

УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ НА ИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ В РОТОРАХ ВЫСОКОБОРОТНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

А. А. Кириякин, Е. В. Щетинин

Проведено исследование потерь на индуцированные токи в роторе синхронной машины методом конечных разностей и методом конечных элементов с учетом нелинейности магнитных характеристик материалов. Выполнено исследование магнитных полей на поверхности постоянного магнита, а также распределение потерь на вихревые токи в роторе при различных режимах работы. Произведено сопоставление результатов расчета магнитных потерь в высокооборотной синхронной машине с экспериментом. При исследовании электромагнитных полей определены основные области выделения потерь в роторе.

Ключевые слова: высокоскоростные машины, магнитные потери, потери на индуцированные токи, постоянные магниты, синхронные машины с постоянными магнитами.

Введение

В настоящее время актуальным вопросом в электромеханике является разработка и создание мощных высокоскоростных синхронных машин (СМ) с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ). Применение конструкций ротора с ПМ позволяет уменьшить габаритные размеры машины, а также улучшить энергоэффективность и технико-экономические показатели привода. Применение таких машин перспективно в качестве источника электроэнергии в приводе с газовой турбиной и источника механической энергии в приводе мощных насосных и буровых агрегатов.

Одним из основных требований, предъявляемых к СМ, является увеличение значений коэффициента полезного действия (КПД). В связи с этим существует необходимость разработки уточненных методик определения потерь в машине на этапе проектирования. Расчет потерь в СМ с электромагнитным возбуждением достаточно глубоко изучен, вычисление потерь производится с большой точностью на основе применения аналитических выражений [1 – 3]. Применение аналитических выражений для определения потерь в роторах СМ с ПМ основывается на ряде существенных допущений и приводит к упрощенному рассмотрению физических процессов образования магнитных потерь в роторах высокооборотных машин [4 – 7]. В настоящее время актуальной задачей является разработка уточненной методики расчета магнитных потерь в роторе СМ с магнитоэлектрическим возбуждением, а именно потерь на индуцированные токи (ИТ) в бандажах, стали ротора и материале ПМ. В мощных машинах магнитные потери от ИТ в роторе могут составлять значительную часть от величины общих потерь, и пренебрегать ими при решении задачи создания высокоэффективных машин невозможно.

В крупных машинах такие потери могут привести к перегреву ПМ и ухудшению их магнитных характеристик, что приведет к снижению КПД. Также важную роль играет рассмотрение физических

процессов перемагничивания материала ПМ и определение потерь в локальных областях магнита, так как перегрев областей ПМ приводит к искажению формы магнитного поля ротора и возрастанию добавочных потерь. В свою очередь, работа машин с ПМ часто реализуется совместно с частотными преобразователями, которые вносят в магнитное поле воздушного зазора свои гармонические составляющие.

Современное программное обеспечение (ПО), включающее в себя расчет магнитных потерь, в основном является зарубежным, и в настоящее время стоит важная задача создания отечественного ПО для моделирования физических процессов, на основе специально разработанных методик и алгоритмов.

В основе методологии расчета потерь на ИТ стоит определение магнитного поля в воздушном зазоре, а также на поверхности конструктивных частей машины со стороны источника магнитодвижущей силы (МДС). Применяется несколько способов определения электромагнитных полей в объеме машины: аналитический и численный методы, к последнему относятся методы конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ). Для определения электромагнитных полей с большой точностью на сегодняшний день применяют МКЭ. Такой метод используется в большинстве специализированных ПО, таких как Femm, Ansys Maxwell, COMSOL Multiphysics и др. МКР также характеризуется большой точностью и может быть использован для решения дифференциальных уравнений Максвелла при заданных граничных условиях [8].

Расчет потерь на индуцированные токи в постоянных магнитах методом конечных разностей

Рассмотрим решение задачи образования потерь от ИТ МКР при различных режимах работы СМ. Потери от ИТ в ПМ на холостом ходу (ХХ) определяются пульсациями магнитного поля на поверхности ротора в результате зубчатой структуры статора и ротора [7].

ИТ в ПМ при номинальном режиме работы СМ возникают от пульсаций магнитного поля в области воздушного зазора и перемещения магнитного поля на поверхности ротора. Разложение результирующего магнитного поля в области воздушного зазора в гармонический ряд с выделением основных гармонических составляющих и расчет потерь от каждой выделенной гармоники приводит к снижению точности результатов моделирования физических процессов в материале ПМ.

Для повышения точности определения магнитных потерь разработана уточненная методика [8], которая позволяет производить расчет магнитных потерь в ферромагнитных материалах ротора на основе анализа распределения электромагнитного поля в локальных областях. Методика основывается на численном решении системы уравнений Максвелла, описывающих распределение магнитного поля в СМ с учетом нелинейности магнитных характеристик ферромагнитных материалов, используемых в конструкции машины.

В результате преобразования системы уравнений Максвелла в двухмерной постановке задачи можно получить уравнение в частных производных относительно напряженности магнитного поля по двум пространственным составляющим магнитного поля $H_x(t)$ и $H_y(t)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} = \mu\gamma \frac{\partial H_x}{\partial t}; \\ \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} = \mu\gamma \frac{\partial H_y}{\partial t}; \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \gamma E_z; \\ \mu = \frac{\partial B(H)}{\partial H}; \\ P = E_z^2 \gamma h S, \end{array} \right. \quad (1)$$

где H_x и H_y – напряженности магнитного поля по осям X и Y , А/м; E_z – аксиальная составляющая напряженности электрического поля, В/м; h – высота рассматриваемой части области ротора, м; S – площадь рассматриваемой части области ротора, м; γ – электрическая проводимость, См/м; μ – дифференциальная магнитная проницаемость.

Также систему уравнений (1) можно записать относительно цилиндрической системы координат (ЦСК):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 (rH_\tau)}{\partial r^2} = r\mu\gamma \frac{\partial H_\tau}{\partial t}; \\ \frac{\partial^2 (H_r)}{\partial \tau^2} = r\mu\gamma \frac{\partial H_r}{\partial t}; \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial (rH_\tau)}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial \tau} = \gamma E_z; \\ \mu = \frac{\partial B(H)}{\partial H}; \\ P = E_z^2 \gamma h S, \end{array} \right. \quad (2)$$

где H_r и H_τ – радиальная и тангенциальная составляющие напряженности магнитного поля по радиальной r и тангенциальной τ оси, А/м; r – полярная координата, м.

