

АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ И НАГРЕВА УЧАСТКОВ РОТОРА ВЫСОКОБОРОТНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

А. А. Кирякин, Е. В. Щетинин

На основании численного расчета электромагнитных потерь получена картина нагрева конструктивных частей ротора высокооборотной синхронной машины. Исследовано влияние магнитных потерь на нагрев в бандаже ротора и постоянных магнитах. Рассмотрены участки локального нагрева постоянных магнитов при принудительном и косвенном охлаждении машины. Исследовано влияние характеристик высокопрочных материалов, используемых при бандажировании ротора высокооборотных машин, на величину магнитных потерь и нагрев постоянных магнитов.

***Ключевые слова:** высокоскоростные машины, магнитные потери, температура нагрева магнитов, постоянные магниты, синхронные машины с постоянными магнитами.*

Введение

В синхронных машинах (СМ) с постоянными магнитами в роторе образуются магнитные потери на индуцированные токи (ИТ) в бандаже, постоянных магнитах (ПМ), магнитопроводе ротора, а также на гистерезис и вихревые токи в стали статора. При увеличении скорости вращения потери в роторе могут увеличиваться по нелинейному закону. Соответственно, исследование магнитных потерь в высокоскоростных машинах и анализ нагрева отдельных частей СМ позволит улучшить энергоэффективные показатели на этапах проектирования, а также повысить надежность работы таких машин.

Наиболее уязвимыми материалами к нагреву в роторах высокоскоростных машин являются ПМ ввиду их размагничивания при нагреве. Так как ПМ обладают достаточно большой удельной электрической проводимостью, потери на вихревые токи в них могут составлять до 30% от общих потерь в роторе [1].

Магнитные потери в магнитах образуются на поверхности в локальных участках [2], что негативно влияет на нагрев ПМ и приводит к снижению магнитных свойств ПМ. Уменьшение индукции электромагнитного поля вызывает образование дополнительных гармоник, влияющих на показатели вибрации и качество электроэнергии сети. При использовании в конструкции ротора электропроводящих бандажей в них наводятся ИТ, которые оказывают влияние на нагрев ПМ. Отметим, что в некоторых конструкциях СМ проводящий бандаж используется для уменьшения высших гармонических результирующего поля, которые создают потери непосредственно в ПМ [3]. Также относительно низкая теплопроводность различных высокопрочных материалов при бандажировании ротора может ухудшать охлаждение ПМ.

Поскольку экспериментально проверить, сколько потерь и какой нагрев вносят потери на ИТ в магнитах и бандаже по отдельности от статора и обмоток, является весьма трудной задачей, принятым решением

будет разделение магнитных потерь на основании экспериментальных данных опыта холостого хода и короткого замыкания.

Известен экспериментальный высокооборотный генератор МТГ-0,3-12000 (МТГ-12000, МТГ), при исследовании потерь которого были получены характеристики холостого хода, а также экспериментально определены потери в обмотках. На основании этих экспериментальных данных можно произвести поисковый расчет по разделению потерь по отдельности на магнитные потери в роторе и магнитные потери в стали статора и обмотках, а в дальнейшем – преобразование электромагнитных потерь в тепловые и расчет теплового поля для определения температуры нагрева конструктивных частей ротора.

Все вышеперечисленное требует тщательного исследования при проектировании высокоскоростных СМ с ПМ с целью улучшения энергоэффективных, массогабаритных и экономических показателей.

Основные материалы для бандажирования высокоскоростных роторов

В основе проектирования роторов с постоянными магнитами на повышенных частотах вращения анализируется способ установки ПМ, а также выбор конструктивных материалов ротора. Роторы современных машин, работающих на повышенных частотах вращения, изготавливают с применением немагнитных высокопрочных бандажей, которые фиксируют магниты. В зависимости от диаметра ротора, на который устанавливаются магниты, большое внимание уделяется толщине бандаж, исходя из характеристик материала. При выборе материала следует учитывать его прочность при растяжении, электрическую проводимость и коэффициент теплопроводности. Основные материалы бандажных колец и их физико-химические характеристики, используемые для удержания ПМ, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики материалов бандажных колец

