

6. Yaramasu V., Wu B., Sen P.C., Kouro S. High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies // Proc. of the IEEE, Vol. 103, № 5, May 2015. – P. 740–788.
7. How to benefit from multiple paralleled generators in traditional single-generator stand by applications / Интернет ресурс / [http://kohlerpower.com/common/107308\\_Genset%20Paper.pdf](http://kohlerpower.com/common/107308_Genset%20Paper.pdf)

УДК 621.313.332

**Л.И. Мазуренко**, докт. техн. наук, **А.В. Джура**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

**Математическая модель автономного электрогенерирующего комплекса с асинхронными генераторами и единственным полупроводниковым преобразователем возбуждения**

*Разработана математическая модель автономного электрогенерирующего комплекса с двумя асинхронными генераторами и общей вентильной системой возбуждения, которая позволяет исследовать переходные процессы в его силовой части как при инверсном переключении транзисторов каждой стойки, так и при непроводящем состоянии всех транзисторов вентильного преобразователя. Проведено тестовое численное исследование режимов работы комплекса с двумя асинхронными генераторами мощностью 75 кВт при постоянной частоте вращения. В режиме, приближенном к холостому ходу, рассчитаны временные зависимости величин, которые характеризуют процессы во время поочередного возбуждения генераторов и потери ими возбуждения, их подключения и отсоединения от вентильной системы возбуждения. Библ. 7, рис.4.*

**Ключевые слова:** электрогенерирующий комплекс, асинхронный генератор, единый вентильный преобразователь.

**L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**The mathematical model of a stand-alone power generating complex containing two asynchronous generators and a single semiconductor converter for excitation**

*The mathematical model of the stand-alone power generating complex with two asynchronous generators and common excitation system based on transistors. This model allows to research transients in power circuits of the complex in an inverse transistor switching mode for each leg and in non-conductive state of inverter transistors. The numerical and experimental tests of operation modes were executed for complex containing two asynchronous generators of 75 kW power each at constant speed of rotation. In the operation mode similar to non-loaded operation the transients were obtained for operation modes such as interlaced generators excitation and its loss, as generators connecting and disconnecting from transistor excitation system. References 7, figures 4.*

**Key words:** power generation complex, induction generator, single inverter.

Надійшла 12.07.2016

Received 12.07.2016

УДК 621.313.8

**ЛЕНТОЧНЫЕ МАГНИТОПРОВОДЫ ИЗ АМОРФНОГО ЖЕЛЕЗА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТИПА**

**А.Е. Антонов**, докт. техн. наук, **И.С. Петухов**, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

e-mail: aoe@ied.org.ua

*Получены частотные зависимости потерь в ленточных магнитопроводах из аморфного железа при радиальной и аксиальной ориентации магнитного поля ротора в электромеханическом преобразователе магнитоэлектрического типа. Выполнен сравнительный анализ полученных частотных зависимостей потерь с потерями в магнитопроводах из электротехнической стали. Определены структуры магнитоэлектрических двигателей, в которых целесообразно применение ленточных магнитопроводов. Библ. 6, рис. 5.*

**Ключевые слова:** шихтованный магнитопровод, ленточный магнитопровод, потери на вихревые токи и гистерезис, магнитоэлектрический двигатель.

Настоящее исследование продолжает цикл работ, направленных на создание технологичных магнитопроводов, в том числе сложной формы для быстроходных и моментных электродвигателей.

трических машин с намагниченным ротором. Ранее были разработаны и исследованы магнитопроводы, выполненные безотходным методом порошковой металлургии из технического чистого железа и его сплавов и определены диапазоны частот перемагничивания, в пределах которых целесообразно их использование [1].

Цель исследования – оценка возможностей ленточных магнитопроводов, изготовленных из аморфного ферромагнитного материала на основе железа [5], входящих в состав электромеханических систем с постоянными магнитами, а также определение объектов, в которых применение такого материала было бы наиболее целесообразным.

Аморфное железо промышленно выпускается в виде ленты толщиной 15...22 мкм и шириной до 30 мм [6]. Учитывая некоторые свойства аморфного железа, такие, как низкая коэрцитивная сила (0,5...0,7 А/м), высокая начальная и максимальная магнитная проницаемость (до 450000 при  $f = 1$  кГц и  $H = 0,1$  А/м) и высокое удельное сопротивление (1,25 Ом·мм<sup>2</sup>/м), область его преимущественного применения ограничена высокочастотными трансформаторами, дросселями и некоторыми типами датчиков. Уровень потерь в сердечнике, изготовленном из материала ММ-1, согласно данным [6], составляет 5 Вт/кг при частоте перемагничивания 20 кГц и величине индукции 0,2 Тл. Однако в электромеханических преобразователях магнитопроводы работают при намного более низких частотах, но при более высоких индукциях, соответствующих техническому насыщению материала, то есть порядка 1...1,3 Тл. Поставленная авторами задача и состояла в исследовании поведения высокотехнологичных тороидальных сердечников из аморфного материала в подобных условиях.

