

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ В ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОЛЮСАХ РОТОРА

А. А. Кирякин, Е. В. Щетинин

*Разработана уточненная методика расчета магнитных потерь в постоянных магнитах на основе решений системы уравнений Максвелла. Исследовано распределение поля внутри постоянного магнита и определены потери в постоянных магнитах путем решения системы уравнений Максвелла методом конечных разностей. Для решения алгебраических конечно-разностных уравнений использован метод прогонки. Проведен численный расчет потерь в постоянных магнитах с использованием программы COMSOL Multiphysics. Выполнен сопоставительный анализ результатов определения потерь на вихревые токи в постоянных магнитах высокооборотного синхронного генератора на основе применения разработанной методики и специализированного программного обеспечения COMSOL Multiphysics.*

**Ключевые слова:** высокоскоростные машины, синхронные машины с постоянными магнитами, магнитные потери, синхронный генератор, вихревые токи.

## 1. Состояние вопроса

Применение, разработка и исследование современных синхронных машин для нефтегазовой отрасли в условиях Крайнего Севера, а также для привода насосных, компрессорных и газотурбинных установок является приоритетной задачей. С каждым годом объем добываемого сырья растет, увеличиваются мощности скважин, а вместе с ними и мощности приводных механизмов и потребителей. В связи с этим целесообразно конструирование новых более мощных и надежных синхронных машин, а именно генераторов с энергоэффективными показателями и оптимальными массогабаритными характеристиками. В настоящее время одним из перспективных направлений является исследование синхронных машин большой мощности с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ).

В связи с удаленностью нефтегазовых месторождений от автономных электростанций появляется тенденция развития синхронных турбогенераторов (СТГ) с приводным механизмом от дизельной турбины или газотурбинной установки. С увеличением мощности потребителей необходимо создание экономически эффективных и надежных СТГ. Одним из способов повышения мощности СТГ является увеличение частоты вращения: тем самым существенно уменьшаются габаритные размеры, а с учетом применения ПМ вместо обмотки возбуждения, эксплуатация высокоскоростных машин упрощается.

Вследствие улучшения электромагнитных свойств магнитных материалов, а также их относительно небольшой стоимости, неодимовые магниты NdFeB (неодим – железо – бор) часто используются в микромашинных и в синхронных машинах мощностью до 100 кВт и выше [1, 2]. Характеристики некоторых образцов ПМ, имеющие достаточно высокие энергетические показатели, могут достигать величины остаточной магнитной индукции до 1,5 Тл.

Увеличение мощности синхронной машины, а также частоты вращения ротора и, следовательно, частоты перемагничивания приводит к повышению потерь, в том числе и потерь на вихревые токи в ПМ. Точность расчета потерь в значительной степени влияет на определение коэффициента полезного действия (КПД) и нагрев частей машины. Увеличение теплового воздействия в локальных областях ПМ может привести к снижению их магнитных свойств, и, следовательно, уменьшению потока возбуждения в СТГ, что является важным направлением исследований.

## 2. Постановка задачи

Исследование поверхностного эффекта магнитных потерь в проводящих средах является актуальной задачей в электротехнике. На сегодняшний день существует множество методик определения потерь в ферромагнитных материалах, в том числе и ПМ, свидетельством чего является значительное количество научных публикаций в отечественной и зарубежной литературе [3 – 6].

В основном расчет потерь на вихревые токи в магнитах проводится на основе решения уравнений Максвелла, уравнений распространения электромагнитной волны внутри проводящей среды при определенных условиях и допущениях, где основные потери возникают из-за высших гармоник магнитного поля, в том числе из-за зубцовых гармоник [7 – 9]. Рассмотренные методики по определению потерь имеют относительно большую погрешность для синхронных машин большой мощности свыше 1 МВт и частотой вращения более 6000 об/мин, потери на вихревые токи которых могут достигать сотни киловатт. Расчет потерь, предлагаемый в работах [10 – 12], является трудоемким и зачастую предполагает разложение поля в ряд Фурье, что является существенным допущением и вносит дополнительную погрешность.

Более точное определение потерь в магнитах актуально при проектировании, создании и эксплуатации высокоскоростных синхронных турбогенераторов с постоянными магнитами (ВСГПМ). В данной статье предлагается решение задачи определения потерь на вихревые токи в ПМ на основе результатов расчета распространения электромагнитного поля внутри массива ферромагнитного материала [13]. В предлагаемой методике в качестве граничных условий задается распределение магнитной индукции на поверхности постоянного магнита в воздушном зазоре, которое определяется на основе решения задачи распределения поля в СТГ.

