

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 621.313

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ НА ВИХРЕВЫЕ ТОКИ В ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ВЫСОКООБОРОТНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е.*

*Уфимский государственный авиационный технический университет,
УГАТУ, ул. К. Маркса, 12, Уфа, 450008, Республика Башкортостан, Россия*

** e-mail: s2_88@mail.ru*

Исследованы потери на вихревые токи в постоянных магнитах высокооборотных электромеханических преобразователей энергии. Отдельно рассмотрены потери, обусловленные временными и пространственными гармониками. Произведена их численная оценка и описаны методы их минимизации.

Ключевые слова: высокооборотные электрические машины, пространственные и временные гармоники, потери на вихревые токи.

Введение

Высокооборотные электромеханические преобразователи энергии (ЭМПЭ) с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ) находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Так, в [1, 2] описаны высокооборотные ЭМПЭ с ВПМ, применяемые в современных летательных аппаратах, таких, как F-35 или F-16; в [3, 4] — высокооборотные ЭМПЭ с ВПМ, используемые для электроснабжения космических аппаратов; в [5, 6] — для наземных энергетических установок; в [7–9] — для транспортной энергетики. Особо перспективны высокооборотные ЭМПЭ с ВПМ для электроснабжения беспилотных летательных аппаратов.

Анализ публикаций показывает, что потребность промышленности в высокооборотных ЭМПЭ с частотой вращения ротора от 48000 до 120 000 об/мин

и мощностью от 5 до 250 кВт растет с каждым годом. При этом существует ряд технических проблем, которые сдерживают рост рынка высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ. К таким проблемам относятся вопросы стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ (решаются использованием статического преобразователя или подмагничиванием спинки статора либо использованием инвертора), обеспечения надежности подшипниковых опор (решаются использованием бесконтактных подшипниковых опор), вопросы коротких замыканий в ЭМПЭ с ВПМ (решаются использованием высокоиндуктивных ЭМПЭ или различных разъединителей), а также задачи снижения тепловыделений ротора ЭМПЭ с ВПМ. Последние обусловлены сложностью охлаждения быстровращающегося ротора.

Постановка задач исследования

Основным источником тепловыделений ротора в высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ являются потери на вихревые токи, индуцируемые в электропроводящих постоянных магнитах и бандажной оболочке ротора.

Потери на вихревые токи в ВПМ и бандажной оболочке ротора создаются пространственными гармониками (вызванными конструктивными особенностями ЭМПЭ, зубчатостью статора, схемой обмоток и коэффициентом распределения), а также временными гармониками ЭМПЭ (обусловленными внешней цепью, например инвертором или выпрямителем). Причем при неверном выборе параметров ЭМПЭ потери на вихревые токи могут привести к перегреву ВПМ и их размагничиванию под действием этого перегрева.

В работах отечественных и зарубежных авторов данные потери рассматриваются отдельно, при этом разные авторы при расчетах пренебрегают тем или иным видом потерь на вихревые токи в ВПМ. Так, в работах Н. Poliender [10] рассматриваются только потери на вихревые токи, создаваемые временными гармониками, а потерями, создаваемыми пространственными гармониками, пренебрегают. В [11] рассматриваются потери в ВПМ, создаваемые пространственными гармониками, обусловленными зубчатостью статора. В [12] делается предположение, что потери в ВПМ могут быть разделены по аналогии с магнитопроводом статора на потери на вихревые токи и на гистерезис.

Обычно считается, что потери, обусловленные временными гармониками, выше, чем потери, обусловленные пространственными гармониками. Это утверждение справедливо только для ряда конструктивных схем высокооборотных ЭМПЭ. Так, например, ЭМПЭ с зубцовой обмоткой имеют зна-

чительные пространственные гармоника и потери в них, обусловленные этими гармониками, выше, нежели потери, обусловленные временными гармониками.

Поэтому основной задачей данной работы является исследование физических основ потерь в ВПМ на вихревые токи, анализ потерь, обусловленных пространственными гармониками и временными гармониками, а также разработка различных методик их расчета.

Потери на вихревые токи в ВПМ и в бандаже, создаваемые временными гармониками

Как отмечалось выше, данные потери формируются внешней цепью (выпрямителем или инвертором), которая устанавливается на выходе ЭМПЭ для передачи в сеть стандартной частоты. Для оценки этих потерь наиболее удобно использовать выражения, полученные Н. Poliender для расчетной схемы ЭМПЭ (рис. 1):

$$P_{ВПМ} = \frac{rlh_m b_m^2}{12\rho_m} \left\{ \left\{ (pa_m + \sin(pa_m)) \left(\frac{d}{dt} (\hat{B} \cos(p\beta)) \right) \right\}^2 + \left\{ (pa_m - \sin(pa_m)) \left(\frac{d}{dt} (\hat{B} \cos(p\beta)) \right) \right\}^2 \right\},$$

где p — число пар полюсов; l — длина ВПМ; h_m — высота ВПМ; ρ_m — удельное сопротивление постоянных магнитов; r — средний радиус воздушного зазора; a_m — угол полюса; b_m — длина полюсной дуги; \hat{B} — магнитная индукция, создаваемая временными гармониками.