Материал бандажа	Плотность, кг/м ³	Прочность при растяжении, ГПа	Удельная электрическая проводимость, кСм/м	Коэффициент теплопроводности, при 100°С, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, при 100°С, Дж/(кг·К)	Коэффициент теплового расширения при 100°С, 10 ⁻⁶ ·1/К
Титан ВТ22	4650	1,28	654,5	9,21	565	8,2
Углеродное высокопрочное волокно	1760	1,76	1,6	2	600	0,2
Стекловолокно	2500	2,5	6,2	0,25	1265	0,12
Мартенситная сталь	7800	2,5	877	25	481	10,5
Бронза	8300	0,9	12041	84	419	17

Выбор материала бандажа необходимо проводить, взвешивая все вышеперечисленные характеристики. Плотность материала влияет на момент инерции ротора, а также на массогабаритные показатели машины, что необходимо учитывать при создании высокоскоростных машин и уменьшении вибрации [4]. Прочность материала, в свою очередь, определяет толщину бандажа и эквивалентный немагнитный зазор [5], а повышенная электрическая проводимость приводит к дополнительным потерям на вихревые токи в бандаже и его нагреву. Коэффициент теплопроводности влияет на тепловой поток между ПМ и охлаждающей средой [6]. Величину коэффициента теплового расширения также необходимо учитывать при работе на повышенных температурах, чтобы не допустить задевание ротора и статора [7].

Выбор воздушного зазора и толщины магнитного бандажа необходимо выполнять с учетом уменьшения влияния гармонических составляющих магнитного поля на ПМ и наведения в них ИТ. В данной статье проводится исследование и выбор материала бандажирования для уменьшения магнитных потерь и нагрева ПМ.

Постановка задачи взаимосвязи электромагнитного поля и теплового поля

Для взаимосвязи электромагнитных и тепловых полей одним из наиболее точных численных методов решения задачи является метод конечных элементов (МКЭ). При решении математической модели применяется несколько систем уравнений: системы уравнений, описывающих электромагнитные процессы в СМ с ПМ, система уравнений Максвелла

и системы уравнений Фурье, описывающей процессы теплообмена.

Для расчета стационарного магнитного поля в областях с токами на основании уравнения Пуассона запишем:

$$\nabla^2 \bar{A} = -\mu \bar{J},$$

где \bar{A} – векторный магнитный потенциал, Тл·м; μ – магнитная проницаемость; \bar{J} – плотность тока, А/м².

Для областей поперечного сечения машины без тока:

$$\nabla^2 \bar{A} = 0.$$

Уравнение Лапласа, для стационарного теплового поля:

$$\nabla^2 T = 0,$$

где T – температура, °С.

Взаимосвязь областей машины с токами записывается как:

$$\frac{J_z}{k\gamma\mu} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где k – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; γ – удельная проводимость, См/м; T – температура, °С.

Для решения уравнения (1) целесообразно использовать граничные условия третьего рода и четвертого рода для температурных полей и метод разделения переменных.

Тогда граничные условия третьего рода:

$$\begin{cases} k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T_0 - T); \\ k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T_0 - T); \\ k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T_0 - T), \end{cases}$$

где h – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К.

Граничные условия четвертого рода для теплопередачи между твердыми телами:

$$\begin{cases} k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}; \\ k_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}; \\ k_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, \end{cases}$$

где k_1 и k_2 – коэффициент теплопроводности, Вт/мК; T_1 и T_2 – температура, К.

Коэффициент теплоотдачи определяется из выражения для критерия Нуссельта:

$$h = \frac{Nu k}{d_3},$$

где Nu – критерий Нуссельта; d_3 – эквивалентный диаметр, м.

Расчет охлаждения задавался на границе поверхности статора. Для косвенного охлаждения использовались граничные условия для естественной конвекции поверхности статора. Для границ ротора задавалась скорость перемещения поверхности ротора.

При решении задачи были приняты следующие допущения и граничные условия:

1. Магнитная индукция в ПМ при изменении температуры $B_r(T) = \text{const}$.

2. Проводимость бандажа, ПМ, обмотки и стали при изменении температуры $\gamma(T) = \text{const}$.

3. Температурная деформация и расширение материалов не учитываются.

4. Температура в начальный момент времени во всех направлениях:

$$T_{t=0}(x, y) = 23^\circ\text{C}.$$

5. Коэффициент излучения для стали $\varepsilon = 0,77$, для ПМ $\varepsilon = 0,77$, для остальных материалов принят $\varepsilon = 0,8$.

6. Решение задачи теплопроводности ограничивается внешним слоем воздушного пространства, окружающим МТГ, с применением масштабирования координат и учета рассеивания тепла в окружающую среду.

