

УДК 621.313.8

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-52-61

Электромагнитный и тепловой анализ электрических машин из композитных материалов

Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, И.Ф. Саяхов, Е.А. Ематин

Развитие электрических, тепловых и механических свойств композитных материалов открывает новые возможности для замены металлических узлов при создании электрических машин. Низкая плотность большинства из них по сравнению с традиционными материалами позволяет снизить удельную массу, а также повысить технологичность за счет минимальной механической обработки и возможности создания деталей готовой формы. Исследования по применению композитных материалов в отдельных узлах электрических машин демонстрируют минимизацию материалоемкости, повышения плотности энергии и энергоэффективности. Один из способов увеличения плотности энергии и энергоэффективности — создание высокооборотных электрических машин, позволяющих вырабатывать максимальную мощность при минимальном объеме активных и конструктивных материалов. Характеристики электрических машин определяются потерями, которые в свою очередь зависят от электромагнитных и тепловых свойств используемых материалов. С этой стороны композитные материалы выгодно отличаются от традиционных. Так, композитные материалы — это материалы, состоящие из пластичных основ армированных наполнителями. Сочетания разнородных материалов приводит к созданию нового материала, свойства которого могут значительно отличаться от свойств отдельных его составляющих.

Представлены результаты сравнительного анализа для трех конструкций электрических машин с различным содержанием композитных материалов. Даны полные электромагнитные и тепловые расчеты методами конечных элементов, определены удельные характеристики и приведена оценка эффективности. Выявлено, что электрическая машина, полностью состоящая из композитных материалов, обладает на 73% меньшей массой по сравнению с электрической машиной, состоящей из традиционных материалов. Коэффициент полезного действия для полностью композитной электрической машины равен 92%, что подтверждает перспективность применения композитных материалов в узлах электрических машин. Тепловой анализ подтверждает полную работоспособность полностью композитной электрической машины.

Ключевые слова: метод конечных элементов, композитные материалы, высокоскоростная электрическая машина, полностью композитная электрическая машина.

Для цитирования: Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф., Ематин Е.А. Электромагнитный и тепловой анализ электрических машин из композитных материалов // Вестник МЭИ. 2020. № 2. С. 52—61. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-52-61.

Electromagnetic and Thermal Analysis of Electrical Machines Made of Composite Materials

F.R. Ismagilov, V.E. Vavilov, I.F. Sayakhov, E.A. Ematin

The progress in improvement of the electrical, thermal, and mechanical properties of composite materials opens new possibilities for replacing metal components in constructing electrical machines. Owing to low density of the majority of these materials in comparison with conventional materials, it becomes possible to decrease the specific weight and achieve better processability due to minimal machining and the possibility of making parts

having the finished shape. Studies of using composite materials in individual units of electrical machines show the possibility of minimizing material intensity, increasing energy density, and achieving better energy efficiency. One of possible ways to increase energy density and energy efficiency is to construct high-speed electrical machines that are able to generate maximum power with the minimum amount of active and structural materials. The characteristics of electrical machines are determined by losses, which in turn depend on the electromagnetic and thermal properties of the applied materials. In this respect, composite materials differ favorably from conventional materials. Thus, composite materials consist of plastic bases reinforced with fillers. By combining dissimilar materials, a new material is obtained, the properties of which may differ significantly from the properties of its individual components.

The results from a comparative analysis carried out for three designs of electrical machines with different contents of composite materials are presented. Full electromagnetic and thermal analyses of these designs carried out using the finite element methods are given, their specific characteristics are determined, and their efficiencies are estimated. It has been found that the weight of an electrical machine that consists completely of composite materials is by 73% smaller than that of an electrical machine made of conventional materials. The efficiency of an electrical machine made fully of composite materials is 92%, a conclusion that confirms good prospects of applying composite materials in electrical machine components. The thermal analysis results confirm that an electrical machine made completely of composite materials will have full operability.

Key words: finite element method, composite materials, high-speed electrical machine, fully composite electrical machine.

For citation: Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Sayakhov I.F., Ematin E.A. Electromagnetic and Thermal Analysis of Electrical Machines Made of Composite Materials. Bulletin of MPEI. 2020;2:52—61. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-52-61.

Введение

Развитие электрических, тепловых и механических свойств композитных материалов (КМ) открывает новые возможности для замены металлических узлов при создании электрических машин (ЭМ).

Низкая плотность большинства КМ по сравнению с традиционными материалами позволяет снизить их удельную массу, а также повысить технологичность за счет минимальной механической обработки и возможности создания деталей готовой формы. Исследования по применению КМ в отдельных узлах ЭМ показали возможности минимизации материалоемкости, повышения плотности энергии и энергоэффективности [1 — 4]. Один из способов увеличения плотности энергии и энергоэффективности — создание высокооборотных ЭМ, позволяющих вырабатывать максимальную мощность при минимальном объеме активных и конструктивных материалов [5 — 11].

Характеристики ЭМ определяются потерями, которые, в свою очередь, зависят от электромагнитных и тепловых свойств используемых материалов. С этой стороны КМ выгодно отличаются от традиционных материалов, поскольку КМ — это составные материалы, состоящие из пластичных основ, армированных наполнителями. Сочетания разнородных материалов приводят к созданию нового материала, свойства которого могут значительно отличаться от свойств отдельных его составляющих.

В настоящей работе на основе результатов расчета методами конечных элементов (МКЭ) проведено сравнение ЭМ из традиционных материалов, частично и полностью состоящих из КМ. Основным вкладом в область проектирования и создания ЭМ является демонстрация перспективности ЭМ полностью состоящей из КМ.