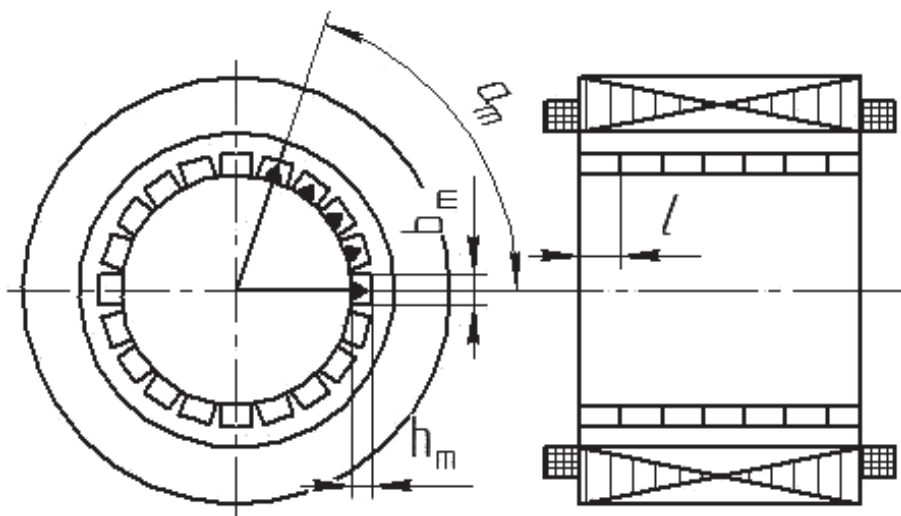


Рис. 1. К расчету потерь от временных гармоник

Основной проблемой использования данного выражения является сложность определения магнитной индукции, создаваемой временными гармониками. Для расчета этой индукции необходимо знать величину временных гармоник, создаваемых различными типами нелинейной нагрузки в обмотках ЭМПЭ с ВПМ. Для решения данной задачи была разработана имитационная модель ЭМПЭ с внешней сетью в среде LTSpice IV, содержащая трехфазный ЭМПЭ с ВПМ, неуправляемый выпрямитель и нагрузку постоянного тока. Чтобы исключить влияние на исследуемый гармонический состав конструктивных особенностей ЭМПЭ, т. е. пространственных гармоник, ЭМПЭ был представлен тремя однофазными источниками и тремя парами магнитно-связанных индуктивностей, образующих трехфазный источник напряжения.

Имитационное моделирование проводилось для системы, содержащей трехфазный источник переменного напряжения 115/200 В (ЭМПЭ с ВПМ) с частотой 400 Гц с заземленной нейтралью и нагрузку, подключаемую через однофазный или трехфазный выпрямитель (рис. 2).

Для упрощения сравнительного анализа и определения влияния той или иной схемы включения на потери в ЭМПЭ результаты моделирования были сведены в табл. 1. Из таблицы видно, что при подключении трехфазного выпрямителя фазный ток ЭМПЭ с ВПМ содержит, кроме основной гармоники, также гармоники с номерами 5, 7, 11, 13, 17, 19. Гармоники, кратные трем, отсутствуют. При этом наиболее худший вариант для исследуемых численных параметров имеет место при трехфазной активно-емкостной нагрузке и однофазной активно-емкостной нагрузке. В этом случае коэффициент гармоник достигает 95,2%. При активной не-

линейной трехфазной нагрузке коэффициент гармонических искажений составляет 29 %. При этом при активно-индуктивной нелинейной нагрузке коэффициент гармонических искажений равен 31,1 %.

Очевидно, что гармонический состав напряжения ЭМПЭ с ВПМ при работе с нелинейной нагрузкой характеризует и гармонический состав магнитной индукции, создаваемой временными гармониками. То есть искажения напряжения будут показывать и величину магнитного поля, создаваемого временными гармониками. Тогда, используя таблицу, можно определять уровень потерь для различных комбинаций внешней цепи.