Решение дифференциальных уравнений (1) осуществляется МКР [8, 9]. Дифференциальное уравнение заменяется системой линейных алгебраических уравнений. Конечно-разностная аппроксимация выполняется по неявной схеме для более устойчивого решения при отношении шага по высоте магнита Δz и шага по времени Δt . Конечно-разностные уравнения, записанные по неявной схеме с пространственными и временными шагами, решаются методом прогонки с учетом граничных и начальных условий [9].

Граничные условия задаются на основе решения двухмерной задачи распространения магнитного поля $H(t)$ в объеме ротора, разбитого на n -е количество участков. Для каждого участка с помощью решения полевой задачи в программных комплексах (ПК) необходимо рассчитать напряженности магнитного поля $H(t)$ для заданной точки на поверхности расчетной области. В качестве решателя таких полевых задач возможно использование численного моделирования электромагнитных полей в ПК для определенных шагов времени или угла поворота ротора, например, в COMSOL Multiphysics.

Для учета нелинейности магнитных характеристик для электротехнических сталей предлагается задавать дифференцированную магнитную проницаемость на каждой итерации H по глубине материала ротора с использованием математической модели гистерезисных кривых по модели Чана [10]:

$$B_{\text{верх}}(H) = \frac{B_s(H + H_c)}{|H + H_c| + H_c \left(\frac{B_s}{B_r} - 1 \right)} + \mu_0 H;$$

$$B_{\text{низ}}(H) = \frac{B_s(H - H_c)}{|H - H_c| + H_c \left(\frac{B_s}{B_r} - 1 \right)} + \mu_0 H,$$
(3)

где $B_{\text{верх}}(H)$, $B_{\text{низ}}(H)$ – верхняя ветвь гистерезисного цикла и нижняя ветвь гистерезисного цикла, Тл; B_s – индукция насыщения ферромагнетика, Тл; B_r – остаточная индукция ферромагнетика, Тл; H_c – коэрцитивная сила, А/м.

Для определения граничных условий на основании полученной зависимости $H(t)$ задаются значения на шаге t_j . Используя рассчитанные значения магнитного поля, граничные условия можно представить в виде таблицы $H(t)$ с временным шагом за период T . Для каждого значения H в точке времени t_j методом прогонки производится расчет значения потерь от ИТ P_j .

Общие потери на ИТ за период T определяются как среднеквадратичное значение мощности за временной шаг t_j :

$$P_{\text{ИТ}} = \sqrt{\frac{\sum P_j^2 t_j}{T}}.$$
(4)

Представленная методика позволяет определять потери в локальных областях не только в ПМ, но и в бандажах, стали ротора, полюсных наконечниках и других конструктивных элементах СМ, в двухмерной и в трехмерной постановках задачи при заданных условиях распределения магнитного поля. Таким образом, на основе применения разработанной методики возможно проводить уточненный анализ магнитных потерь в локальных областях ротора, соответственно, и их нагрев, что позволяет существенно повысить точность расчетов при проектировании мощных высокоскоростных СМ с магнитоэлектрическим возбуждением.

Расчет магнитных потерь методом конечных элементов в COMSOL Multiphysics при холостом ходе и нагрузке

Для оценки точности расчетов магнитных потерь на основе применения разработанной методики был проведен сопоставительный анализ результатов расчетов с экспериментальными данными. В качестве объекта исследований был взят высокоскоростной синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов МТГ-0,3-12000 (рис. 1)

мощностью 300 кВт, частота вращения ротора 12 000 об/мин [11]. В генераторе применен статор от асинхронного двигателя серии 5А280, который имеет 48 пазов. В пазах магнитопровода расположена шестифазная обмотка, две группы по три фазы, сдвинутые на угол 30 градусов относительно друг друга, для уменьшения добавочных потерь от пульсаций электромагнитного момента, вызванных высшими гармониками электромагнитного поля при работе с частотным преобразователем. К обмоткам подводилось фазное напряжение 300 В. Ротор генератора с магнитоэлектрическим возбуждением выполнен по типу «звездочка» и имеет четыре полюса. ПМ закреплены титановым бандажом и расположены между немагнитными вставками. ПМ выполнены из Nd-Fe-B (неодим-железо-бор) марки НмБ 250/240 с остаточной индукцией 1,2 Тл и максимальной рабочей температурой 180°C. Проводимость бандажа и ПМ составляет 0,653 и 0,625 МСм/м, соответственно. Электрический контакт между бандажом и магнитами не учитывается в связи использования изоляционного покрытия ПМ.

Динамическая магнитная проницаемость материала бандажа и ПМ μ_d практически не изменяется вследствие жесткой магнитной характеристики материалов ПМ. Однако магнитная проницаемость увеличивается при нагреве ПМ, что необходимо учитывать в высокоскоростных СМ.

Для МТГ-0,3-12000 были получены экспериментальные данные при работе в режиме ХХ, а также в режиме генератора и в двигательном режиме с углом нагрузки 33°, и частотой вращения ротора 4000, 6000 и 12 000 об/мин, при этом обмотки соединялись в одну трехфазную группу. На основе результатов проведенных экспериментальных исследований определены электромагнитные потери машины и нагрев (экспериментальные данные МТГ-0,3-12000 предоставлены АО «Корпорация «ВНИИЭМ», лабораторией под руководством В. В. Магина).

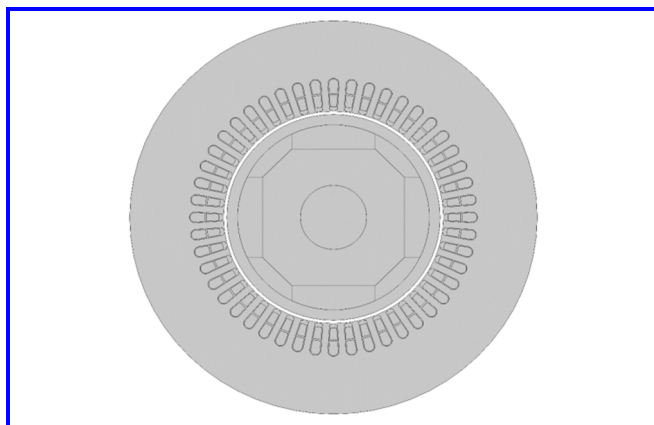


Рис. 1. Конструкция МТГ-0,3-12000

Для сопоставления потерь с экспериментальными данными в режиме ХХ было проведено численное моделирование и определение электромагнитных потерь МТГ-0,3-12000 в COMSOL Multiphysics в двухмерной постановке задачи для различных скоростей вращения ротора. Расчет проводился с учетом максимально возможного расчета во временной области с минимальным шагом решателя во времени равном 10^{-6} с.

Результаты расчета и эксперимента представлены в табл. 1.