Композитные материалы в компонентах электрических машин

В работе [12] проанализированы типичные КМ, которые уже применяются или могут найти применение в компонентах ЭМ, определены их основные пре-

имущества и ограничения в использовании, а также приведены конкретные примеры их использования. В таблице 1 приведен список КМ, используемых при электромагнитном и тепловом анализе.

Применение КМ в качестве бандажей и валов позволяет снизить общую массу ротора за счет низкой плотности углеродного волокна и более высокого предела прочности. Кроме того, создание бандажей из КМ может быть экономически выгодным за счет использования технологии «мокрой намотки» [20]. Однако ввиду электропроводности углеродного волокна в бандаже ротора наводятся вихревые токи, приводящие к его нагреву, а низкая теплопроводность усложняет отвод тепла от ротора. КМ для корпусов ЭМ также имеют низкую плотность, но обладают еще более низкими прочностными и тепловыми свойствами. Для систем охлаждения трубки из КМ Araldite CW 5725 используются в качестве каналов жидкостного охлаждения и помещаются в свободное пространство в пазу между обмотками. В результате это приводит к высокой эффективности охлаждения обмоток статора. Подшипниковые опоры из КМ, помимо низкой плотности, обладают немагнитными и электроизоляционными свойствами.

На рисунке 1 изображены кривые удельных потерь при различных частотах для КМ марки Somaloy 700 ЗР и электротехнической стали 2411 с толщиной листа 0,27 мм.

Как следует из рис. 1, удельные потери в КМ марки Somaloy 700 ЗР более чем в 2 раза превышают удельные потери в стали 2411. Однако КМ для магнитопроводов статоров обладают более низкой плотностью, что позволяет снизить потери до соизмеримых значений с потерями в стали 2411.

У обмоток из УНТ широкие диапазоны электропроводности, теплопроводности и механических свойств, что объясняется зависимостью от метода их изготовления. Низкая электропроводность обмоток из УНТ компенсируется высокой теплопроводностью, что в целом улучшает отвод тепла. Кроме того, низкая плотность УНТ по сравнению с медью позволяет

Типы композитных материалов, применяемые в узлах электрических машин

Применение в ЭМ	Типы КМ
Бандаж и вал ротора	CFRP 231, CFRP 260 [13] — материалы на основе углеродного волокна, обладающие плотностью — 1520 кг/м ³ , пределом прочности — 2,4 ГПа, удельной электропроводностью — 10 ⁵ См/м, теплопроводностью — 2 Вт/(м·К) и удельной теплоемкостью — 600 Дж/(кг·К)
Корпус	ПЛП [14] имеет плотность — 1800 кг/м ³ , предел прочности — 125 МПа и теплопроводность — 20 Вт/(м·К)
Система охлаждения	Araldite CW 5725 [15] — материал теплопроводностью — 0,65 Вт/(м·К), с рабочей температурой — 144 °С, коэффициентом теплового расширения — 35·10 ⁻⁶ 1/К и плотностью — 1710 кг/м ³
Подшипники	На основе нитрида кремния [16], применяются в высокооборотных системах, обладают плотностью — 3200 кг/м ³ , коэффициентом теплового расширения — 3,2·10 ⁻⁶ К ⁻¹
Магнитопровод статора	Магнитомягкий КМ марки Somaloy 700 ЗР [17], обладает плотностью — 7570 кг/м ³ , удельной электропроводностью — 5000 См/м, относительной магнитной проницаемостью — 750 единиц, пределом прочности — 65 МПа и теплопроводностью — 21 Вт/(м·К)
Обмотка статора	УНТ [18] имеет плотность — 2000 кг/м ³ , удельную электропроводность — 6,7 МСм/м, теплопроводность — 1230 Вт/(м·К), удельную теплоемкость — 700 Дж/(кг·К) и предел прочности — 1,9 ГПа
Постоянные магниты	ППМ марки MQ 1-12 [19] плотностью — 6200 кг/м ³ , с максимальной температурой эксплуатации — до 150 °С, остаточной магнитной индукцией — 0,8 Тл и коэрцитивной силой — до 530 кА/м

Примечание: CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic) — углеродное волокно; ПЛП — полиэфирный листовой прессматериал; УНТ — углеродные нанотрубки, ППМ — полимерные постоянные магниты

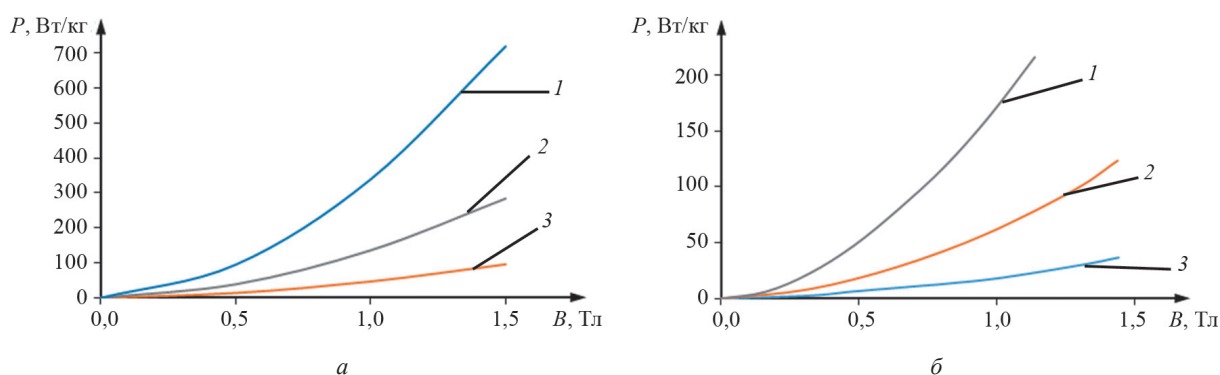


Рис. 1. Кривые удельных потерь при частотах 2000 (1), 1000 (2), 400 (3) Гц:
а — для Somaloy 700 ЗР; б — для стали 2411 толщиной листа 0,27 мм

