

УДК 621.314.6

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АМОРФНОЙ СТАЛИ ДЛЯ МАГНИТОПРОВОДА ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Гусаков Д.В.

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

*E-mail: gusakov.den@mail.ru*

В статье исследованы выпрямительные трансформаторы с магнитопроводом из аморфной стали. Показаны особенности применения аморфных сплавов и проведен их сравнительный анализ. Произведены расчеты выпрямительного трансформатора с магнитопроводом из различных аморфных сталей, по результатам которых изготовлен экспериментальный образец. Произведено экспериментальное исследование спроектированного образца.

**Ключевые слова:** выпрямительные трансформаторы, аморфная сталь, потери холостого хода.

## THE USE OF AMORPHOUS STEEL FOR THE MAGNETIC CORE OF A RECTIFYING TRANSFORMER

Gusakov D.V.

In this article rectifying transformers with a magnetic core made from amorphous steel are investigated. The features of the use of amorphous alloys are shown and their comparative analysis is carried out. The rectifier transformers with a magnetic core made from various amorphous steels have been calculated, according to the results of which an experimental sample was made. An experimental study of the designed samples was carried out.

**Keywords:** rectifier transformers, amorphous steel, no-load losses

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

Выпрямительный трансформатор решает следующие задачи [1]:

- 1) преобразование величины напряжения для согласования напряжения сети с напряжением, требуемым нагрузкой;
  - 2) преобразование (увеличение) числа фаз для сглаживания выпрямленного напряжения и тока;
  - 3) получение нулевой точки для включения вентилей по лучевым схемам;
-

- 4) изоляция сети переменного тока от сети постоянного тока;
- 5) улучшение формы первичного тока, забираемого из сети;
- 6) построение сложных схем.

Наиболее массовая область применения фазопреобразующих 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, где используются трансформаторно-выпрямительные устройства (ТВУ). ТВУ – это статические индуктивные преобразователи, относящиеся к вторичным системам электроснабжения (СЭС) летательного аппарата, служащие для преобразования величины напряжения 115/200 В переменной частоты тока 400 Гц в 27 В выпрямленного напряжения. Важной особенностью данных преобразователей является то, что 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, обладающей в 10-15 раз меньшими потерями холостого хода взамен холоднокатаной электротехнической или прецизионной магнитно-мягкой стали [4-8].

Объектом исследования является ТВУ, выполненное из трех однофазных трансформаторов на магнитопроводах в виде тора с одной первичной обмоткой со схемой соединения «звезда» и тремя вторичными обмотками, имеющими 1 схему соединения «звезда» и 2 «зигзаг», соединенных с 18-и пульсным мостовым выпрямителем без уравнительного реактора. Основные параметры ТВУ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры ТВУ обоих типов

Параметр	Величина
Расчетная мощность, ВА	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 проведены расчеты двух типов ТВУ с различными типами аморфных сплавов: 5БДСР, 1СР производства ПАО

«Ашинский метзавод» [9], АМАГ321 производства ОАО «Мстатор» [10] и Metglas Alloy 2605CO производства Hitachi Metals [11].

Ниже представлены результаты расчетов ТВУ (таблица 2) с различными видами аморфных сплавов.

Таблица 2. Сравнение ТВУ с магнитопроводами, выполненными из различных сплавов.

Наименование параметра	5БДСР	1СР	АМАГ 321	Metglas Alloy 2605CO
Масса металла обмоток, кг	2,48			
Масса магнитопровода, кг	7,15	6,21	5,17	4,89
Потери в магнитопроводе, Вт	7,87	19,25	31,02	14,67

Как видно из таблицы 2 в ТВУ наименьшие потери холостого хода наблюдаются при выполнении магнитопровода из сплава 5БДСР, однако они же будет иметь наибольшую массу, что является важным критерием для летательного аппарата. Наибольшими потерями холостого хода обладает ТВУ с магнитопроводом, выполненным из сплава АМАГ 321. Наименьшей массой и достаточно низкими потерями холостого хода обладают ТВУ с магнитопроводом, выполненным из сплава Metglas Alloy 2605CO и 1СР.

Такое же ТВУ с магнитопроводом из обычной холоднокатаной электротехнической стали будет обладать той же массой, однако потери холостого хода составят примерно 100-150 Вт. При выполнении магнитопровода трансформатора ТВУ из аморфного сплава стоимость изготовления устройства значительно снижается, а низкие потери холостого хода существенно сократят расходы при эксплуатации.

Для дальнейшей экспериментальной верификации был выбран сплав 1 СР производства ПАО «Ашинский метзавод» со следующими параметрами: индукция  $B=1,5$  Тл, удельные потери холостого хода  $P_{xx}=3$  Вт/кг, плотность  $\gamma=7600$  г/см<sup>3</sup>.

По результатам расчетов были разработан демонстрационный макет ТВУ (рис. 1). Габаритные размеры демонстрационного макета приведены на рис.2. Экспериментальные исследования проводились в нормальных климатических условиях по [12] на специальном стенде.