Как следует из полученных результатов, расчетные значения достаточно точно совпадают с результатами эксперимента. Магнитные потери в стали статора составляют 95% от общих магнитных потерь и изменяются в функции скорости вращения ротора, в том числе потери на ИТ в бандаже и ПМ.

По результатам расчета получена картина распределения магнитных потерь в объеме машины при скоростях вращения 3750, 5480 и 12 000 об/мин, соответственно. Картина потерь представлена на рис. 2.

Из картины распределения магнитных потерь при ХХ следует: основная часть приходится на зубцовую зону статора, в роторе основные потери приходятся на ИТ на поверхности бандажа относительно каждого полюса ПМ. Потери в магнитах, а также в стали ротора для данной конструкции СМ являются не значительными, поэтому ими можно пренебречь.

Задание граничных условий при анализе магнитного поля

При определении магнитных потерь МКР задавались начальные и граничные условия, исходя из картины распределения магнитного поля $H(t)$, рассчитанного в COMSOL Multiphysics. В качестве начальных условий принималось отсутствие магнитного поля в начальный момент времени. С целью задания граничных условий на поверхности ПМ и бандажа был произведен расчет магнитного поля МТГ-0,3-12000. Для уменьшения расчетного времени расчет проводился для одного полюса, поэтому примем допущение, что распределение электромагнитных полей в объеме полюсов симметрично. Расчет поля проводился в материаль-

ной системе координат (МСК) (oX, oY, oZ), привязанных к движущемуся объекту исследования. Также возможно задание граничных условий в ЦСК и в декартовой системах координат.

Для определения потерь МКР и решения системы уравнений (1) необходимо задать граничные условия. В двухмерной постановке задачи в качестве граничных условий принимается изменение магнитного поля, которое будет индуцировать электрическое вихревое поле только по продольной оси X от составляющей $H_Y(t)$ и по поперечной оси Y от составляющей $H_X(t)$, соответственно.

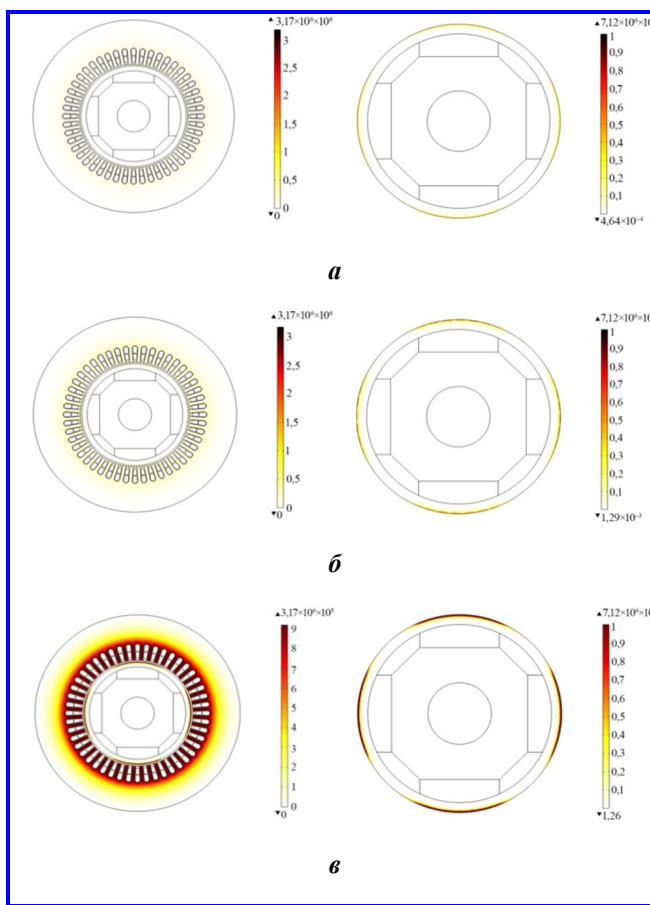


Рис. 2. Расчет распределения потерь для всего объема машины (слева) и для ротора (справа) при 3750 об/мин (а), 5480 об/мин (б), 12 000 об/мин (в)

Таблица 1

Магнитные потери при холостом ходе

Частота вращения МТГ-0,3-12000, об/мин	Экспериментальные данные магнитных потерь, Вт	Расчет магнитных потерь в COMSOL Multiphysics			
		Потери в стали статора, Вт	Потери в бандаже, Вт	Потери в постоянном магните, Вт	Суммарные потери, Вт
3750	841	831	46	0	877
5480	1814	1695	88	0,004	1783,004
12 000	7635	7331	321	0,1	7652,1

Для сопоставления распределения напряженности магнитного поля при ХХ и нагрузке был проведен расчет продольной и поперечной составляющей магнитного поля для центральной точки полюса на поверхности бандажа и поверхности ПМ. Результаты расчета поля при ХХ представлены на рис. 3 и 4.

Как видно из рассчитанных осциллограмм (рис. 3, а, б) составляющие магнитного поля $H(t)$ на поверхности бандажа имеют несинусоидальную форму. Следовательно, при уточненных расчетах потерь на ИТ необходимо задавать граничные условия в виде значения H на каждом временном шаге t за период T_z (рис. 5, а, б), определяющийся из числа зубцов статора Z_1 на одну пару полюсов:

$$T_z = \frac{T}{Z_1}. \quad (5)$$

Поле на поверхности магнита (рис. 5, в, г) имеет осциллограмму близкую к синусоидальной, что упрощает решение задачи определения потерь на ИТ и позволяет пользоваться упрощенными граничными условиями при решении задачи с использованием МКР.

Результаты расчета напряженности магнитного поля $H(t)$ для составляющих поля на поверхности бандажа и магнита в центре полюса за один период при установившемся процессе при скорости вращения 12 000 об/мин представлены на рис. 6 и 7 при активной нагрузке СМ. Как видно из картины магнитного поля $H_x(t)$ и $H_y(t)$, поверхность бандажа имеет явно выраженную периодическую несинусоидаль-

ную осциллограмму. Период для задания граничных условий при активной нагрузке рассчитывается:

$$T = \frac{1}{fm}. \quad (6)$$

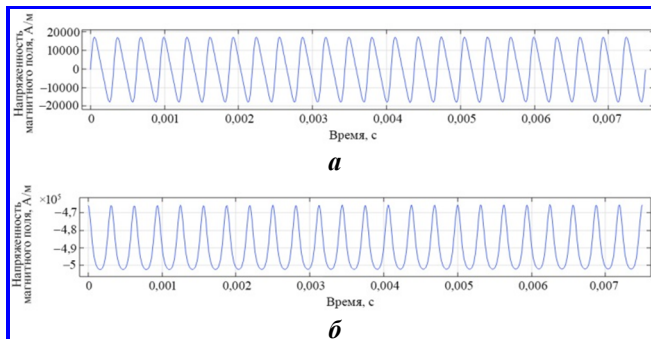


Рис. 3. Изменение напряженности магнитного поля $H(t)$ на поверхности бандажа при холостом ходе в центральной точке полюса при частоте вращения 3750 об/мин: продольной X (а) и поперечной Y (б) составляющей