увеличить удельную мощность создаваемых ЭМ, а малый диаметр проводников из УНТ снижает эффект от вихревых токов. Постоянные магниты из КМ также обладают низкой плотностью, но в то же время имеют низкие магнитные свойства. Для сравнения магнитных свойств на рис. 2 даны кривые размагничивания при 20 °С для ППМ марки MQ 1-12 и высококоэрцитивного постоянного магнита NdFeB.

Как следует из табл. 1 и проведенного анализа, КМ широко применяются в ЭМ. Более детальный разбор КМ в ЭМ представлен в [12]. В большинстве случаев в литературных источниках предложено применение КМ в отдельных компонентах ЭМ. Однако при этом отсутствуют исследования ЭМ, полностью состоящей из КМ.

Объект исследования

В настоящее время высокооборотные ЭМ работают в микротурбинных установках с диапазоном вы-

ходной мощности 20...500 кВт и частотой вращения 40000...100000 об/мин, а применение высококоэрцитивных постоянных магнитов в данных ЭМ определяет их высокие удельные характеристики.

Для оценки эффективности ЭМ при использовании КМ проведено сравнение трех конструкций высокооборотных ЭМ в генераторных режимах. Конструкция А представлена в виде ЭМ с традиционными материалами, в ЭМ конструкции В имеются компоненты из КМ, конструкция В содержит ЭМ, полностью состоящую из КМ. В таблице 2 предложены основные параметры исследуемых конструкций ЭМ.

Согласно табл. 1, внешний диаметр корпуса ЭМ конструкций Б и В по сравнению с конструкцией А уменьшен вследствие отказа от спиральной рубашки охлаждения и применения охлаждения с использованием трубок из КМ Araldite CW 5725 по пазам статора. Для сопоставления плотности магнитного потока в исследуемых

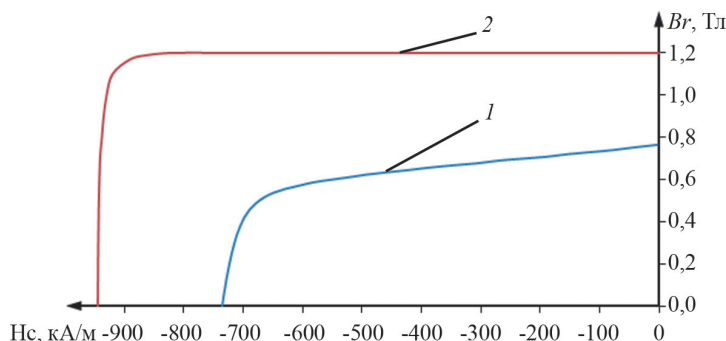


Рис. 2. Кривые размагничивания при 20 °С для ППМ марки MQ 1-12 (1) и высококоэрцитивного постоянного магнита NdFeB (2)

Таблица 2

Основные параметры исследуемых конструкций электрических машин

Параметр	Конструкции		
	А	Б	В
Выходная мощность, кВт	100	100	100
Выходное линейное напряжение, В	400	400	400
Частота вращения, об/мин	60000	60000	60000
Внешний диаметр корпуса, мм	177	147	147
Материал корпуса	алюминий	алюминий	алюминий
Внешний диаметр статора, мм	137	137	137
Внутренний диаметр статора, мм	70	70	70
Число пазов статора	24	24	24
Активная длина статора, мм	165	165	165
Материал магнитопровода статора	Сталь 2411	Somaloy 700 3P	Somaloy 700 3P
Число витков в фазе	8	9	17
Число слоев обмотки статора	1	1	1
Число жил в проводнике	20	70	85
Диаметр жилы, мм	0,8	0,4	0,27
Число параллельных ветвей	4	4	4
Материал проводников	ПНЭТ имид	УНТ	УНТ
Внешний диаметр ротора, мм	60	60	60
Активная длина ротора, мм	180	180	180
Материал магнитопровода ротора	30ХГСА	30ХГСА	CFRP 231
Число полюсов ротора	4	4	4
Высота постоянных магнитов, мм	9	8,5	21
Материал постоянных магнитов	SmCo	SmCo	MQ 1-12
Толщина бандажной оболочки ротора, мм	4	4	4
Материал бандажной оболочки ротора	Inconel 718	CFRP 231	CFRP 231
Охлаждение	жидкостное по спиральной рубашке охлаждения в алюминиевом корпусе	жидкостное по пазам статора	
Температура охлаждающей жидкости, °С	40	40	40
Расход хладагента, л/мин	16	16	16
Хладагент	вода	вода	вода

конструкциях неизменными оставались размеры пазов статора, габариты и выходная мощность.

В конструкции *A* магнитопровод статора выполнен из электротехнической стали марки 2411 с толщиной листа 0,27 мм. Обмотка выполнена из медно-никелевого провода с полиимидной изоляцией марки ПНЭТ имид с максимальной температурой эксплуатации до 220 °С. В качестве бандажа ротора использован Inconel 718. Постоянные магниты ротора — полукруглые из материала SmCo с максимальной температурой эксплуатации 250 °С.