Исследование потерь на вихревые токи проводится для высокоскоростного синхронного генератора с возбуждением от ПМ, поперечное сечение показано на рис. 1. Якорь выполняется с открытыми прямоугольными пазами, ротор – с закрытыми пазами, внутрь которых вставлены радиально намагниченные ПМ. Открытый паз был выбран из условия механической прочности магнитопровода машины и обеспечения достаточно высоких энергетических показателей [14].

Основные параметры спроектированного ВСГПМ на основании применения методик [1 – 3] представлены в табл. 1.

Для возбуждения выбраны постоянные магниты NeFeB N50NHU [15]. Основные характеристики магнита представлены в табл. 2.

### 3. Методика расчета потерь на вихревые токи

Исследование потерь на вихревые токи проводится на основе решения задачи проникновения электромагнитной волны вглубь материала ПМ. В качестве граничных условий принимается изменение напряженности магнитного поля на поверхности ПМ в функции времени  $H(t)$ .

Из системы уравнений Максвелла [16] можно получить преобразованную систему уравнений для магнитного поля, учитывающую нелинейную магнитную характеристику и гистерезис материала. Произведя преобразования системы уравнений, получим:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} H = J; \\ \operatorname{div} B = 0; \\ \operatorname{rot} E = -\frac{dB}{dt}; \\ J = \gamma E, \end{cases} \quad (1)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля;  $E$  – напряженность электрического поля;  $J$  – плотность

токов;  $B$  – магнитная индукция;  $\gamma$  – электрическая проводимость.

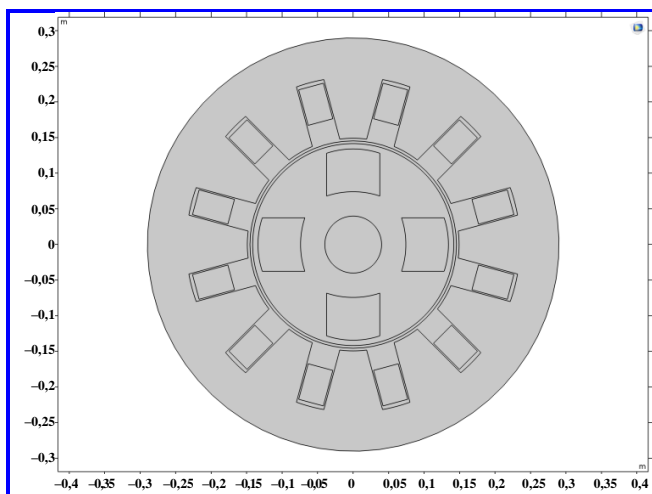


Рис. 1. Расчетная область высокоскоростных синхронных турбогенераторов с постоянными магнитами

Таблица 1

#### Параметры высокоскоростных синхронных турбогенераторов с постоянными магнитами

Параметры	ВСГПМ
Полная мощность, МВА	4,5
Частота вращения, об/мин	12000
Число пар полюсов	2
Число фаз	3
Номинальное напряжение, В	660
Номинальный ток, А	3683
Частота тока, Гц	400
Внутренний диаметр статора, мм	300
Магнитная индукция воздушного зазора, Тл	0,55
Длина активной части машины, мм	850

Таблица 2

#### Параметры магнитов

Параметры	N52H
Остаточная магнитная индукция, Тл	1,4 – 1,44
Коэрцитивная сила по намагниченности, кА/м	≥1035
Коэрцитивная сила по индукции, кА/м	≥1273
Максимальная рабочая температура, град.	180
Электрическая проводимость, МСм/м	0,7

Мгновенные значения относительно напряженностей магнитного поля в ПМ описываются в дифференциальной форме:

$$\begin{cases} -\frac{\partial H}{\partial z} = \gamma E; \\ -\frac{\partial E}{\partial z} = \mu_d \frac{\partial H}{\partial t}; \\ \mu = \frac{B}{H}. \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mu_d$  – динамическая магнитная проницаемость постоянного магнита.