Моделирование электромагнитных и тепловых полей в экспериментальной установке

Результаты проведенного анализа потерь на ИТ в роторе быстроходного синхронного генератора с ПМ МТГ-12000 показывают, что расположение локальных областей возникновения ИТ в бандаже и магнитных потерь в ПМ зависит от скорости вращения, нагрузки и магнитных характеристик материалов [8]. Для более точного определения потерь в роторе были проведены поисковые расчеты разделения магнитных потерь в стали статора и в роторе. Поскольку потери в роторе вызваны только потерями на ИТ и являются практически неизменными пропорционально общим магнитным потерям, были проведены расчеты по выявлению коэффициентов, связанных с магнитными потерями в стали статора. Для определения потерь численно была использована двухмерная модель генератора. На основании анализа материалов, поискового расчета магнитных потерь, а также потерь на гистерезис и вихревых токов в стали статора марки 2212, сравнения потерь с экспериментальными данными, подбора коэффициентов для формулы Штейнмеца, определяющего потери на гистерезис в модели, получено соотношение потерь в стали и роторе.

Магнитные потери при холостом ходе экспериментально составляют 7632 Вт. При поисковом расчете МКЭ в COMSOL Multphysics: в стали статора – 6711 Вт, в роторе – 921 Вт, при этом в ПМ – 211 Вт, в бандаже – 710 Вт.

Распределение магнитных потерь в поперечном сечении МТГ-12000 при моделировании в COMSOL Multphysics в двигательном режиме показано на рис. 1, а. Основные потери в роторе располагаются на поверхности полюсов ротора (рис. 1, б) и на поверхности ПМ (рис. 1, в). Суммарные рассчитанные потери в ПМ, выполненных из Nd-Fe-B (неодим-железо-бор) марки НмБ 250/240, при полной активной нагрузке машины и фазном токе 169,6 А составляют 220,4 Вт, в бандаже (титан ВТ22) – 910 Вт, в стали статора – 6297 Вт.

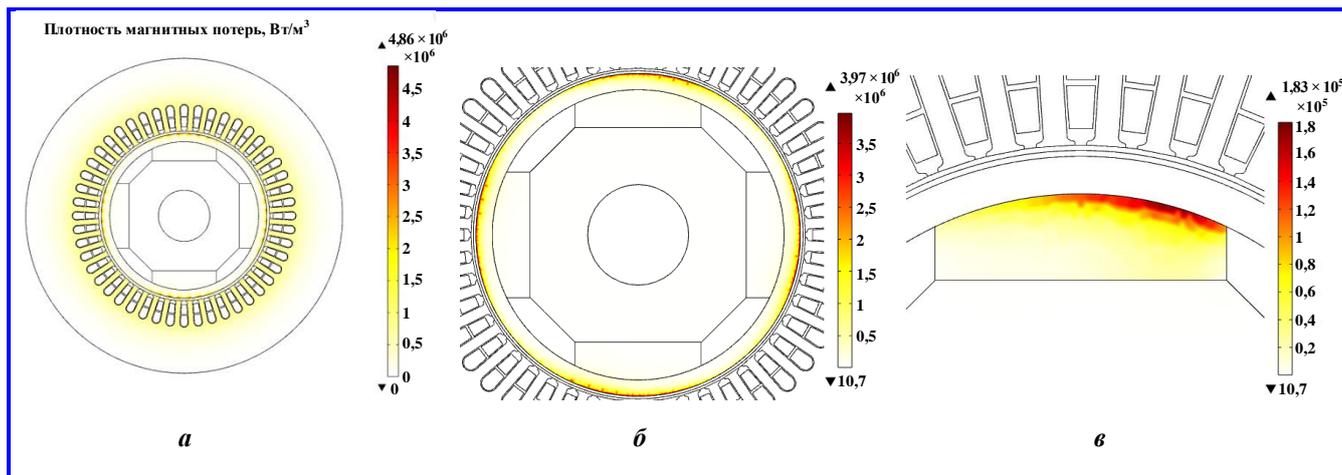


Рис. 1. Распределение потерь при активной нагрузке в двигательном режиме (угол нагрузки 33°):
 а – в поперечном сечении МТГ; б – потери в роторе; в – на поверхности постоянных магнитов