Узлы конструкции *B* состоят из КМ, кроме постоянных магнитов ротора, выполненных из SmCo как в конструкции *A*. Материал магнитопровода статора — Somaloy 700 ЗР, данная марка порошкового магнитомягкого КМ выбрана ввиду высоких магнитных характеристик и высокой прочности. Обмотка сделана из УНТ. Из-за низкой электрической проводимости и значительно высокой теплопроводности проводов УНТ по сравнению с медными проводниками, целесообразным является создание жидкостного охлаждения по трубкам из КМ в пазах статора. К тому же для обеспечения одинаковой выходной мощности необходимо увеличение числа проводников в пазу, а также числа жил в проводнике. Бандаж ротора в данной конструкции — из CFRP 231.

Конструкция *B* идентична конструкции *B*, однако полностью состоит из КМ. Магнитная система ротора выполнена из ППМ марки MQ 1-12. С целью компенсации низких магнитных характеристик ППМ магнитная система ротора сделана в виде массива Халбаха. Это ведет к необходимости использования немагнитной спинки ротора, состоящей из CFRP 231, и увеличения высоты ППМ для создания необходимого магнитного потока. Для обеспечения одинаковой выходной мощности и требуемых электромагнитных нагрузок, так же как в конструкции *B*, следует увеличить число проводников в пазу и количество жил в проводнике.

Электромагнитный и тепловой анализ

Тепловой анализ электрических машин становится все более важным из-за растущего стремления к эффективности использования энергии и создания малогабаритных ЭМ. Это особенно справедливо для тех случаев, где критичны габариты, масса и энергоэффективность. При этом часто используемый подход — одновременный анализ как электромагнитных, так и тепловых аспектов на всех стадиях проектирования.

По представленным в табл. 1, 2 данным выполнены расчеты МКЭ описанных конструкций ЭМ. В таблице 3 даны полные результаты электромагнитных и тепловых расчетов, а также представлены удельные характеристики.

На рисунке 3 изображены картины распределения магнитного потока для каждой конструкции ЭМ, а на

рис. 4 — кривые магнитной индукции в воздушном зазоре для каждой конструкции ЭМ.

Из анализа рис. 3, 4 и табл. 3 можно видеть, что средняя индукция в воздушном зазоре конструкции *B* по сравнению с конструкцией *A* ниже на 8%, а в конструкции *B* — на 19%. Снижение величины индукции в воздушном зазоре конструкции *B* обусловлено низкими магнитными характеристиками ППМ. Это приводит к падению индукции в магнитопроводе статора и, согласно кривым удельных потерь, к снижению потерь в стали. Потери в стали в конструкции *B* по сравнению с конструкцией *A* выше на 64%, а в конструкции *B* — ниже на 30%.

Как следует из результатов табл. 3 применение обмотки из УНТ ведет к увеличению сопротивления фазы обмотки и повышению плотности тока на 14% в конструкции *B*, и на 110% в конструкции *B* по сравнению с конструкцией *A*. При этом коэффициент заполнения паза во всех трех конструкциях не превышает 56%. Потери в обмотке статора в конструкции *B* по сравнению с конструкцией *A* выше в 10,6 раза, а в конструкции *B* — в 36 раз.

На рисунке 5 показаны результаты распределения температурных полей в пазу для каждой конструкции ЭМ, на рис. 6 — итоги распределения температурных полей в полюсе для каждой конструкции ЭМ.

Как видно из рис. 5 и табл. 3, несмотря на большие потери в обмотках, средние температуры в пазах в конструкции *B* по сравнению с конструкцией *A* выше на 16%, а конструкции *B* — на 7%. Это обусловлено высокой теплопроводностью обмоток из УНТ и жидкостным охлаждением с применением трубок из КМ в пазах статора. Для оценки производительности каждой конструкции ЭМ необходима температура постоянных магнитов. С ростом температуры значительно меняются магнитные свойства, поэтому необходимо придерживаться эксплуатационных температур для каждой марки постоянных магнитов. Из результатов рис. 6 и табл. 3 следует, что температуры в постоянных магнитах не превышают эксплуатационных ограничений.

Из данных табл. 3 видно, что потери на вихревые токи в бандажной оболочке и постоянных магнитах ротора составляют 4...20% от общих потерь. При этом данные потери довольно сложно отвести от ротора, особенно в случае с бандажом из углеродного волокна, теплопроводность которого значительно меньше чем у традиционных металлических бандажных оболочек. Возможным решением данной проблемы является нанесение медного экрана поверх бандажной оболочки ротора [21]. В этом случае вихревые токи от пространственных гармоник статора замыкаются в медном экране, который за счет высокой теплопроводности отводит тепло, тем самым уменьшая прямое нагревание постоянных магнитов.

Коэффициенты полезного действия исследуемых конструкций имеют сопоставимые значения, так КПД конструкции *B* ниже на 2%, а конструкции *B* — на 4,5%