Ввиду небольшой ширины промышленно выпускаемой ленты возможные размеры традиционных магнитопроводов с радиальным направлением поля возбуждения электрической машины ограничены. Рассмотрены две наиболее распространенных структуры магнитоэлектрических систем, в состав которых входит магнитопровод с радиальным и аксиальным расположением осей намагничивания постоянных магнитов системы возбуждения.

В первом случае вращающееся магнитное поле двухполюсной магнитной системы (рис. 1) моделировалось в ее поперечном сечении с помощью пакета COMSOL. Изолинии векторного магнитного потенциала на рис. 1 показывают особенности такой структуры, в которой поле, проникая в сердечник статора, имеет составляющую, нормальную элементам поверхности ленты. Эта особенность должна обуславливать увеличенные потери в магнитопроводе на вихревые токи, которые и являлись предметом исследования такой модели. В качестве исследуемого материала был выбран сплав ММ-4 [6], имеющий индукцию насыщения  $B_s$  не менее 1,28 Тл, начальную магнитную проницаемость  $\mu_{\max} = 4000...12000$  и удельное электрическое сопротивление  $\rho = 1,3$  Ом·мм<sup>2</sup>/м. Из-за отсутствия точных данных об основной кривой намагничивания этого материала она была аппроксимирована по приведенным данным с помощью функции Фрöhлиха (Fröhlich):

$$H = 1 + \frac{\mu_{\max}}{1 + (|B|/B_s)^m}, \quad (1)$$

где  $m=12$ .

График полученной кривой показан на рис. 2. Отметим, что идентификация кривой намагничивания при помощи лишь трех параметров ( $\mu_{\max}$ ,  $B_s$ ,  $m$ )



Рис. 1

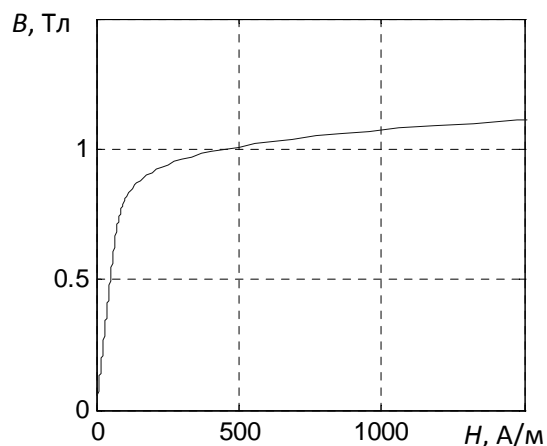


Рис. 2

является достаточной для проведения оценочных расчетов.

Расчеты потерь проведены для магнитопровода с внутренним и наружным диаметрами 21 и 28 мм соответственно. Поле в исследуемой модели возбуждено интерметаллической композицией NdFeB с остаточной индукцией 1 Тл и относительной магнитной проницаемостью  $\mu=1,04$ . Поскольку задача решалась в двухмерной постановке, удельные потери от вихревых токов определялись как отношение интеграла от плотности потерь по поперечному сечению магнитопровода статора (это значение предоставляется в интерфейсе среды COM-SOL) к площади этого сечения.

В качестве сравнения проводился расчет поля с магнитопроводом, изготовленным из электротехнической стали 1411 с толщиной листа 0,35 мм. Локальное распределение потерь на вихревые токи при этом определялось по распределению амплитуды магнитной индукции в магнитопроводе, полученной в результате расчета поля в соответствии со справочными

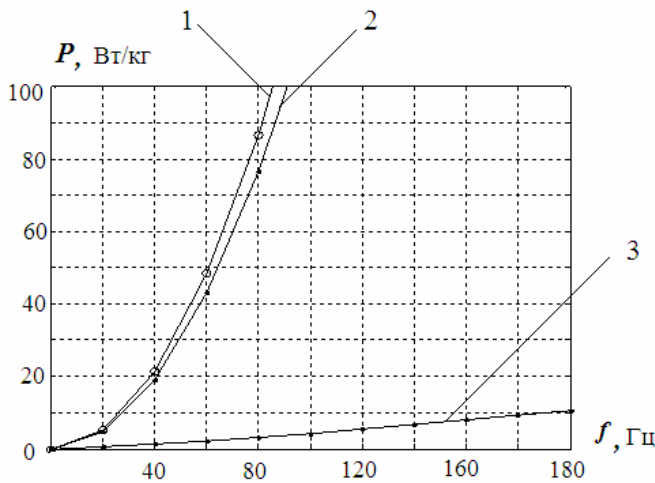


Рис. 3

данными с учетом соотношения между общими потерями и потерями на гистерезис [4]. Удельные потери на единицу массы магнитопровода вычислялись интегрированием локального значения потерь с учетом их частотной зависимости. Зависимость удельных потерь от частоты для описанных выше условий приведена на рис. 3, где наряду со значениями потерь на вихревые токи для ленточного магнитопровода из аморфного сплава ММ-4 (кривая 2), значением потерь для шихтованного магнитопровода из стали 1411 (кривая 3) приведены также данные для гипотетического массивного магнитопровода с характеристиками сплава ММ-4 (кривая 1).