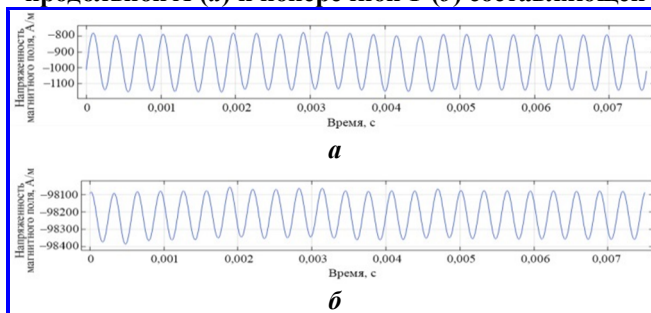


Рис. 4. Изменение напряженности магнитного поля $H(t)$ на поверхности постоянных магнитов при холостом ходе в центральной точке полюса при частоте вращения 3750 об/мин: продольной X (а) и поперечной Y (б) составляющей

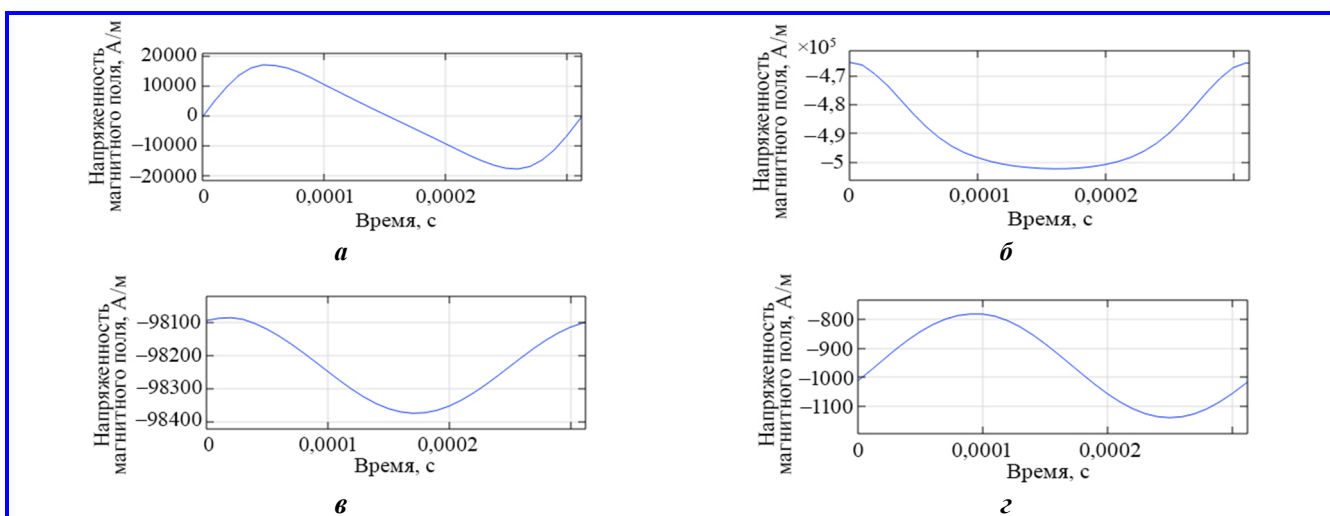


Рис. 5. Изменение напряженности магнитного поля $H(t)$ на поверхности бандажа по продольной X (а) и поперечной Y (б) составляющей и на поверхности постоянных магнитов по продольной X (а) и поперечной Y (б) составляющей при холостом ходе в центральной точке полюса при частоте вращения 3750 об/мин

Как видно из рис. 6 – 8, картина распределения магнитного поля в точке на поверхности бандажа $H(t)$ имеет несинусоидальный характер, что обуславливается высшими гармониками, связанными с конструктивными особенностями машины, и нелинейными характеристиками материалов. За счет бандажа и воздушного зазора уменьшается влияние пульсирующего магнитного поля на поверхности ПМ и его амплитудные значения $H(t)$.

Расчет граничных условий для радиальной и тангенциальной составляющей $H(t)$ в COMSOL Multiphysics требует преобразования по следующим формулам:

$$H_r(t) = \frac{H_x(t)X + H_y(t)Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}}; \quad (7)$$

$$H_\tau(t) = \frac{-H_x(t)Y + H_y(t)X}{\sqrt{X^2 + Y^2}}; \quad (8)$$

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2}. \quad (9)$$

Результаты расчета граничных условий для центральной точки поверхности бандажа в центре полюса показаны на рис. 8.

При расчете модели МТГ-0,3-12000 в двигательном режиме при скорости вращения 12 000 об/мин при номинальном моменте были получены годографы

изменения составляющих напряженности магнитного поля на поверхности ПМ по осям X и Y (рис. 9).

Отношение максимальных значений амплитуд магнитного поля составляющих $H_y(t)$ и $H_x(t)$ изменяется в 2 – 4 раза по всей поверхности ПМ. Соответственно, анализ количественного вклада двух (2D-задача) и трех (3D-задача) составляющих векторов магнитного поля в результирующий вектор может быть использован для определения магнитных потерь в единице объема.

Расчет потерь методом конечных разностей на основе сеточного разбиения

Для уточненного определения распределения потерь по всему объему магнита необходимо применить разбиение расчетной области на секции, так называемый сеточный метод. При этом задать граничные условия можно как в ЦСК, так и в МСК.