Таблица 3

Полные результаты электромагнитных и тепловых расчетов

Параметр	Конструкции		
	А	Б	В
Средняя индукция в спинке статора, Тл	1,2	1,1	0,6
Средняя индукция в зубце статора, Тл	1,25	1,12	0,64
Индукция в воздушном зазоре, Тл	0,62	0,57	0,5
Активное сопротивление фазы статора при 20 °С, Ом	0,0022	0,0198	0,068
Индуктивное сопротивление фазы статора по оси <i>d</i> , Ом	0,13	0,17	0,62
Индуктивное сопротивление фазы статора по оси <i>q</i> , Ом	0,18	0,25	0,9
Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора, Ом	0,27	0,34	1,21
Действующее значение силы тока в фазе статора, А	146	147	147
Плотность тока, А/мм ²	5	5,7	10,5
Коэффициент заполнения паза, %	55	54	56
Линейная токовая нагрузка, А/м	33446	38880	97671
Потери в обмотке статора, Вт	140,7	1492	5100
Потери в стали, Вт	2007	3300	1400
Потери на вихревые токи в бандажной оболочке ротора и постоянных магнитах, Вт	763	236	579
Аэродинамические потери, Вт	870	870	870
Полные потери, Вт	3780,7	5898	7949
КПД, %	96,22	94,1	92,05
Масса магнитопровода статора, кг	7,05	7	7
Масса обмотки статора, кг	5,3	1,16	1,2
Масса ротора (вал, подшипники, спинка ротора, постоянные магниты, бандаж ротора), кг	5,68	4,9	3,6
Масса корпуса, кг	5,3	1,68	1,68
Полная масса, кг	23,33	14,74	13,48
Удельная масса, кг/кВт	0,23	0,147	0,135
Средняя температура обмотки статора, °С	123,5	143,2	132,2
Температура постоянных магнитов, °С	135	132,4	134,7

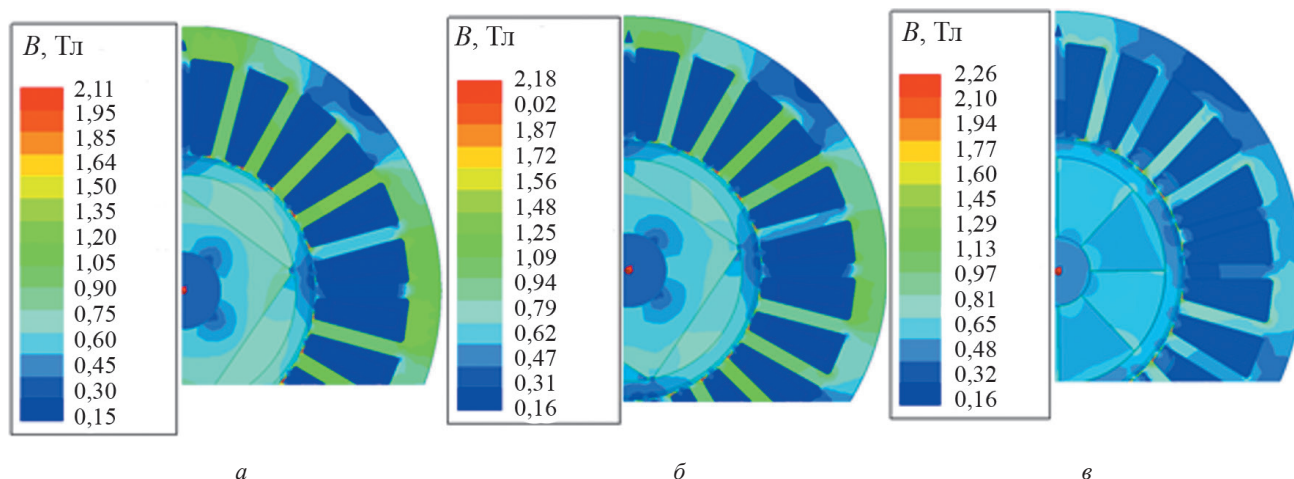


Рис. 3. Картины распределения магнитного потока для конструкций А (а), Б (б) и В (в)

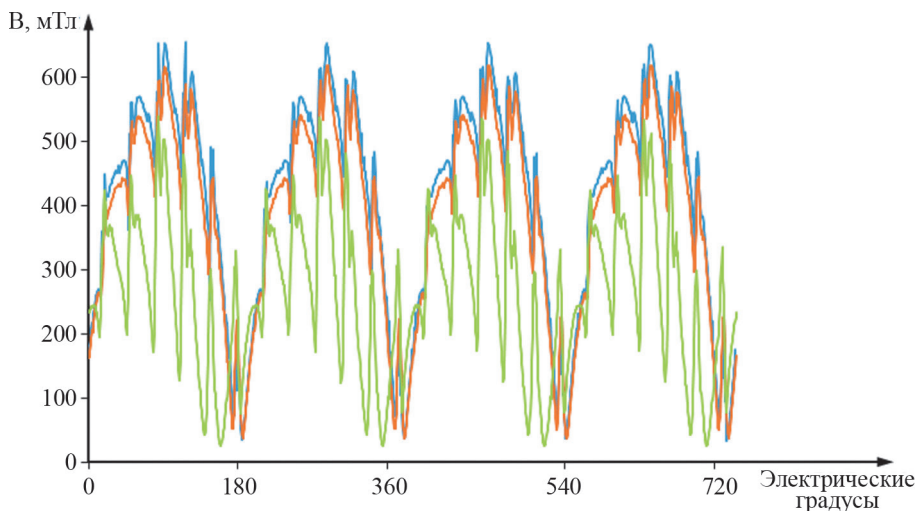


Рис. 4. Кривые магнитной индукции в воздушном зазоре для конструкций А (—), В (—) и В (—)