Как и ожидалось, наличие составляющих вращающегося поля, нормальных поверхности аморфной ленты, приводит к значительным потерям на вихревые токи, величина которых соизмерима с потерями в массивном магнитопроводе, несмотря на повышенное омическое сопротивление материала и немагнитные промежутки между витками ленты. Поэтому даже уникальные свойства аморфного материала не создают сколько-нибудь благоприятных условий для использования ленточного магнитопровода в случае радиальной ориентации поля системы возбуждения при частотах перемагничивания выше 25...30 Гц. Областью применения магнитопровода, изготавливаемого по безотходной технологии, могут быть моментные и тихоходные двигатели.

При моделировании бесконтактной электрической машины аксиального исполнения рассмотрена четырехполюсная магнитная система, представленная на рис. 4. Использование как минимум четырехполюсной конфигурации обусловлено тем, что двухполюсная магнитная система в аксиальном исполнении далека от оптимальной по многим показателям.



Рис. 4

Аксиальная конфигурация магнитной системы обеспечивает направление магнитного потока вдоль плоскости навитой ленты, аналогично тому, как ориентирован поток радиального направления в шихтованном магнитопроводе традиционной конструкции. Для упрощения решения задачи магнитная проницаемость магнитопровода ротора, в котором отсутствуют потери, принималась равной бесконечности и он, таким образом, исключался из расчетной области. Характер распределения поля в ярме магнитопровода статора в данном случае по-

добен такому при радіальному намагнічуванню (рис. 1), однако практическое отсутствие магнитного поля, нормального поверхности листа, исключает появление в этой плоскости вихревых токов. Частотные зависимости потерь в магнитопроводах, изготовленных из аморфной ленты толщиной 20 мкм (кривая 1) и ленты, выполненной из стали 1521 толщиной 0,1 мм (кривая 2), приведены на рис. 5.

Таким образом, магнитные свойства аморфных материалов позволяют увеличить КПД электромеханических систем при аксиальной ориентации потока возбуждения за счет многократного снижения потерь на вихревые токи и гистерезис в магнитопроводе статора. Очевидно, что преимущество магнитопроводов из аморфных сплавов по сравнению с электротехническими сталями тем больше, чем выше частота их перемагничивания. Следует также отметить, что частотные зависимости потерь в магнитопроводах электромеханических преобразователей с аксиальным полем ротора будут отличаться от таковых для сердечников трансформаторов и дросселей. Это объясняется тем, что из-за кривизны магнитопровода в нем присутствуют составляющие магнитной индукции, пересекающие витки ленты под некоторым углом, что определяет возбуждение в них дополнительных вихревых токов и приводит к дополнительным потерям. Причем, чем меньше полюсность машины, и чем больше кривизна магнитопровода, тем выше величина дополнительных потерь. Однако исследование этого весьма обширного явления выходит за рамки настоящей статьи.

**Выводы.** 1. Использование аморфных ферромагнитных сплавов в конструкциях магнитопроводов магнитоэлектрических машин позволяет улучшить энергетические показатели машины при одновременном повышении ее технологичности.

2. В магнитоэлектрических машинах с радиальным намагничиванием использование ленточного магнитопровода эффективно только при низких частотах питания, в частности в моментных и тихоходных двигателях.

3. В магнитоэлектрических машинах с аксиальным намагничиванием использование ленточных магнитопроводов из аморфных сплавов позволяет в полной мере использовать магнитные свойства этих сплавов. Однако зависимость удельных потерь от полюсности электрической машины требует дополнительных исследований.