Для решения задачи в ЦСК, к примеру, возможно провести разбиение магнита на участки как по радиус вектору, так и по окружности, как показано на рис. 10. В этом случае расчет граничных условий предлагается проводить в точках 1 – 8 и 1' – 8' (для одной половины полюса ПМ) для определения тангенциальной составляющей $H_\tau(t)$, а в точках а – г и а' – г' радиальную составляющую $H_r(t)$. При этом возможно локализовать

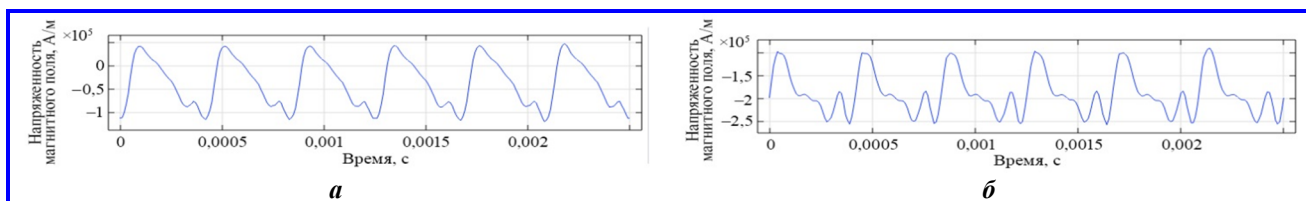


Рис. 6. Напряженности магнитного поля в центральной точке полюса на поверхности бандажа продольной X (а) и поперечной Y (б) составляющей $H(t)$ при активной нагрузке 12 000 об/мин

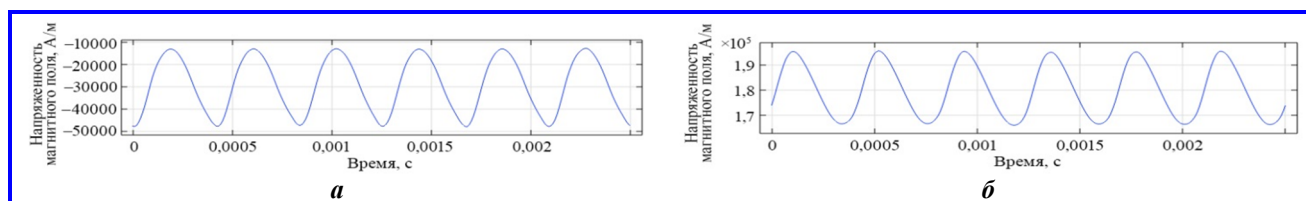


Рис. 7. Напряженности магнитного поля в центральной точке полюса на поверхности постоянных магнитов продольной X (а) и поперечной Y (б) составляющей $H(t)$ при активной нагрузке 12 000 об/мин

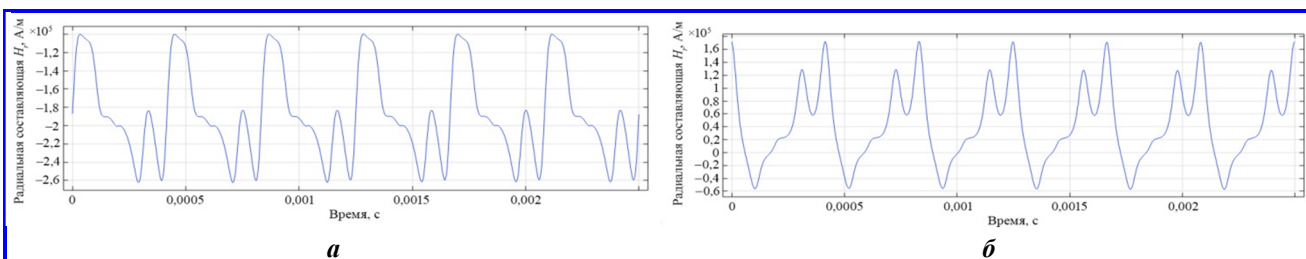


Рис. 8. Напряженности магнитного поля в центральной точке полюса на поверхности бандажа: $H_r(t)$ радиальная (а) и $H_\tau(t)$ тангенциальная (б) составляющая магнитного поля при активной нагрузке 12 000 об/мин

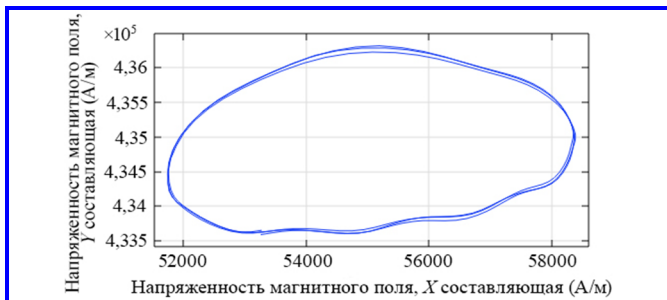


Рис. 9. Годограф отношения напряженности магнитного поля от двух составляющих

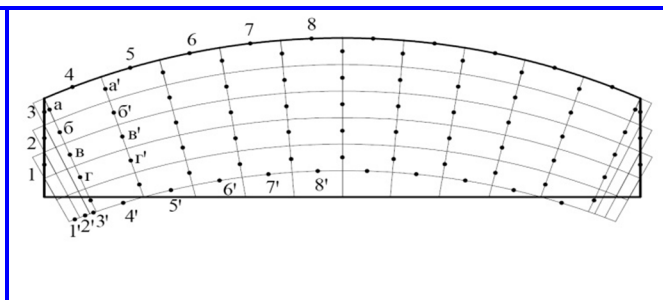


Рис. 10. Разбиение постоянных магнитов на секции для определения потерь от индуцированных токов радиальной $H_r(t)$ (1 – 3, а – г, а' – г') и тангенциальной $H_\tau(t)$ (1 – 8, 1' – 8') составляющей магнитного поля

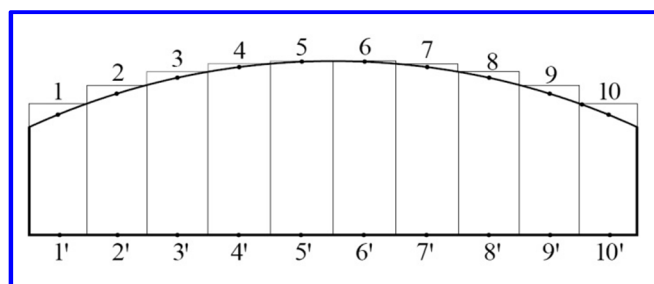


Рис. 11. Разбиение постоянных магнитов на секции для определения потерь от индуцированных токов поперечной составляющей магнитного поля $H_x(t)$ в материальной системе координат

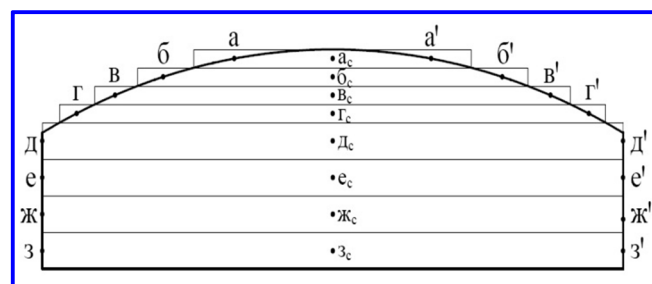


Рис. 12. Разбиение постоянных магнитов на секции для определения потерь от индуцированных токов продольной составляющей магнитного поля $H_y(t)$ в материальной системе координат

геометрически сложной участки и провести расчет в областях 1 – 1', 2 – 2' и 3 – 3' с учетом особенности геометрии конструктивной части ротора. При решении задачи МКР в ЦСК возникают трудности сходимости расчета при задании пространственно-временных шагов, поэтому предлагается воспользоваться МСК, где решение являются более простыми при постановке задачи.