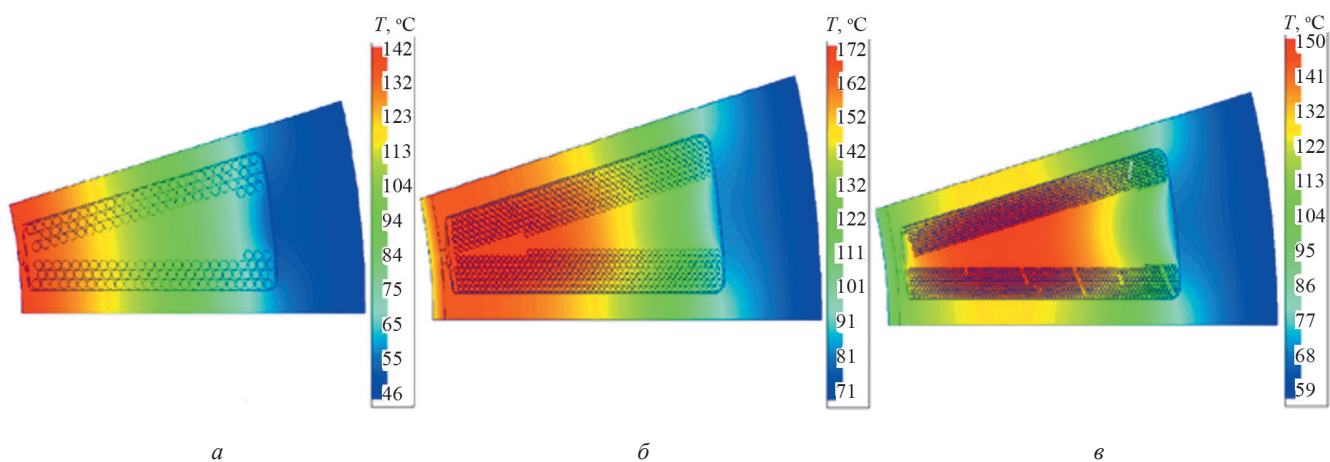


Рис. 5. Распределение температурных полей в пазу для конструкций А (а), В (б) и В (в)

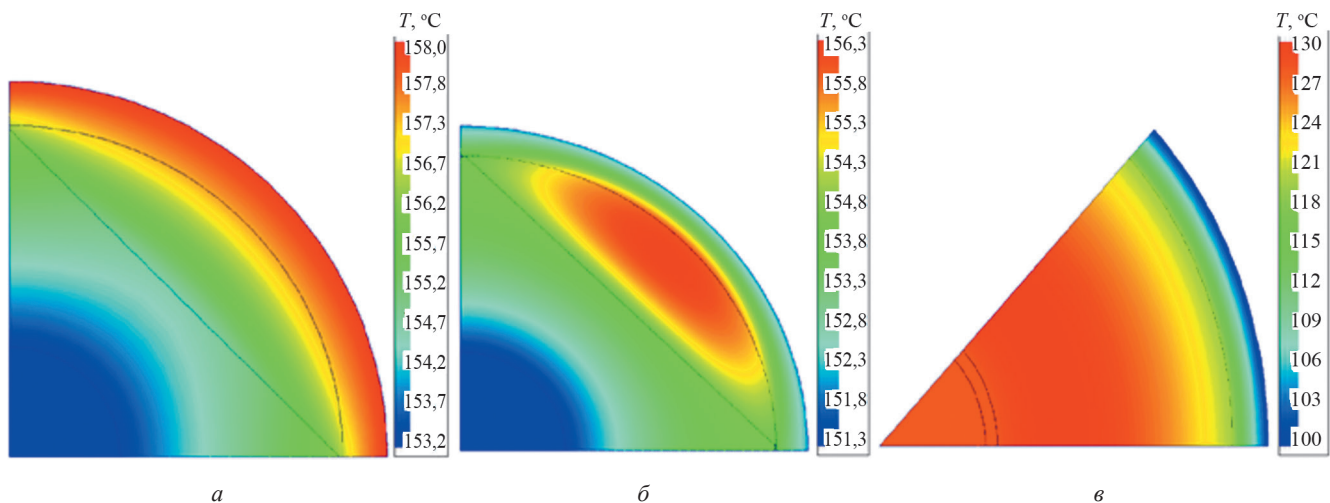


Рис. 6. Распределение температурных полей в полюсе для конструкций А (а), В (б) и В (в)

в сравнении с конструкцией *A*. Полная масса конструкции *B* ниже на 58%, конструкции *B* — 73% в сравнении с конструкцией *A*. Снижение полной массы ЭМ в большем случае определяется снижением массы обмотки статора за счет низкой плотности обмоток из УНТ, а также благодаря отказу от внешней рубашки охлаждения в пользу охлаждения по пазам статора.

Следует отметить, что представленные конструкции ЭМ выполнены в одинаковых габаритах, с одинаковым расходом охлаждающей жидкости. Однако конструкции *B* и *B* обладают предельными характеристиками при данных габаритах, так как ограничиваются магнитными, электрическими и тепловыми характеристиками КМ.

Заключение

На основе результатов расчета МКЭ показано, что при использовании КМ в ЭМ и создании ЭМ, пол-

ностью состоящей из КМ, достигается снижение полной массы ЭМ. Из результатов расчетов видно, что применение КМ в качестве обмоток статора позволяет более эффективно отводить тепловые потери. При этом ЭМ, состоящие из КМ, обладают меньшим КПД, чем ЭМ с традиционными материалами. Однако КПД ЭМ, полностью состоящей из КМ, достигает 92%, что означает перспективность применения во многих отраслях.

Использование КМ накладывает ограничения на характеристики ЭМ. Помимо снижения КПД, ведет к увеличению объема используемых КМ, в частности, обмоток и постоянных магнитов для обеспечения требуемых электромагнитных нагрузок. Низкая теплопроводность бандажа ротора из углеродного волокна требует специальных мер по отводу тепла от ротора. Исходя из вышесказанного, применение КМ в узлах ЭМ перспективно, а создание полностью композитных ЭМ — привлекательная альтернатива в будущем.