В результате образования магнитных потерь в роторах высокоскоростных синхронных машин с магнитоэлектрическим возбуждением существенно возрастает нагрев всех конструктивных частей ротора. Соответственно, при повышенных температурах происходит уменьшение магнитной индукции ПМ, что в свою очередь может приводить к потерям мощности машины. Также могут существовать условия, при которых нагрев ПМ происходит в определенных локальных областях, это может быть вся поверхность ПМ или в некоторых случаях распределение потерь происходит несимметрично на отдельных участках [9]. Такой нагрев в зависимости от характеристик магнитного материала может приводить к размагничиванию данной области или к необратимым потерям магнитных свойств ПМ, особенно при переходных процессах и во время работы машины совместно с частотным преобразователем. Соответственно, возникает неравномерность магнитного поля ПМ, которая влечет к дополнительным потерям, вибрации и аварийной ситуации. Поэтому важным аспектом проектирования таких машин является конструктивное расположение магнитов, электрические и магнитные свойства бандажа и стали ротора, система охлаждения, а также другие способы снижения потерь, такие как шихтовка магнитов, бандажирование из полимерных прочных диэлектрических материалов и др.

Так как измерение нагрева области ротора является сложной задачей ввиду конструктивных особенностей высокооборотной машины, для исследования нагрева от магнитных потерь в роторе было проведено моделирование тепловых полей МТГ-0,3-12000 в COMSOL Multphysics (рис. 2) в трехмерной постановке задачи.

Для расчета теплового поля посредством привязки результатов расчета электромагнитной

задачи и расчета потерь двухмерной модели с помощью преобразователя временной области в частотную *Time to frequency losses* («время потери частоты»), и трехмерной модели, куда на основании электромагнитных расчетов передавались данные потерь в сечении генератора. Временно-частотная задача использует преобразование Фурье из временной области в частотную, а далее применение эмпирических формул для магнитных потерь и решение временного интеграла для резистивных потерь от вихревых токов. При этом влияние электромагнитного поля учитывалось без осевой координаты z , то есть распределение потерь происходит в осевом направлении с помощью встроенной привязки мультифизических моделей *General Extrusion* («общая экструзия») и *Linear Extrusion* («линейная экструзия»).

Расчет тепловой модели машины проводился за период работы 10 часов, с шагом времени 0,1 часа, решая систему уравнений в мультифизическом интерфейсе *Heat transfer in solids* («теплопередача в твердых телах») с учетом привязки данных потерь из двухмерной модели. При моделировании охлаждения задавалось через свободную конвекцию с помощью коэффициента теплоотдачи. Электрические потери в обмотках преобразовывались в тепловые с помощью физической привязки джоулевого нагрева обмоток от заданного значения тока и *Electromagnetic heating* («электромагнитный нагрев»), использующий привязку с *Heat transfer in solids*. Расчет температуры нагрева МТГ-12000 от индуцированных токов в ПМ и бандаже, потерь на гистерезис в стали и джоулевых потерь в обмотках в трехмерной модели производился из уравнений:

$$\begin{cases} d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p u \nabla T + \nabla q = d_z Q + q_0 + d_z Q_{ted}; \\ q = -d_z k \nabla T, \end{cases}$$

где Q – количество теплоты, выделяемое источником нагрева, Вт/м³; q – плотность теплового потока, Вт/м²; T – температура, °С; q_0 – внутренний тепловой поток, Вт/м²; k – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; ρ – плотность материала, кг/м³; C_p – удельная теплоемкость при неизменном давлении, Дж/кг·К; d_z – толщина домена в неплоском направлении (по оси z), м; Q_{ted} – термоупругое демпфирование, Вт/м³;

$$Q = \frac{1}{T} \int_{T_{end}-T}^{T_{end}} J E dt,$$

где T – период, с; J – вектор плотности тока, А/м²; E – вектор напряженности электрического поля, В/м.

Максимальная температура при расчете тепловых полей от электромагнитных потерь в МТГ-12000 на полной активной нагрузке составила: в статоре 100,2°С; в обмотке 103°С; в бандже 183°С; в ПМ 181°С. Минимальная температура ПМ 174°С. Как видно при исследовании картина потерь на вихревые токи в роторе сопоставима с картиной тепловых полей, нагрев превалирует с одной стороны полюса ротора (рис. 3).

Неравномерность нагрева магнита и наведение в нем вихревых токов может вызвать размагничивание локальной области магнита. Основной вклад в нагрев вносит высокопроводный бандаж ротора, в котором потери на ИТ превышают в 4 раза. В качестве анализа необходимости учета потерь на ИТ в ПМ был проведен расчет температуры нагрева магнита, без учета его потерь на ИТ. Результат представлен на рис. 3.