С целью подтверждения данных компьютерного моделирования была разработана экспериментальная установка. Установка состоит из двигателя постоянного тока (ДПТ), ЭМПЭ, широтно-импульсно модулируемого (ШИМ) регулятора частоты вращения вала ДПТ, выполняющего роль привода, выпрямителя с активной нагрузкой. ШИМ регулятором задается частота вращения вала ДПТ с независимым возбуждением, к которому подключена обмотка якоря. Обмотка возбуждения ДПТ питается от источника постоянного тока с напряжением 27 В, током 2 А. Питание регулятора частоты вращения осуществляется от источника постоянного тока с напряжением 27 В, током 15 А. Вал ДПТ механически связан с валом ЭМПЭ (параметры ЭМПЭ: $n = 8000$ об/мин, $U_{\text{вых}} = 36$ В, $I_{\text{вых}} = 3,2$ А). Выходы обмотки статора ЭМПЭ через трехфазный выпрямитель подключены к резистивной нагрузке мощностью 100 Вт с последовательно включенными трансформаторами тока типа *LTS-6NP*.

Результаты экспериментальных исследований соответствуют данным имитационного моделирования, что позволяет судить об адекватности раз-

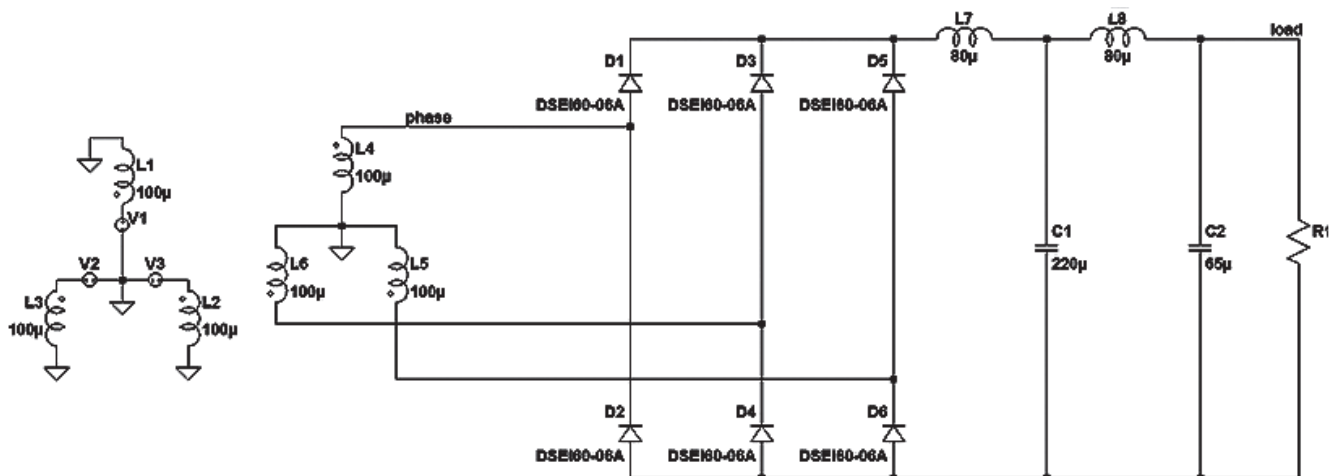


Рис. 2. Имитационная модель ЭМПЭ с внешней сетью для определения временных гармоник и потерь, создаваемых ими

Сравнение результатов моделирования схем подключения

Схема, рисунок	S , кВт	P , кВт	$\cos \varphi$	$\cos \varphi_{(1)}$	Коэффициент гармоник, %
Трёхфазная активная нагрузка	18,0	17,3	0,96	1,00	29,0
Трёхфазная активно-емкостная нагрузка	24,7	17,5	0,71	0,99	95,2
Трёхфазная активно-индуктивная нагрузка	17,9	17,1	0,95	1,00	31,3
Трёхфазная активно-индуктивно-емкостная нагрузка	18,0	17,1	0,95	1,00	31,7
Однофазная активная нагрузка	3,1	3,1	1,00	1,00	2,4
Однофазная активно-емкостная нагрузка	6,9	4,5	0,65	0,90	93,3
Однофазная активно-индуктивная нагрузка	3,1	3,1	1,00	1,00	3,6
Однофазная активно-индуктивно-емкостная нагрузка	6,2	4,7	0,76	0,97	76,9

работанной схемы имитационной модели полученным на ней теоретическим результатам: частота основной гармоники 396 Гц; коэффициент гармоник 29,6%; $\cos \varphi = 0,95$; $\cos \varphi_{(1)} = 1,0$ [13].

Важно отметить, что, используя полученные данные, можно определить потери в ВПМ и бандажной оболочке ротора.

Так, например, были выполнены расчеты для ЭМПЭ с частотой вращения ротора 5000 и 32000 об/мин при активно-индуктивной нагрузке. В результате установлено, что для нешихтованных ВПМ в осевом направлении потери в ВПМ на вихревые токи при частоте 5000 об/мин составляют порядка 8 Вт, а при частоте 32000 об/мин более 280 Вт.