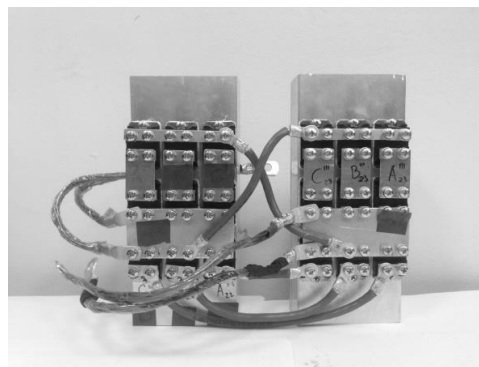
Требования к стенду:

– выходное 3-х фазное напряжение  $U_{1нл}$  220 В, не менее, соответствующее разделу 5.1 [13], СЭС переменной частоты (360 - 800 Гц).

– нагрузочные модули с номинальным током 1400А, не менее.

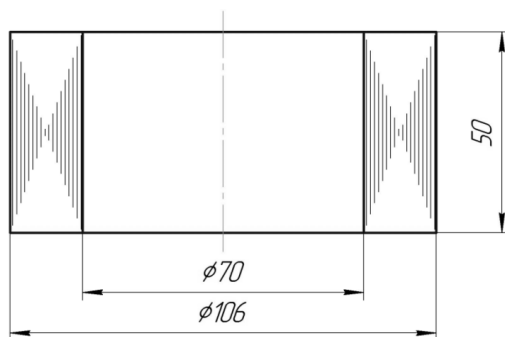


а



б

Рисунок 1. Демонстрационный макет ТВУ 2 типа: а – трехфазная группа однофазных трансформаторов; б – мостовой выпрямитель



а

б

Рисунок 2. Габаритные размеры ТВУ

Питание подавалось на 3 фазы обмотки высокого напряжения  $U_{1н}=200В \pm 10\%$  с частотой  $f=800 \pm 10\%$  Гц. К выводам блока выпрямителей была подключена нагрузка, при этом ток на выводах выпрямителя должен был соответствовать таблице 3. Ток контролировался по амперметрам, напряжение – по вольтметру. Температура обмоток контролировалось по встроенным в трансформатор датчикам температуры (термопарам) соединенным с мультиметром. Критерием для прекращения экспериментальных исследований являлась температура обмоток  $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ , которая достигнута не была.

Таблица 3. Результаты экспериментальных исследований ТВУ

Ток, А	Время выдержки, с	Требуемое напряжение на выходе выпрямителя, В	Напряжение на выходе выпрямителя, В	Максимальная температура обмоток трансформатора по истечении времени выдержки, $^{\circ}\text{C}$
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

Как видно из таблицы 3, экспериментальные исследования подтверждают правильность выбранной методики проектирования и конструктивной схемы выпрямительного трансформатора. Важно отметить, что тепловые нагрузки, выявленные на трансформаторе при его испытаниях, находятся в пределах допустимых значений. Максимальный температурный порог для обмотки изделия составляет 220 °С. Максимальная температура, обнаруженная в наиболее нагруженных режимах, составила 134 °С. Выявлены незначительные провалы по выпрямленному напряжению, 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.

Результаты проведенных испытаний показывают, что, исходя из критериев массогабаритных показателей, мощности и эффективности, возможно создание трансформаторов с магнитопроводами из аморфной стали повышенной эффективности с массовыми характеристиками, незначительно превышающими массу трансформаторов из прецизионных магнитомягких сплавов или электротехнических сталей.

Работа выполнена при поддержке гранта НШ-6858.2016.8.

### Список литературы

1. Булгаков А.А. Новая теория управляемых выпрямителей // М. Наука. – 1970. – 320 с.
  2. Мятеж С.В. Трансформаторные преобразователи числа фаз с улучшенными энергетическими показателями // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – НГТУ. – Новосибирск, 2003.
  3. Коняхин С. Ф. Исследование и разработка бортовых трансформаторно-выпрямительных устройств с многоканальным преобразующим трактом // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – НИУ МЭИ. – Москва, 2009.
  4. Гусаков Д.В., Каримов Р.Д., Ямалов И.И. Применение аморфной стали для снижения потерь в магнитопроводе трансформаторов // Современные тенденции развития науки и технологий, 2017, № 1-2, С. 19-21
  5. Гусаков Д.В., Каримов Р.Д., Ямалов И.И. Сравнение трансформаторов с магнитопроводами, выполненными из различных сплавов аморфной стали // Вестник научных конференций, 2017, № 1-5 (17), С. 66-67
  6. Гусаков Д.В., Каримов Р.Д., Ямалов И.И. Трансформаторно-выпрямительные установки с магнитопроводом из аморфной стали // Сборник научных трудов международной научно-
-

практической конференции «Современное научное знание: теория, методология, практика», 2017, С. 168-169

7. Гусаков Д.В. Трансформаторно-выпрямительное устройство летательного аппарата с повышенным КПД // Современные тенденции развития науки и технологий, 2017, № 3-3, С. 41-43

8. Гусаков Д.В., Вавилов В.Е., Ялалова З.И. Повышение эффективности трансформаторно-выпрямительного устройства // Сборник тезисов докладов XLIII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения – 2017», М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017, С. 936-937

9. ПАО «Ашинский металлургический завод». Электронный источник. Ссылка: <http://www.amet.ru/> (дата обращения 8.05.2017 г.).

10. ОАО «Мстатор». Электронный источник. Ссылка: <http://www.mstator.ru/> (дата обращения 8.05.2017 г.).

11. Hitachi Metals America Ltd. Электронный источник. Ссылка: <http://www.hitachimetals.com/> (дата обращения 8.05.2017 г.).

12. ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

13. ГОСТ Р 54073-2010 Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии.

---