Максимальная установившаяся температура нагрева магнита без учета ИТ в ПМ составила 165°С, что на 9°С ниже с учетом потерь. Разница в температуре нагрева банджа с учетом потерь в ПМ и без учета – 3,8°С.

Исследование магнитных потерь и нагрева при различных материалах банджа

Для выработки рекомендаций по выполнению бандажирования ротора был проведен поисковый расчет магнитных потерь в роторе двигателя МТГ-12000, для определения оптимальных характеристик материалов и их влияния на потери от индук-

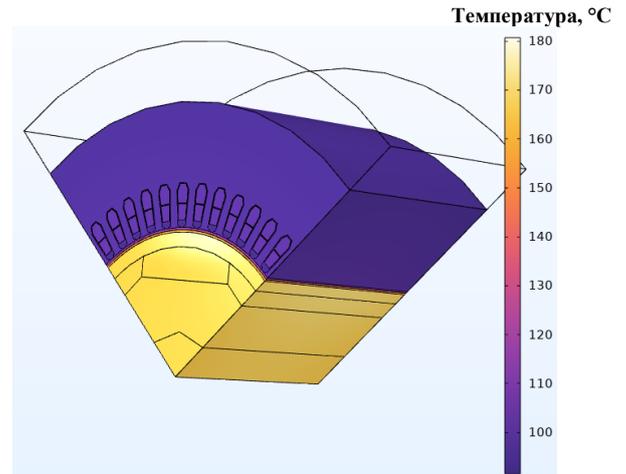
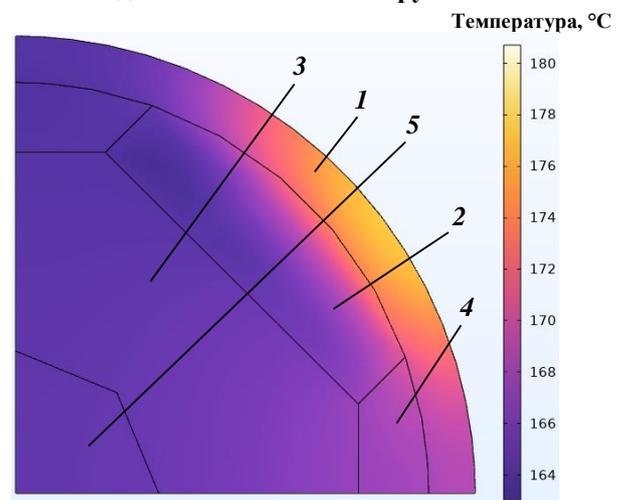
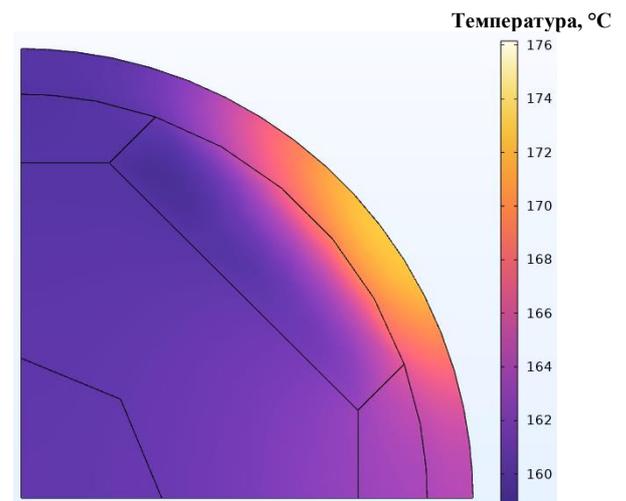


Рис. 2. Распределение тепловых полей в сечении МТГ-0,3-12000 за 10-часовой период работы под полной активной нагрузкой



а



б

Рис. 3. Распределение тепловых полей в сечении ротора МТГ-0,3-12000; 1 – бандаж; 2 – постоянный магнит; 3 – магнитопровод; 4 – немагнитные вставки; 5 – вал; а – с учетом потерь в постоянном магните; б – без учета потерь в постоянном магните

Таблица 2

Магнитные потери в роторе при фазном токе 169,6 А

Тип бандажа	Потери в роторе, Вт			Сумма магнитных потерь в роторе, Вт	Расчетные потери в стали статора, Вт	Суммарные магнитные потери, Вт
	ПМ	Бандаж	Сталь			
Титан ВТ22	220,7	910	5	1135,7	6297	8568,4
Углепластик	244	200	4,1	468,1	6272	7188,2
Без бандажа (воздух)	369	0	4	373	6280	7026
Мартенситная сталь	211	1631	3,1	1845,1	6356	10046,2
Бронза	92	2532	3	2627	6521	11775