Потери на вихревые токи в ВПМ и в бандаже, создаваемые пространственными гармониками

Данные потери определяются типом паза, размером его шлица, типом обмотки, т. е. зависят от множества различных факторов. Аналитическое определение этих потерь затруднительно и не дает необходимой точности. Поэтому для анализа потерь в ВПМ и бандажной оболочке ротора предпочтительнее использовать метод конечных элементов.

Далее рассматривается методика определения потерь в ВПМ, создаваемых пространственными гармониками, с использованием программного комплекса Ansys Maxwell.

Для решения данной задачи в Ansys Maxwell необходимо задать удельную проводимость ВПМ (строка Bulk Conductivity в свойствах постоянных магнитов, для SmCo удельная проводимость составляет 1100000 См/м, для NdFeB 625000 См/м). После этого в окне проекта, в разделе Excitation, необходимо выбрать расчет вихревых токов (Set Eddy

Effects) и выбрать для расчета постоянные магниты и бандажную оболочку.

В результате компьютерного моделирования во вкладке *Fields Overlaps-Field-Ohmic_loss* будет получено распределение потерь на вихревые токи в бандажной оболочке ротора и ВПМ от пространственных гармоник, измеримых в Вт/м³. На рис. 3—5 в качестве примера приведено распределение магнитного поля и потерь на вихревые токи в ВПМ, обусловленные пространственными гармониками, для ЭМПЭ с частотой вращения ротора 60000 об/мин и мощностью 250 кВт с распределенной обмоткой, беспазовой ЭМПЭ и ЭМПЭ с зубцовой обмоткой. Число пар полюсов для всех рассматриваемых вариантов было равно четырем.

Из рисунков видно, что минимальные потери на вихревые токи в ВПМ, обусловленные пространственной гармоникой, имеет беспазовый ЭМПЭ с распределенной обмоткой, а максимальные — ЭМПЭ с зубцовой обмоткой. Потери в ЭМПЭ с распределенной и зубцовой обмоткой различаются более чем в шесть раз (для распределенной обмотки потери, вызванные пространственными гармониками, составляют 50—70 Вт, а для зубцовой обмотки — 350 Вт). Поэтому очевидно, что в высокооборотных ЭМПЭ с зубцовой обмоткой потери на вихревые токи, обусловленные пространственными гармониками, превышают потери на вихревые токи в ВПМ и бандаже ротора, обусловленные временными гармониками.

Также целесообразно оценить влияние типа магнитной системы (МС) ротора на потери на вихревые токи в ВПМ высокооборотных ЭМПЭ.

Эта задача также решалась методами компьютерного моделирования. Результаты решения задачи приведены на рис. 6.