Литература

1. **Hong D.K., Joo D.S., Woo B.C., Jeong Y.H., Koo D.H.** Investigations on a Super High Speed Motor-Generator for Microturbine Application Using Amorphous Cores // *IEEE Trans. Magn.* 2013. V. 49. Pp. 4072—4075.
2. **Liu Y., Ou J., Schiefer M., Breining P., Grilli F., Doppelbauer M.** Application of an Amorphous Core to an Ultra-high-speed Sleeve-free Interior Permanent-magnet Rotor // *IEEE Trans. Industrial Electronics.* 2018. V. 65. No. 11. Pp. 8498—8509.
3. **Pfister P.P. D., Perriard Y.** Very-high-speed Slotless Permanent-magnet Motors: Analytical Modeling, Optimization, Design, and Torque Measurement Methods // *IEEE Trans. Industrial Electronics.* 2010. V. 57. No. 1. Pp. 296—303.
4. **Gerada D., Mebarki A., Brown N.L., Gerada C., Cavagnino A., Boglietti A.** High-speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments // *IEEE Trans. Industrial Electronics.* 2014. V. 61. No. 6. Pp. 2946—2959.
5. **Liu C., Lee D.G.** Design of the Hybrid Composite Journal Bearing Assembled by Interference Fit // *Composite Structures.* 2006. V. 75. Pp. 222—230.
6. **Guo Y., Zhu J., Watterson P.A., Wu W.** Comparative Study of 3-d Flux Electrical Machines with Soft Magnetic Composite Cores // *IEEE Trans. Industry Appl.* 2003. V. 39. No. 6. Pp. 1696—1703.
7. **Xu Z. e. a.** A Semi-flooded Cooling for a High Speed Machine: Concept, Design and Practice of an Oil Sleeve // *Proc. IECON 2017 — 43rd Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Soc.* 2017. Pp. 8557—8562.
8. **Tuysuz A., Meyer F., Steichen M., Zwysig C., Kolar J.W.** Advanced Cooling Methods for High-speed Electrical Machines // *IEEE Trans. Industry Appl.* 2017. V. 53. No. 3. Pp. 2077—2087.

References

1. **Hong D.K., Joo D.S., Woo B.C., Jeong Y.H., Koo D.H.** Investigations on a Super High Speed Motor-Generator for Microturbine Application Using Amorphous Cores. *IEEE Trans. Magn.* 2013;49:4072—4075.
2. **Liu Y., Ou J., Schiefer M., Breining P., Grilli F., Doppelbauer M.** Application of an Amorphous Core to an Ultra-high-speed Sleeve-free Interior Permanent-magnet Rotor. *IEEE Trans. Industrial Electronics.* 2018; 65;11:8498—8509.
3. **Pfister P.P. D., Perriard Y.** Very-high-speed Slotless Permanent-magnet Motors: Analytical Modeling, Optimization, Design, and Torque Measurement Methods. *IEEE Trans. Industrial Electronics.* 2010;57;1:296—303.
4. **Gerada D., Mebarki A., Brown N.L., Gerada C., Cavagnino A., Boglietti A.** High-speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments. *IEEE Trans. Industrial Electronics.* 2014;61;6: 2946—2959.
5. **Liu C., Lee D.G.** Design of the Hybrid Composite Journal Bearing Assembled by Interference Fit. *Composite Structures.* 2006;75:222—230.
6. **Guo Y., Zhu J., Watterson P.A., Wu W.** Comparative Study of 3-d Flux Electrical Machines with Soft Magnetic Composite Cores. *IEEE Trans. Industry Appl.* 2003;39;6:1696—1703.
7. **Xu Z. e. a.** A Semi-flooded Cooling for a High Speed Machine: Concept, Design and Practice of an Oil Sleeve. *Proc. IECON 2017 — 43rd Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Soc.* 2017:8557—8562.
8. **Tuysuz A., Meyer F., Steichen M., Zwysig C., Kolar J.W.** Advanced Cooling Methods for High-speed Electrical Machines. *IEEE Trans. Industry Appl.* 2017; 53;3:2077—2087.

9. **Pyrhönen J., Montonen J., Lindh P., Vauterin J., Otto M.** Replacing Copper with New Carbon Nanomaterials in Electrical Machine Windings // Intern. Rev. Electrical Eng. 2015. V. 10. No. 1. Pp. 12—21.

10. **Domingo-Roca R., Jackson J.C., Windmill J.F.C.** 3D-printing Polymer-based Permanent magnets // Mater. Des. 2018. V. 153. Pp. 120—128.

11. **Kurth K. H., Drummer D.** Improvement of the Magnetic Properties of Injection Molded Polymer Bonded Magnets // Proc. 3rd Intern. Electric Drives Production Conf. 2013. Pp. 1—5.

12. **Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф.** К вопросу применения композитных материалов в электрических машинах (обзор) // Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 9. С. 17—32.

13. **Funck R.** Composite Materials in High Efficient Sleeve Applications of Electric Machines. Circomp GmbH. [Электрон. ресурс] <http://www.circomp.de/downloads/circomp-paper-sleeve-applications.pdf> (дата обращения 04.12.2018).

14. **Пресс-материал АГ-4В** [Электрон. ресурс] <http://www.stekloplastic.com/produksiya/press-material-ag-4v> (дата обращения 04.12.2018).

15. **Schiefer M., Doppelbauer M.** Indirect Slot Cooling for High Power Density Machines with Concentrated Winding // IEEE Intern. Electric Machines and Drives Conf. 2015. Pp. 1820—1825.