цируемых токов в бандаже и магнитах, а также улучшения теплоотвода от ПМ. Результаты расчетов потерь при использовании высокопрочных материалов (табл. 1), применяемых в современных высокоскоростных машинах, представлены в табл. 2. Номинальный ток фазы – 169,6 А. Конструктивно ПМ находились на одинаковом расстоянии от источника магнитодвижущей силы, толщина бандажа для всех материалов равна 0,013 м.

Максимальные потери получены в бронзовом бандаже и составили 2532 Вт, при этом потери в ПМ оказались минимальными 92 Вт в сравнении с остальными материалами бандажей, также увеличились и суммарные потери. Максимальные потери в ПМ выявлены при безбандажной конструкции – 269 Вт. Соответственно, при увеличении электрической проводимости в бандажном кольце возрастают и потери на вихревые токи в нем, но при этом потери на ИТ в ПМ уменьшаются, так как бандаж является паразитным зазором, снижающим влияние магнитного поля на образование ИТ в ПМ.

Для определения оптимального материала бандажа, расчета потерь на вихревые токи недостаточно, так как в зависимости от теплопроводных характеристик материала, нагрев ПМ может увеличиться, даже при низких потерях в роторе. На основании результатов расчетов электромагнитных потерь при номинальном режиме работы в МТГ-12000 (см. табл. 2) проведен расчет задачи нагрева двигателя для различных материалов при работе МТГ в течение 10-ти часов с расчетным шагом 0,25 ч. При составлении численной модели учитывалось естественное охлаждение ротора и ярма статора МТГ. Так как основным источником электромагнитной энергии является ПМ и обмотка, на рис. 4, а и б, представлена максимальная температура нагрева этих частей. Также показаны результаты расчета нагрева бандажа (рис. 4, в).

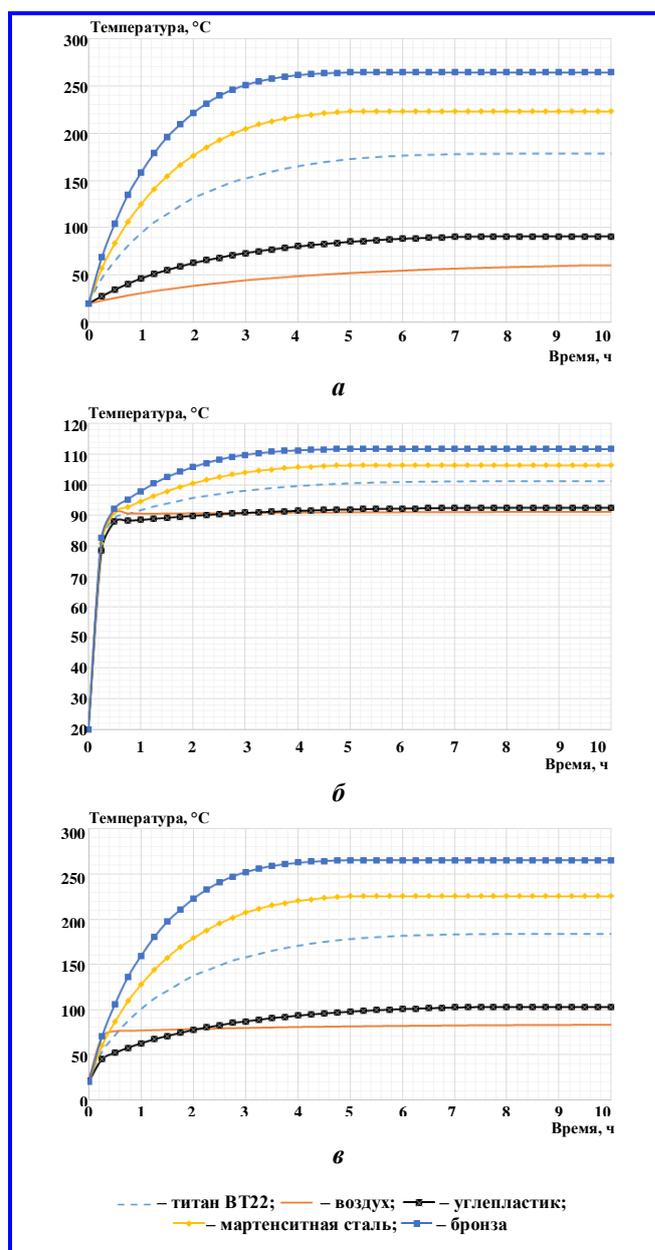


Рис. 4. Температура нагрева постоянных магнитов (а), обмотки (б) и бандажа (в) от электромагнитных потерь с учетом материала бандажа