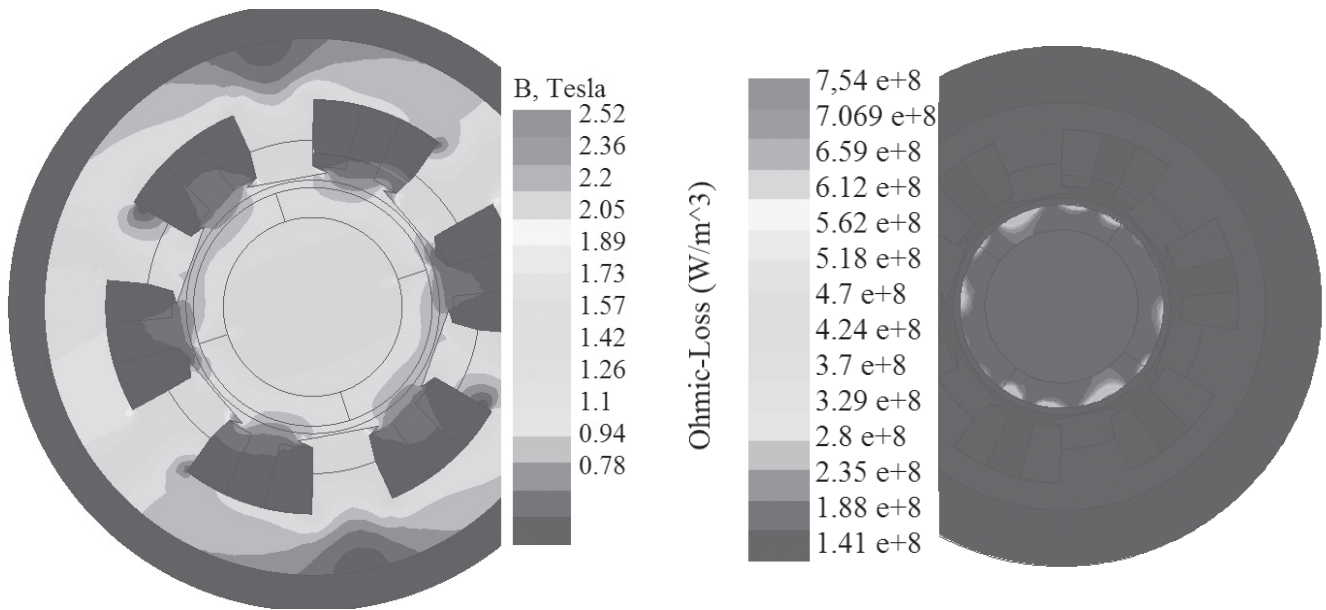


Рис. 3. Распределение магнитного поля (справа) и потерь на вихревые токи в постоянных магнитах (слева) в ЭМПЭ с зубцовой обмоткой

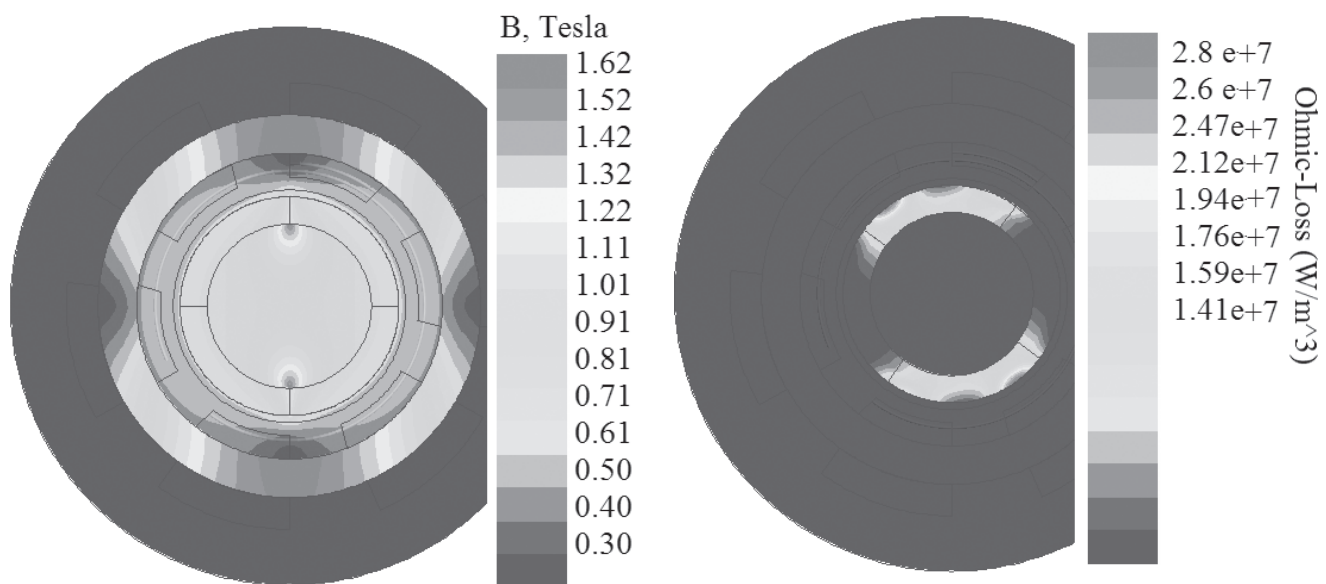


Рис. 4. Распределение магнитного поля (справа) и потерь на вихревые токи в постоянных магнитах (слева) в беспазовом ЭМПЭ

Из рисунка видно, что тип МС ротора влияет на потери в ВПМ несущественно. Это объясняется тем, что потери в ВПМ формируются магнитным полем статора, а при неизменной пазовой зоне магнитное поле статора также остается неизменным. В процессе исследований имел место именно такой случай: в ЭМПЭ изменялась только магнитная система ротора.

Также из полученных зависимостей видно, что с ростом частоты вращения потери в ВПМ имеют точку максимума, после которой они начинают убывать. Это объясняется тем, что с увеличением частоты вращения ротора уменьшается глубина

проникновения магнитного поля в тело постоянно-го магнита и бандажа и тем самым потери снижаются. Искусственное изменение глубины проникновения магнитного поля в тело ВПМ за счет изменения величины воздушного зазора может быть использовано как способ минимизации данного типа потерь.

