstator»:** <http://www.mstator.ru/>

13. **Hitachi Metals America Ltd:** <http://www.hitachimetals.com/>

14. **JSC «Pskovkabel»:** <http://pskovkabel.ru/>

[16.10.2017]