Для задания граничных условий в МСК область ПМ была разбита на 10 поперечных секций (рис. 11) для определения потерь от продольной составляющей $H_x(t)$ и на 8 продольных секций (рис. 12) для определения потерь от поперечной составляющей $H_y(t)$. В центральных точках на границах секций продольных и поперечных участков проводился расчет $H_x(t)$ и $H_y(t)$. Аналогичным образом была применена сетка и для расчета области бандажа. При этом принимается допущение, что поле на границах секций одномерное и определяется в каждой точке границы.

Исходя из рассчитанных граничных условий для $H_x(t)$ (в точках 1 – 10 и 1' – 10' на рис. 11) и $H_y(t)$ (в точках а – з, а_с – з_с и а' – з' для каждого поперечного ряда на рис. 12) при двухмерном моделировании, был произведен расчет потерь на ИТ МКР, а полученные системы линейных алгебраических уравнений решены методом прогонки в каждой сек-

ции области бандажа и ПМ относительно продольных и поперечных осей X и Y. Магнитные потери методом прогонки позволяют определить потери по всей области секции магнита с заданным шагом и вычислить общие потери от двух составляющих магнитного поля. Для построения физической картины распределения потерь в области нахождения потерь на ИТ рекомендуется задавать шаг секции по двум координатам $\Delta X = \Delta Y$. Расчет проводился в программе Microsoft Excel. При расчете методом прогонки для каждой точки проводилось задание граничных условий в виде таблицы распределения напряженности магнитного поля $H_x(t)$ и $H_y(t)$ каждой точки за определенный период T из условий анализа полученных $H(t)$.

Для задания граничных условий при нагрузке были взяты значения H, определенные в COMSOL Multiphysics, с шагом, по времени равном 0,00001 с, и с периодом, равным 0,00021 с. Граничные условия в точках 1' – 10' были приняты нулевыми $H(t) = 0$. Для расчета потерь от $H_y(t)$ в ПМ и в бандаже возможно разбиение области полюса поперек на две равные части при условии, что магнитное поле на поверхности ПМ двух его частей симметрично, но при расчете реальной картины магнитных полей рекомендуется расчет всей области конструктивных частей ротора.

Таким образом, задавались значения прогоночных коэффициентов для 16-ти значений напряженности поля $H(t)$ по оси X и 10-ти значений по оси Y , включая нулевые. Для каждой итерации было выполнено решение уравнений (1) – (2) МКР с применением метода прогонки, рассчитана напряженность электрического поля E_i для каждого слоя «сетки» по высоте магнита и по ширине, определены потери на ИТ P_i . Затем были найдены суммарные потери в каждой секции (4).

Аналогично проводился расчет в бандаже ротора. Часть полюсного перекрытия бандажа, разбивалась на 15 равных участков вдоль и 20 равных участков поперек. Для каждой секции рассчитывалось магнитное поле на поверхности бандажа в центральной точке каждой секции. Далее расчет потерь проводился по аналогии с расчетом потерь в ПМ, описанным выше.

При расчете двухмерной модели на XX картина поля (см. рис. 4) в центральных точках секций имеет осциллограмму близкую к синусоидальной. Для решения уравнения (7) в качестве граничных условий достаточно определить амплитудные значения для функции $H(t)$ при условии синусоидального распределения магнитного поля. При несинусоидальном распределении электромагнитного поля рекомендуется задавать граничные условия в виде значений $H(t)$ с определенным временным шагом.

При заданных граничных условиях для каждого участка магнита при XX, при активной нагрузке в генераторном режиме и в двигательном режиме, при угле нагрузки 33° (3 фазы) был проведен расчет потерь на ИТ от продольной $H_x(t)$ и от поперечной $H_y(t)$ составляющих. В табл. 2 и 3 представлены результаты расчетов для двигательного режима.

Таблица 2

Распределение магнитных потерь от индуцированных токов в постоянных магнитах по областям от поперечной составляющей $H_x(t)$ (см. рис. 9)

Область постоянных магнитов (1 полюс)	Потери на индуцированные токи при холостом ходе, Вт	Потери на индуцированные токи при активной нагрузке 12000 об/мин, Вт	Потери на индуцированные токи в двигательном режиме с углом нагрузки 33° , 12000 об/мин, Вт
1 – 1'	0,0315	1,1	0,47
2 – 2'	0,0196	2	0,43
3 – 3'	0,01435	1,1	0,12
4 – 4'	0,0042	4,2	0,23
5 – 5'	0,000091	3,7	0,31
6 – 6'	0,00308	8,6	0,55
7 – 7'	0,0098	4,3	0,92
8 – 8'	0,01064	5,4	0,76
9 – 9'	0,02674	4,8	0,51
10 – 10'	0,0511	6,3	0,61
Во всем объеме	0,10565	41,5	4,91

Таблица 3

Распределение магнитных потерь от индуцированных токов в постоянных магнитах по областям от продольной составляющей $H_y(t)$

Номер выделенной области (1 полюс)	Потери от индуцированных токов, Вт		
	Холостой ход	Активная нагрузка генератора	Двигательный режим, угол нагрузки 33°
а – а'	0,045	12,92	1,61
б – б'	0,0121	3,85	0,71
в – в'	0,0098	1,41	0,081
г – г'	0,00117	0,63	0,12
д – д'	0,00092	0,035	0,051
е – е'	0	0,004	0
ж – ж'	0	0,002	0
з – з'	0	0,001	0
Во всем объеме	0,068	18,85	2,572

Аналогичным образом были проведены расчеты потерь в бандаже. Бандаж был разбит в виде сетки, далее были определены граничные условия для каждой центральной точки границ сетки при активной нагрузке в двигательном режиме и режиме ХХ, после чего проведен расчет потерь на ИТ МКР.

Расчет распределения потерь по высоте ПМ от $H_x(t)$ составляющей участка $b - b'$ с шагом $h = 0,0006$ м представлен на рис. 13 (двигательный режим).