Таким образом, анализ потерь на вихревые токи в ВПМ, создаваемые пространственными гармониками ЭМПЭ, показал, что влияние магнитной системы незначительно. При этом из-за изменения угла нагрузки потери на вихревые токи в ВПМ

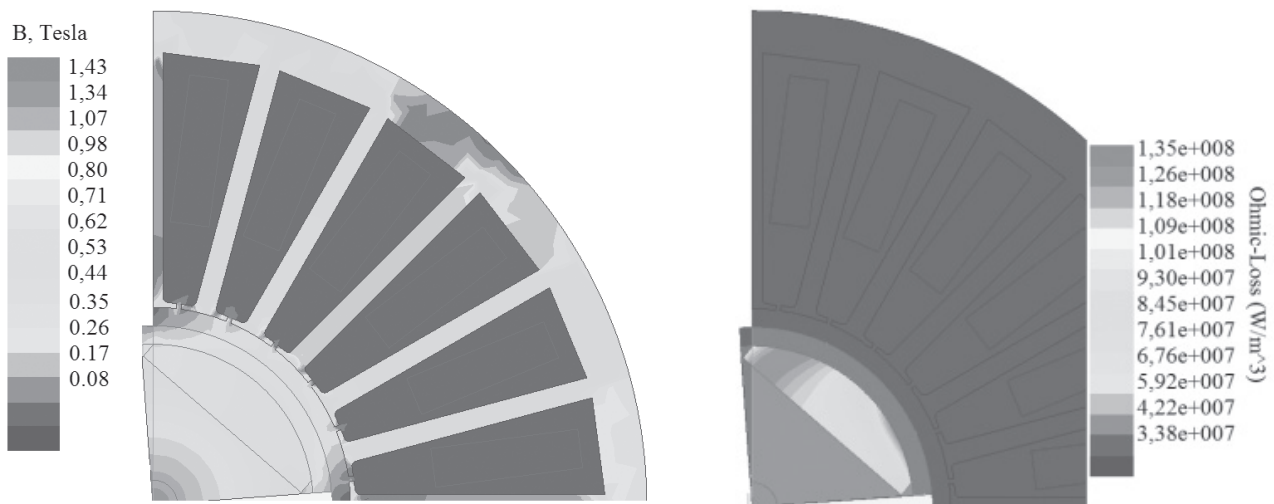


Рис. 5. Распределение магнитного поля (справа) и потерь на вихревые токи в постоянных магнитах (слева) в ЭМПЭ с распределенной обмоткой

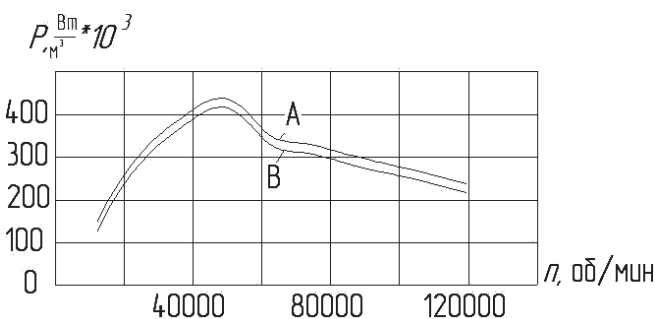


Рис. 6. Зависимость потерь на вихревые токи в ВПМ от частоты и типа МС: А— для МС с цилиндрическими ВПМ; В— для МС с полукруглыми ВПМ

могут существенно изменяться. Это необходимо учитывать при проектировании ЭМПЭ с ВПМ.

Методы снижения потерь на вихревые токи в ВПМ

Исходя из проведенного анализа и выявленной сущности физических явлений, лежащих в основе потерь, индуцируемых в ВПМ, можно предложить и методы их минимизации.

Очевидно, что снижение потерь в высокооборотных ЭМПЭ на вихревые токи в бандаже и ВПМ может быть достигнуто следующими способами:

а) для потерь, создаваемых временными гармониками:

- увеличение числа фаз и снижение тем самым пульсаций. Обычно использование 6- или 9-фазных ЭМПЭ, работающих на 12- или 18-пульсный выпрямитель, позволяет минимизировать потери, вызванные временными гармониками, в два—три раза;

- увеличение воздушного зазора;
- выполнение бандажной оболочки ротора и ВПМ шихтованными в осевом направлении;

б) для потерь, создаваемых пространственными гармониками:

- использование скоса пазов и выбора большого коэффициента распределения обмотки; также может использоваться не только скос пазов, но и намагиченность ВПМ со скосом в осевом направлении;

- выполнение бандажной оболочки ротора и ВПМ шихтованными в осевом направлении;
- увеличение воздушного зазора.

Для ЭМПЭ с зубцовой обмоткой минимизация потерь на вихревые токи, обусловленных пространственными гармониками, может быть достигнута правильным выбором соотношения числа пазов статора и числа полюсов ротора.