Как видно, характеристики материала бандаж значительно влияют на нагрев обмотки и ПМ. Максимальная температура нагрева ПМ отмечается у бронзового бандаж 265°C, титан – 180°C. Минимальный нагрев ПМ показал результат безбандажной установки магнитов и бандаж из углеродного пластика – 83,2°C и 102°C, соответственно.

Нагрев ПМ и обмотки показал, что углеродное волокно оказывает наилучший вариант охлаждения относительно других материалов. В сравнении с титаном температура нагрева ПМ ниже на 78°C. Такое охлаждение ПМ при динамических режимах позволяет за счет более низкой теплопроводности углеродного волокна более медленно нагревать магниты от индуцированных токов на поверхности бандаж, относительно титана, и при этом обладают меньшей электропроводностью и потерями, соответственно.

Из экспериментальных данных исследований МТГ-12000 при работе двигателя на неполную нагрузку и частоте вращения 12 000 об/мин были произведены замеры сопротивлений фаз обмоток до и после испытаний. Сопротивление обмотки до замеров, при температуре 23°C, составляет 0,0093 Ом, после 10-часовой работы машины, при угле нагрузки 22° и фазном токе 95 А, замеренное сопротивление фазы равно 0,012 Ом. При пересчете температуры обмотки с учетом коэффициента сопротивления меди, равном 0,4%/°C, температура обмотки составляет 95,6°C. Для разработанной модели МТГ-12000 был произведен расчет нагрева двигателя при фазном токе 95 А. Температура обмотки в установившемся режиме составила 93,5°C, температура нагрева ПМ – 148°C. Погрешность расчетов из данных эксперимента и численного моделирования составила менее 5%.

Выводы

Магнитные потери в роторе могут значительно влиять на нагрев ПМ, что в свою очередь является причиной уменьшения остаточной индукции магнита, при зависимости его технических характеристик и магнитных свойств от температуры. В зависимости от проводимости материала ротора необходимо проводить поисковый расчет и анализ конструкции ротора, а также осуществлять выбор ма-

териалов с оптимальными магнитными, электрическими и теплотехническими свойствами.

Для снижения магнитных потерь, а также лучшего охлаждения ПМ и обмотки, на основании расчета МКЭ наиболее целесообразно применение высокопрочного углеродного пластика.

Литература

1. Improved analytical modelling of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surfacemounted permanent magnets [C] / Z. Q. Zhu, K. Ng, N. Schofield [et al.] // Electric Power Applications. IEE Proceedings. – IET, 2004. – Vol. 151(6). – P. 641–650. – DOI : 10.1049/ip-epa:20040546.
2. Kiriyaikin A. A. Calculation of Eddy Current Losses in Permanent Magnets of Synchronous Turbine Generators by the Sweep Method / A. A. Kiriyaikin, E. V. Shchetinin // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2021. – P. 408–413. – DOI : 10.1109/UralCon52005.2021.9559587.
3. Исмагилов Ф. Р. Сверхвысокооборотные электромеханические системы : монография / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов [и др.]. – Москва : Инновационное машиностроение, 2018. – 193 с.
4. Саттаров Р. Р. Анализ режима холостого хода в экранированном торцевом синхронном генераторе высококоэрцитивными постоянными магнитами / Р. Р. Саттаров, Т. Р. Зиганшин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – Т. 15. – № 1. – С. 41–51.
5. Ледовский А. Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А. Н. Ледовский. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.
6. Разработка высокоскоростного электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха самолета / А. И. Власов, Е. В. Волокитина, А. Л. Копчак [и др.] // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 3. – С. 34–39.
7. Исмагилов Ф. Р. Высокооборотные электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами : учебное пособие / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов. – Москва : Инновационное машиностроение, 2017. – 247 с.
8. Кирякин А. А. Исследование потерь на индуцированные токи в роторах высокооборотных синхронных машин с учетом нелинейности магнитных характеристик материалов / А. А. Кирякин, Е. В. Щетинин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2023. – Т. 196. – № 5. – С. 3–13.
9. Xu Y. An experimental verification method of calculation for rotor eddy current losses in PMSMs / Y. Xu, J. Hu, R. Hu [et al.] // Transactions of China Electrotechnical Society. – 2007. – 22 (7). – P. 150–154.