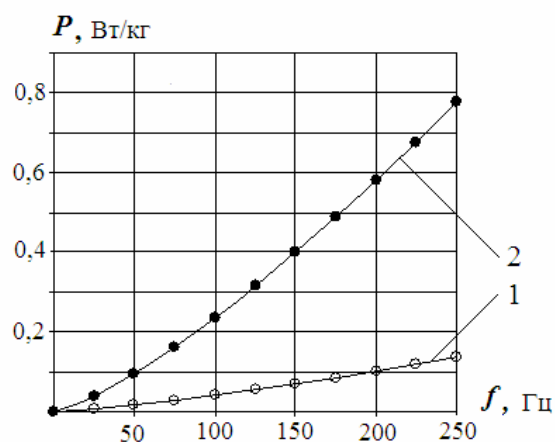


Рис. 5

1. Антонов А.Е., Филоменко А.А. Порошковые магнитопроводы для магнитоэлектрических машин // Техн. электродинамика. – 2014. – № 2. – С. 44–46.
2. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
3. Носенко В.К. Аморфні та нанокристалічні сплави для приладобудування і енергоефективних технологій // Вісн. НАН України. – 2015. – №4. – С. 68–79.
4. Сергеев П.С. и др. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1970. – 632 с.
5. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. / Под ред. Масумото Ц. Пер. с япон. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.
6. Ферриты и ферритовые сердечники. Электронные компоненты: ферритовые кольца, трансформаторы, дроссели [Электронный ресурс] ООО "Астера", ЧП Терейковский А.С. - Режим доступа: <http://ferrite.com.ua>

УДК 621.313.8

О.Є. Антонов, докт. техн. наук, І.С. Петухов, докт. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Стрічкові магнітопроводи з аморфного заліза в електричних машинах магнітоелектричного типу**

Отримано частотні залежності втрат у стрічкових магнітопроводах з аморфного заліза за умов радіальної та аксіальної орієнтації магнітного поля ротора в електромеханічному перетворювачі магнітоелектричного типу. Виконано порівняльний аналіз отриманих частотних залежностей втрат із втратами в магнітопрово-

дах, виготовлених з електротехнічної сталі. Визначено структури магнітоелектричних двигунів, в яких доцільне застосування стрічкових магнітопроводів. Бібл. 6, рис. 5.

**Ключові слова:** шихтований магнітопровід, стрічковий магнітопровід, втрати на вихрові струми та гістерезис, магнітоелектричний двигун.

**A.E. Antonov, I.S. Petukhov**

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **The tape magnetic cores from amorphous iron in magnetoelectric type electric machines**

*The frequency dependences of losses in tape amorphous iron cores with radial and axial orientation of the magnetic flux of the rotor in electromechanical transducers of magnetoelectric type are obtained. A comparative analysis of the obtained frequency dependencies of the losses with those in the magnetic cores of electrical steel was executed. The structures of magnetoelectric motors, in which it is advisable to use the tape magnetic cores were determined. References 6, figures 5.*

**Key words:** laminated magnetic core, tape magnetic core, eddy current and hysteresis losses, magnetoelectric motor.

Надійшла 15.07.2016

Received 15.07.2016

УДК 621.313

## **ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ, ОБУМОВЛЕНИХ ВИЩИМИ ГАРМОНІКАМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ**

**І.В. Головань**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна  
e-mail: giv\_6@ied.org.ua

*Запропоновано підхід до розрахунку втрат, обумовлених вищими гармоніками електромагнітного поля асинхронного двигуна (АД), виходячи з співставлення результатів польового аналізу квазістаціонарних та нестаціонарних процесів електромагнітного поля АД. На прикладі АД з масивним гладким феромагнітним ротором проведено аналіз впливу різних чинників на величину втрат, обумовлених вищими гармоніками поля. Бібл. 8, рис. 4, таблиця.*

**Ключові слова:** втрати, вищі гармоніки, квазістаціонарне, нестаціонарне.

**Вступ.** Однією з причин зменшення ККД асинхронних двигунів (АД), зростання температури його активних частин, зниження моменту на валу двигуна є наявність додаткових втрат в АД.

Незважаючи на те, що питання додаткових втрат у традиційних конструкціях АД досліджено до теперішнього часу достатньо глибоко і знайдено різноманітні способи зменшення цих втрат [3], значення їх в АД залишаються достатньо високими. Так, реальні додаткові втрати в серійних АД можуть перевищувати значення 0,5 % від спожитої потужності (відповідно до ГОСТ 11828-75) і сягати 3 % й більше [1]. Величина додаткових втрат в АД нетрадиційних конструкцій, наприклад в АД з масивними елементами в колі ротора, у порівнянні з серійними АД може перевищувати в декілька разів, що робить такі двигуни взагалі недоцільними в експлуатації. Зменшення додаткових втрат в АД є необхідною передумовою до покращення експлуатаційних показників.

Основну частку додаткових втрат АД складають магнітні, а саме втрати, обумовлені вищими гармоніками поля.

Через складність визначення втрат, обумовлених вищими гармоніками поля, виникнення яких пов'язано з складними фізичними явищами і процесами, існуючі методики їх розрахунку носять наближений характер [1, 3, 4, 7].

У рамках існуючої теорії проектування електричних машин методики визначення втрат, обумовлених вищими гармоніками поля, представляються у вигляді спрощених аналі-