Для сравнения разработанной методики расчета потерь МКР и эксперимента дополнительно был проведен расчет потерь в роторе МТГ-0,3-12000 с использованием ПО COMSOL Multiphysics [12]. К недостаткам ПО COMSOL Multiphysics следует отнести большие временные затраты на выполнение расчетов и повышенные требования к вычислительной технике, а также стоимость данного зарубежного ПО.

Результаты эксперимента, расчета с использованием МКР и в COMSOL Multiphysics потерь на ИТ в роторе с частотой вращения ротора CM 12000 об/мин представлены в табл. 4.

Как видно из полученных результатов, погрешность экспериментальных данных и расчета МКР при задании граничных условий из полевого расчета в COMSOL Multiphysics составляет от 2 – 10%. Погрешность расчета МКР для описанного разбиения и расчета потерь в COMSOL Multiphysics составляет не более 5%. Полученная погрешность обусловлена количеством участков (n) – разбитых областей в объеме ротора. Чем выше количество разбиваемых секций, и соответственно, больше количество итераций граничных условий в объеме ротора, тем выше точность. Различие результатов расчета в COMSOL Multiphysics и эксперимента составляет 0,4 – 10 %.

В МТГ-0,3-12000 потери преобладают в титановом бандаже, при этом потери в ПМ снижаются в связи с гашением магнитного поля за счет экранирующего действия немагнитного материала титана. Однако выделение потерь в бандаже приводит к его нагреву, а следовательно, и нагреву ПМ. В настоящее время проводятся поисковые работы применения бандажей из низкопроводящих материалов, например, полимерные высокопрочные материалы с низкими показателями удельной проводимости [13]. Для исследования потерь на ИТ в ПМ был проведен расчет потерь в роторе МТГ-0,3-12000 при активной нагрузке 300 кВт при условии нулевой электрической проводимости материала бандажа. Потери в ПМ при этом составили 800 Вт, что примерно в 4 раза больше рассчитанных потерь в ПМ при титановом бандаже. Картина

распределения потерь в ПМ при отсутствии проводящего бандажа представлена на рис. 14.

Таким образом, использование крепления ПМ из синтетических материалов приводит к образованию значительных потерь от ИТ в ПМ.

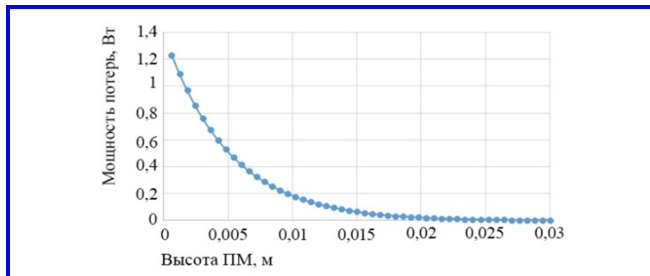


Рис. 13. Распределение потерь по высоте постоянных магнитов

Таблица 4

Магнитные потери в роторе МТГ-0,3-12000 при активной нагрузке

Область синхронной машины	Магнитные потери, Вт		
	Эксперимент	Метод конечных разностей	COMSOL Multiphysics
Режим холостого хода			
Бандаж	305	289,4	320,5
Постоянный магнит		0,6946	0,47
Сталь ротора		–	0,0004
Суммарные потери		290,1	321
Двигательный режим (30% от номинальной мощности)			
Бандаж	667	608	683,67
Постоянный магнит		29,93	22,6
Сталь ротора		–	0,36
Суммарные потери		637,93	706,63
Генераторный режим (100% номинальной мощности)			
Бандаж	2795	3031	2836,9
Постоянный магнит		241,4	278,6
Сталь ротора		–	2,37
Суммарные потери		3272,4	3117,87

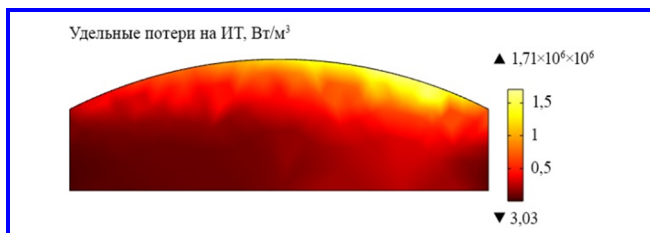


Рис. 14. Распределение потерь на индуцированные токи в постоянных магнитах при отсутствии проводящего бандажа

Выводы

Разработанная методика расчета потерь от ИТ в роторах СМ с ПМ позволяет определять потери и анализировать физику процессов в роторах с ПМ с учетом распределения электромагнитного поля в объеме ПМ, а также с учетом нелинейности магнитных характеристик и реального характера переманичивания материала ПМ.

Анализ расчетных значений магнитных потерь, полученных с использованием численного решения полевой задачи, реализуемых с помощью МКР, результатов двухмерного моделирования в COMSOL Multiphysics и экспериментальных данных показал удовлетворительное совпадение расчетных значений и эксперимента в пределах пяти процентов.

Разработанная методика может применяться с целью увеличения точности проектирования новых мощных высокоскоростных СМ с магнитоэлектрическим возбуждением. Методика определения потерь методом конечных разностей предназначена: для расчетов и анализа рабочих параметров и характеристик СМ с возбуждением от ПМ с учетом ИТ в бандеже, ПМ и стали ротора; исследования конструктивных особенностей магнитной системы и систем охлаждения ротора; обоснования применения различных материалов и технологических процессов при изготовлении ротора.

Применение разработанной методики наиболее эффективно на этапе выполнения поисковых расчетов и не требует больших вычислительных мощностей, как, например, применение ПО COMSOL Multiphysics.