Необходимо отметить, что каждый из этих методов имеет определенную эффективность и на стадии проектирования ЭМПЭ необходимо искать оптимум между использованием того или иного способа снижения потерь на вихревые токи в ВПМ ЭМПЭ и величиной этих потерь.

Выводы

Рассмотрена физическая основа возникновения потерь на вихревые токи в высококоэрцитивных постоянных магнитах высокооборотных ЭМПЭ. Определены методы расчета потерь, вызванных временными и пространственными гармониками; описаны методики их расчета. Установлено, что в основном потери, вызванные временными гармониками, превышают потери, обусловленные пространственными гармониками, за исключением случаев использования зубцовой обмотки. Показано, что конструкция магнитной системы ротора практически не оказывает влияния на потери на вихревые токи в ЭМПЭ. Также рассмотрены основные методы снижения данного типа потерь.

Полученные результаты могут быть использованы на практике при проектировании высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ.

Результаты получены в рамках проекта РФФИ «Исследования электромагнитных и тепловых процессов, а также их взаимодействия в термоинерционных электромеханических преобразователях энергии с высококоэффициентными постоянными магнитами».

Библиографический список

1. *Ganev E.* Selecting the Best Electric Machines for Electrical Power-Generation Systems: High-performance solutions for aerospace More electric architectures // IEEE Electrication Magazine. 2014. Vol. 2. No. 4, pp. 13-22.
2. *Lahne H.-C., Gerling D.* Investigation of High-Performance Materials in Design of a 50000 rpm High-Speed Induction Generator for use in Aircraft Applications // Conference «Workshop on Aircraft System Technologies» (AST 2015) at Hamburg. 10 p.
3. *Gieras J.F.* Advancements in Electric Machines (Power Systems). — Springer, Berlin. 2008, pp. 81-113.
4. *Zwyssig C., Kolar J.W., Round S.D.* Megaspeed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million r/min // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2009. Vol. 14. No. 5, pp. 564-574.
5. *Bobtsov A., Pyrkin A., Ortega R., Vukosavic S., Stankovic A., Panteley E.* A robust globally convergent position observer for the permanent magnet synchronous motor // Automatica. 2015, pp. 47-54.
6. *Zwyssig C., Kolar J. W., Round S.D.* Power Electronics Interface for a 100 W, 500000 rpm Gas Turbine Portable Power Unit // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. APEC '06. 2006, pp. 283-289.
7. *Abdi B., Milimonfared J., Moghani J.* Simplified Design and Optimization of Slotless Synchronous PM Machine for Micro-Satellite Electro-Mechanical Batteries // Advances in Electrical and Computer Engineering. 2009. Vol. 9. No. 3, pp. 84-88.
8. *Hong D.K., Woo B.C., Jeong Y.H., Koo D.H., Ahn C.W.* Development of an Ultra High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2013. Vol. 14. No. 3, pp. 493-499.
9. *Borisavljevic A., Polinder H., Ferreira J.* On the Speed Limits of Permanent-Magnet Machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57. No. 1, pp. 220-227.
10. *Polinder H., Hoeijmakers M.J.* Eddy-Current Losses in the Permanent Magnets of a PM Machine // Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives (EMD '97). Cambridge, UK. 1997. No. 444, pp. 138-142.
11. *Согрин А.И.* Потери в роторе синхронной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов // Наука ЮУрГУ. Материалы 66-й научной конференции: Сборник трудов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2014. С. 1264-1271.
12. *Pyrhönen J., Ruoho S., Nerg J., Paju M., Tuominen S., Kankaanpää H., Stern R., Boglietti A. and Uzhegov N.* Hysteresis Losses in Sintered NdFeB Permanent Magnets in Rotating Electrical Machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2015. Vol. 62. No. 2, pp. 857-865.
13. *Фаррахов Д.Р., Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Гайсин Р.А., Вавилов В.Е.* Оценка влияния характера нелинейной нагрузки на высшие гармонические составляющие тока в бесконтактных магнитоэлектрических генераторах // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 4(540). С. 27-31.
14. *Ле Д.Т., Аверин С.В.* Формирование векторной широтно-импульсной модуляции с исключением сквозных токов в трехфазном мостовом инверторе // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 155-163.
15. *Кириллов В.Ю., Томилин М.М.* Расчёт перекрёстных помех в электрических цепях рулевого привода самолёта // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 137-144.