Поступила в редакцию 16.02.2024

Алексей Алексеевич Кирякин, кандидат технических наук, ведущий инженер, доцент, т. 8 (495) 365-26-69, e-mail: kiriakinaa@mcc.vniiem.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»; Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт (технический университет)»).

Евгений Владимирович Щетинин, старший преподаватель, e-mail: evgenschetinin@yandex.ru.
(Ухтинский государственный технический университет).

ANALYSIS OF MAGNETIC LOSSES AND HEATING OF ROTOR SECTORS OF HIGH-SPEED SYNCHRONOUS MACHINE WITH PERMANENT MAGNETS

A. A. Kiryakin, E. V. Shchetinin

The pattern of heating of structural parts of high-speed synchronous machine rotor was obtained on the basis of numerical calculation of magnetic losses. Impact of magnetic losses on heat in rotor bandage and permanent magnets was researched. Areas of local heat of permanent magnets in case of forced and indirect cooling of machine are considered. Impact of characteristics of the high-strength materials used at bandaging of high-speed machine rotor on the value of magnetic losses and permanent magnet heating.

Key words: high-speed machines, magnetic loss, temperature of magnet heating, permanent magnets, synchronous machines with permanent magnets.

References

1. Improved analytical modelling of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surface-mounted permanent magnets [C] / Z. Q. Zhu, K. Ng, N. Schofield [et al.] // *Electric Power Applications. IEE Proceedings.* – IET, 2004. – Vol. 151(6). – P. 641–650. – DOI: 10.1049/ip-epa:20040546. <http://dx.doi.org/10.1049/ip-epa:20040546>.
2. Kiryakin A. A. Calculation of Eddy Current Losses in Permanent Magnets of Synchronous Turbine Generators by the Sweep Method / A. A. Kiryakin, E. V. Shchetinin // *2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon).* – 2021. – P. 408–413. – DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559587.
3. Ismagilov F. R. Ultra-high-speed electromechanical systems: monography / F. R. Ismagilov, I. H. Kharullin, V. E. Vavilov [and other]. – Moscow: Publishing House «Innovative Engineering», 2018 – 193 p.
4. Sattarov R. R. Analysis of idle mode in shielded end synchronous generator by high coercive permanent magnets / R. R. Sattarov, T. R. Ziganshin // *Electrical and data processing facilities and systems.* – 2019. – Vol. 15. – No. 1. – P. 41–51.
5. Ledovskii A. N. Electrical machines with high coercive permanent magnets / A. N. Ledovskii. – Moscow: Energoatomizdat, 1985. – 168 p.
6. Development of high-speed electrical drive of plane air conditioning system compressor / A. I. Vlasov, E. V. Volokitina, A. L. Kopchak [and others] // *Electronics and electrical equipment of transport.* – 2013. – No. 3. – P. 34–39.
7. Ismagilov F. R. Ultra-high-speed electromechanical systems with high coercive permanent magnets: Study Guide / F. R. Ismagilov, I. H. Kharullin, V. E. Vavilov – Moscow: Publishing House «Innovative Engineering», 2017–247 p.
8. Kiryakin A. A. Research of losses on induced currents in rotors of high-speed synchronous machines taking into account nonlinearity of material magnetic characteristics / A. A. Kiryakin, E. V. Shchetinin // *Matters of Electromechanics. VNIEM proceedings.* – 2023. – Vol. 196. – No. 5. – P. 3–13.
9. Xu Y. An experimental verification method of calculation for rotor eddy current losses in PMSMs / Y. Xu, J. Hu, R. Hu [et al.] // *Transactions of China Electrotechnical Society. Soc.* – 2007. – 22 (7). – P. 150–154.

Aleksey Alekseevich Kiryakin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Leading Engineer, Associate Professor, t. 8 (495) 365-26-69, e-mail: kiriakinaa@mcc.vniem.ru. (JSC «VNIEM Corporation»; National Research University 'Moscow Power Engineering Institute (Technical University)).

Evgeny Vladimirovich Shchetinin, senior lecturer, e-mail: evgenschetinin@yandex.ru. (Ukhta State Technical University).