16. **Tanimoto K., Kajihara K., Yanai K.** Hybrid Ceramic Ball Bearings for Turbochargers. Presented at SAE 2000 World Congress [Электрон. ресурс] <https://doi.org/10.4271/2000-01-1339> (дата обращения 04.12.2018).

17. **Krings A., Boglietti A., Cavagnino A., Sprague S.** Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines // IEEE Trans. Industrial Electronics. 2017. V. 64. No. 3. Pp. 2405—2414.

18. **Lekawa-Raus A., Patmore J., Kurzepa L., Bulmer J., Koziol K.** Electrical Properties of Carbon Nanotube Based Fibers and Their Future Use in Electrical Wiring // Advanced Functional Materials. 2014. V. 24. No. 24. Pp. 3661—3682.

19. **Magnets.** Magnequench [Электрон. ресурс] <https://mqitechnology.com/products/magnets> (дата обращения 04.12.2018).

20. **Kolpakhchyan P.P. G., Lobov B.N., Mikitinskiy A.P., Rusakevich I.V.** The Production Possibility of Permanent Magnet High Speed Electric Generator Rotors // Proc. 10th Intern. Conf. Electrical Power Drive Syst. 2018. Pp. 46—50.

21. **Andonian A.T., Huynh C.** Rotor Retention and Loss-reduction for High-speed Permanent Magnet Motor Generators. Presented at Motor and Drive Systems Conference [Электрон. ресурс] <https://motoranddriveconference.com/2017/08/rotor-retention-and-loss-reduction-for-high-speed-permanent-magnet-motor-generators/> (дата обращения 04.12.2018).

9. **Pyrhönen J., Montonen J., Lindh P., Vauterin J., Otto M.** Replacing Copper with New Carbon Nanomaterials in Electrical Machine Windings. Intern. Rev. Electrical Eng. 2015;10;1:12—21.

10. **Domingo-Roca R., Jackson J.C., Windmill J.F.C.** 3D-printing Polymer-based Permanent magnets. Mater. Des. 2018;153:120—128.

11. **Kurth K. H., Drummer D.** Improvement of the Magnetic Properties of Injection Molded Polymer Bonded Magnets. Proc. 3rd Intern. Electric Drives Production Conf. 2013:1—5.

12. **Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Sayakhov I.F.** К вопросу применения композитных материалов в электрических машинах (Обзор). Novoe v Rossiyskoy Elektroenergetike. 2018;9:17—32. (in Russian).

13. **Funck R.** Composite Materials in High Efficient Sleeve Applications of Electric Machines. Circomp GmbH. [Elektron. Resurs] <http://www.circomp.de/downloads/circomp-paper-sleeve-applications.pdf> (Data Obrashcheniya 04.12.2018).

14. **Press-material AG-4V** [Elektron. Resurs] <http://www.stekloplastic.com/produksiya/press-material-ag-4v> (Data Obrashcheniya 04.12.2018). (in Russian).

15. **Schiefer M., Doppelbauer M.** Indirect Slot Cooling for High Power Density Machines with Concentrated Winding. IEEE Intern. Electric Machines and Drives Conf. 2015:1820—1825.

16. **Tanimoto K., Kajihara K., Yanai K.** Hybrid Ceramic Ball Bearings for Turbochargers. Presented at SAE 2000 World Congress [Elektron. Resurs] <https://doi.org/10.4271/2000-01-1339> (Data Obrashcheniya 04.12.2018).

17. **Krings A., Boglietti A., Cavagnino A., Sprague S.** Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines. IEEE Trans. Industrial Electronics. 2017;64;3:2405—2414.

18. **Lekawa-Raus A., Patmore J., Kurzepa L., Bulmer J., Koziol K.** Electrical Properties of Carbon Nanotube Based Fibers and Their Future Use in Electrical Wiring. Advanced Functional Materials. 2014;24;24:3661—3682.

19. **Magnets.** Magnequench [Elektron. Resurs] <https://mqitechnology.com/products/magnets> (Data Obrashcheniya 04.12.2018).

20. **Kolpakhchyan P.P. G., Lobov B.N., Mikitinskiy A.P., Rusakevich I.V.** The Production Possibility of Permanent Magnet High Speed Electric Generator Rotors. Proc. 10th Intern. Conf. Electrical Power Drive Syst. 2018:46—50.

21. **Andonian A.T., Huynh C.** Rotor Retention and Loss-reduction for High-speed Permanent Magnet Motor Generators. Presented at Motor and Drive Systems Conference [Elektron. Resurs] <https://motoranddriveconference.com/2017/08/rotor-retention-and-loss-reduction-for-high-speed-permanent-magnet-motor-generators/> (Data Obrashcheniya 04.12.2018).

Сведения об авторах:

Исмагилов Флюр Рашитович — доктор технических наук, заведующий кафедрой электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета

Вавилов Вячеслав Евгеньевич — кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: s2_88@mail.ru

Саяхов Ильдус Финатович — аспирант кафедры электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: isayakhov92@mail.ru

Ематин Евгений Александрович — студент кафедры электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: vjeka@mail.ru

Information about authors:

Ismagilov Flyur R. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Electromechanics Dept., Ufa State Aviation Technical University

Vavilov Vyacheslav E. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electromechanics Dept., Ufa State Aviation Technical University, e-mail: s2_88@mail.ru

Sayakhov Ildus F. — Ph.D.-student of Electromechanics Dept., Ufa State Aviation Technical University, e-mail: isayakhov92@mail.ru

Ematin Evgeniy A. — Student of Electromechanics Dept., Ufa State Aviation Technical University, e-mail: vjeka@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 03.07.2019

The article received to the editor: 03.07.2019