ON EDDY-CURRENTS LOSSES DETERMINATION IN PERMANENT MAGNETS OF HIGH-SPEED ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTERS

Ismagilov F.R., Vavilov V.E.*

*Ufa State Aviation Technical University,
USATU, 12, K. Marx str., Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia
* e-mail: s2_88@mail.ru*

Abstract

The industry demand for high-speed electric motors with rotation frequency of 48,000 rpm to 120,000 rpm and power of 5 to 250 kW increases from year to year. A number of technological problems exists herewith,

which retards the high-speed electric motors market growth. These problems relate to the issues of their output voltage stabilization, which are solved by employing static converter, stator back magnetizing, or

rectifier; ensuring bearing assembly reliability, which are solved by employing non-contact bearing assembly, as well as the problems of rotor heat evolution reduction. The latter are stipulated by the complexity of fast-rotating rotor's cooling.

To solve this problem, the article studies losses caused by eddy currents in permanent magnets of high-speed electromechanical energy converters.

The eddy currents losses in permanent magnets and rotor retaining shell are generated by spatial harmonics caused by electric motor structural specifics, stator serration, windings diagram and distribution ratio, as well as temporal harmonics, stipulated by the external circuit, such as inverter. Moreover, with the improper selection of the electric motor parameters eddy current losses may lead to the permanent magnets overheating and their demagnetizing under the effect of this overheating.

It is generally assumed, that the losses stipulated by temporal harmonics are higher than the losses caused by the spatial harmonics. This statement is valid only for a number of structural schemes of high-speed electric motors. For example, the electric motors with toothed windings feature significant spatial harmonics. And losses caused by these harmonics are higher than the losses caused by temporal harmonics.

It is found that with rotation speed increasing the losses in permanent magnets have maximum point, after which they start decreasing. This is explained by the fact that with rotor rotational speed increase, the magnetic field penetration depth into the permanent magnet body and bandage reduces. Thus, the losses reduce either.

The article shows also that the magnetic system does not exert a significant effect on the eddy current losses, created by spatial harmonics, in permanent magnets. The eddy currents losses in permanent magnets herewith may alter significantly due to load angle variation.

The article individually considers the losses caused by temporal and space harmonics. It also presents their numerical evaluation and describes of their minimization techniques.

Keywords: high-speed electric motors, spatial and temporal harmonics, eddy current losses.

References

1. Ganev E. Selecting the Best Electric Machines for Electrical Power-Generation Systems: High-performance solutions for aerospace More electric architectures. *IEEE Electrication Magazine*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. 13-22.
2. Lahne H.-C., Gerling D. Investigation of High-Performance Materials in Design of a 50000 rpm High-Speed Induction Generator for use in Aircraft Applications. *Conference "Workshop on Aircraft System Technologies" (AST 2015) at Hamburg*, 10 p.
3. Gieras J.F. *Advancements in Electric Machines* (Power Systems). Springer, Berlin, 2008, pp. 81-113.
4. Zwyssig C., Kolar J.W., Round S.D. Megaspeed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million r/min. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2009, vol. 14, no. 5, pp. 564-574.
5. Bobtsov A., Pyrkin A., Ortega R., Vukosavic S., Stankovic A., Panteley E. A robust globally convergent position observer for the permanent magnet synchronous motor. *Automatica*, 2015, pp. 47-54.
6. Zwyssig C., Kolar J. W., Round S.D. Power Electronics Interface for a 100 W, 500000 rpm Gas Turbine Portable Power Unit. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. APEC '06*. 2006, pp. 283-289.
7. Abdi B., Milimonfared J., Moghani J. Simplified Design and Optimization of Slotless Synchronous PM Machine for Micro-Satellite Electro-Mechanical Batteries. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 84-88.
8. Hong D.K., Woo B.C., Jeong Y.H., Koo D.H., Ahn C.W. Development of an Ultra High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, vol. 14, no. 3, pp. 493-499.
9. Borisavljevic A., Polinder H., Ferreira J. On the Speed Limits of Permanent-Magnet Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, no. 1, pp. 220-227.
10. Polinder H., Hoeijmakers M.J. Eddy-Current Losses in the Permanent Magnets of a PM Machine. *Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives (EMD '97)*. Cambridge, UK, 1997, no. 444, pp. 138-142.
11. Sogrin A.I. Nauka YuUrGU. *Materialy 66-i nauchnoi konferentsii: sbornik trudov*, Chelyabinsk, 2014, pp. 1264-1271.
12. Pyrhönen J., Ruoho S., Nerg J., Paju M., Tuominen S., Kankaanpää H., Stern R., Boglietti A. and Uzhegov N. Hysteresis Losses in Sintered NdFeB Permanent Magnets in Rotating Electrical Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 857-865.
13. Farrakhov D.R., Ismagilov F.R., Khairullin I.Kh., Gaisin R.A., Vavilov V.E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2015, no. 4(540), pp. 27-31.
14. Le D.T., Averin S.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 155-163.
15. Kirillov V.Yu., Tomilin M.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 137-144.