Литература

1. Копылов И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов. – Москва : Высшая школа, 2002. – 757 с.
2. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. – Москва : Энергия, 1980. – 928 с.
3. Bertotti G. General Properties of Power Loss in Soft Magnetic Materials / G. Bertotti // IEEE Trans. Magnetics. – 1998. – Vol. 24. – No. 1. – P. 621–630.
4. Improved analytical modeling of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surface mounted permanent magnets / Z. Q. Zhu, K. Ng, N. Schofield [et. al.] // IEE Proceeding on Electric Power Applications. – 2004. – Vol. 151. – No. 6. – P. 641–650. – DOI : 10.1049/ip-epa:20040546.
5. Analytical calculations of induced eddy currents losses in the magnets of surface mounted pm machines with consideration of circumferential and axial segmentation effects / Mirzaei M., Binder A., Funieru B. [et al.] // IEEE Trans. Magn. – 2012. – Vol. 48. – P. 4831–4841.
6. Zou J. Analytical calculation of rotor eddy current losses of surface-mounted PMSM / J. Zou // Electric Machines and Control. – 2009. – Vol. 1. – No. 13. – P. 63–72.
7. Investigation of AC loss of permanent magnet of SPM motor considering hysteresis and eddy-current losses / A. Fukuma, S. Kanazawa, D. Miyagi [et. al.] // IEEE Trans. Magn. – 2005. – Vol. 41. – No. 5. – P. 1964–1967. – DOI : 10.1109/TMAG.2005.846282.
8. Kiriyakin A. A. Calculation of eddy current losses in permanent magnets of synchronous turbine generators by the sweep method / A. A. Kiriyakin, E. V. Shchetinin // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Magnitogorsk, Russian Federation, 24 – 26 September 2021) (UralCon2021). – 2021. – P. 408–413. – DOI : 10.1109/UralCon52005.2021.9559587.
9. Кирякин А. А. Определение магнитных потерь в постоянных магнитах синхронной машины на основе расчета распределения электромагнитного поля в полюсах ротора / А. А. Кирякин, Е. В. Щетинин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2022. – Т. 187. – № 2. – С. 9–16.
10. Nonlinear transformer model for circuit simulation / J. H. Chan, A. Vladimirescu, X.-C. Gao [et. al.] // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1991. – Vol. 10. – No. 4. – P. 476–482.
11. Магин В. В. Особенности конструкции высокоскоростных синхронных генераторов с постоянными магнитами, предназначенных для работы в составе системы электродвижения / В. В. Магин, М. Б. Панасюк // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2015. – Т. 149. – № 6. – С. 18–23.
12. Cunningham B. Учет потерь на вихревые токи при расчете электродвигателя с постоянными магнитами / Bridget Cunningham // COMSOL : [сайт]. – 2017. – URL : <https://www.comsol.ru/blogs/capturing-eddy-current-losses-in-a-permanent-magnet-motor-design/> (дата обращения : 13.10.2023).
13. Zubkov Y. V. Designing of high speed permanent magnet electric machines with rotor strength verification / Y. V. Zubkov, V. E. Vereshagin // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Magnitogorsk, Russian Federation, 24 – 26 September 2021) (UralCon2021). – 2021. – P. 414–418. – DOI : 10.1109/UralCon52005.2021.9559459.

Поступила в редакцию 23.10.2023

Алексей Алексеевич Кирякин, кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер.
т. 8 (495) 365-26-69, e-mail: kiriakinaa@mcc.vniiem.ru.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»; Национальный исследовательский университет «МЭИ»).

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

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

Research of losses on induced currents in rotor of synchronous machine using a finite-difference method and finite-element method, taking into account nonlinearity of material magnetic characteristics, has been performed. Research of magnetic fields on the surface of permanent magnet and also distribution of losses on eddy currents in rotor at different operation modes has been implemented. Comparison of the results of magnetic losses calculation in high-speed synchronous machines with the experiment has been implemented. Primary areas of losses allocation in rotor have been determined during the research of electromagnetic fields.

Key words: High-speed machines, magnetic losses, losses on induced currents, constant magnets, synchronous machines with permanent magnets.

References

1. Kopylov I. P. Designing of electrical machines / I. P. Kopylov. – Moscow: Vysshaya shkola, 2002. – 757 p.
2. Ivanov-Smolenskii A. V. Electrical Machines / A. V. Ivanov-Smolenskii. – Moscow: Energja, 1980. – 928 p.
3. Bertotti G. General Properties of Power Loss in Soft Magnetic Materials / G. Bertotti // IEEE Trans. Magnetics, 1998. – Vol. 24. – No. 1. – P. 621–630.
4. Improved analytical modelling of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surface-mounted permanent magnets[J] / Z. Q. Zhu, K. Ng, N. Schofield, D. Howe // IEEE Proceeding on Electric Power Applications, 2004. – Vol. 151. – No. 4. – P. 641–650.
5. Analytical calculations of induced eddy currents losses in the magnets of surface mounted pm machines with consideration of circumferential and axial segmentation effects / Mirzaei M., Binder A., Funieru B. [et al.] // IEEE Trans. Magn. – 2012. – Vol. 48. – P. 4831–4841.
6. Xu Y. Analytical calculation of rotor eddy current losses of surface-mounted PMSM [J] / Y. Xu, J. Hu, J. Zou // Electric Machines and Control, 2009. – Vol. 1. – No. 13. – P. 63–72.
7. Investigation of AC loss of permanent magnet of SPM motor considering hysteresis and eddy-current losses / A. Fukuma, S. Kanazawa, D. Miyagi, N. Takahashi // IEEE Trans. Magn., May 2005. – Vol. 41. – No. 5. – P. 1964–1967.
8. Calculation of Eddy Current Losses in Permanent Magnets of Synchronous Turbine Generators by the Sweep Method / A. A. Kiriyakin, E. V. Shchetinin // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Magnitogorsk, Russian Federation, 24 – 26 September 2021). – 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021. – P. 408 – 413. – DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559587.
9. Kiryakin A. A. Determination of magnetic losses in constant magnets of synchronous machine based on calculation of electromagnetic field distribution in the rotor poles / A. A. Kiryakin, E. V. Shchetinin // Electromechanical Matters. VNIIEM Studies. – 2022. – V. 187. – № 2. – P. 9.–16.
10. Nonlinear transformer model for circuit simulation / J. H. Chan, A. Vladimirescu, X.-C. Gao, P. Liebmann, J. Valainis // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, April 1991. – Vol. 10. – No. 4. – P. 476 – 482.
11. Magin V. V. Design features of high-speed synchronous generators with permanent magnets designed for operation as a part of electric propulsion system / V. V. Magin, M. B. Panasyuk // Electromechanical Matters. VNIIEM Studies – 2015. – Vol. 149 – P. 18–23.
12. Calculation of losses on eddy currents during calculation of electric drive with permanent magnets / B. Cunningham // – Text: electronic. COMSOL: website. – 2017. – URL: <https://www.comsol.ru/blogs/capturing-eddy-current-losses-in-a-permanent-magnet-motor-design/>.
13. Designing of High Speed Permanent Magnet Electric Machines with Rotor Strength Verification / Y. V. Zubkov, V. E. Vereshagin // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Magnitogorsk, Russian Federation, 24 – 26 September 2021). – 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021. – P. 414–418. – DOI:10.1109/UralCon52005.2021.9559459.

*Aleksey Alekseevich Kiryakin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),
Leading Engineer, Associate Professor of MPEI,
t. 8 (495) 365-26-69, e-mail: kiryakinaa@mcc.vniiem.ru.
(JC VNIIEM Corporation; MPEI).*

*Evgeny Vladimirovich Shchetinin, Senior Lecturer, e-mail: evgenschetinin@yandex.ru.
(Ukhta State Technical University).*