Динамическая магнитная проницаемость – характеристика ферромагнетиков, описываемая дифференциальным уравнением:

$$\mu_d = \frac{\partial B(H)}{\partial H}.$$

Преобразованная система уравнений (2) относительно напряженности магнитного поля  $H$ , при условии заданного закона  $H(t)$ , имеет вид:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \gamma \mu_d \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (3)$$

Мощность потерь на вихревые токи определяется на основе результатов решения полевой задачи и расчета электрического поля  $E$  по глубине проникновения  $h$  электромагнитной волны в ПМ с учетом площади поверхности магнита  $S$ :

$$P = E^2 \gamma h S. \quad (4)$$

Решение нелинейного уравнения (3) осуществляется методом конечных разностей [17, 18]. Дифференциальное уравнение заменяется системой алгебраических уравнений. Конечно-разностная аппроксимация выполняется по неявной схеме для более устойчивого решения при отношении шага по высоте магнита  $\Delta z$  и шага по времени  $\Delta t$ . Конечно-разностная аппроксимация уравнения (3) по неявной схеме с пространственными и временными шагами имеет вид:

$$\frac{H_i^{j+1} - H_i^j}{\Delta t} = \frac{H_{i+1}^{j+1} - 2H_i^{j+1} + H_{i-1}^{j+1}}{\mu_{di} \gamma \Delta z^2}. \quad (5)$$

Преобразовав уравнение (5), получим:

$$H_{i-1}^{j+1} - \left( \frac{\mu_{di} \gamma \Delta z^2}{\Delta t} + 2 \right) H_i^{j+1} + H_{i+1}^{j+1} + \frac{\mu_{di} \gamma \Delta z^2}{\Delta t} H_i^j = 0, \quad (6)$$

где  $t_j = j\Delta t$ , ( $j = 0, 1, 2, \dots, m$ ) – время прохождения волны;  $\Delta t$  – шаг сетки по времени;  $j$  – число итераций по времени;  $h_i = i\Delta z$ , ( $i = n, n-1, \dots, 1$ ) – высота магнита или глубина проникновения электромагнитной волны;  $\Delta z$  – шаг по высоте магнита;  $i$  – число итераций по высоте магнита;  $n = h/\Delta z$  – число слоев, на которое разбивается постоянным магнит по высоте;  $m = t_j/\Delta t$  – число слоев по времени.

Ошибку устойчивости для неявной схемы принимаем:

$$\varepsilon = \Delta t + \Delta h^2 \approx 0,0001. \quad (7)$$

Примем допущение, что поле распространяется равномерно по всей поверхности магнита со стороны воздушного зазора. Начальные и краевые условия задаются значениями напряженности магнитного поля на поверхности ПМ:

$$H(t, z)_{t=0} = H_0; \quad H(t, z)_{z=0} = H(t); \quad H(t, z)_{z=h} = 0. \quad (8)$$

Уравнения (6) – (7) решаются методом прогонки [19, 20]. Введем линейные коэффициенты для системы линейных уравнений:

$$A = 1; \quad B = \frac{\mu_{di} \gamma \Delta z^2}{\Delta t} + 2; \quad C = 1; \quad D = \mu \gamma \Delta z^2. \quad (9)$$

Ввиду линейности и жесткости рабочей зоны магнитной характеристики ПМ относительно  $H(t)$  динамическая магнитная проницаемость  $\mu_{di} = \mu \approx \text{const}$ .

Решение системы уравнений (6) по методу прогонки с учетом линейных коэффициентов (8) для шага по времени  $j + 1$  находится:

$$H_i = \alpha_i H_{i+1} + \beta_i; \quad (10)$$

$$H_{i-1} = \alpha_{i-1} H_i + \beta_{i-1}, \quad (11)$$

где  $\alpha_i, \beta_i$  – прогоночные коэффициенты.

Прогоночные коэффициенты для каждого шага находятся из преобразования уравнения (6), учитывая распространение электромагнитной волны с поверхности вглубь ПМ и равны:

$$\alpha_i = \frac{C}{B - A\alpha_{i-1}}; \quad (12)$$

$$\beta_i = \frac{D + A\beta_{i-1}}{B - A\alpha_{i-1}}. \quad (13)$$

Начальные значения прогоночных коэффициентов в соответствии с начальными и граничными условиями примем равными  $\alpha_N = 0$  и  $\beta_N = H(t)$ .

Используя результаты решения уравнения (6), можно найти напряженность электрического поля в каждом слое сетки:

$$E_i = \frac{(H_i - H_{i-1})}{\gamma \Delta z}. \quad (14)$$

Представленная методика позволяет определить потери в локальных областях магнита по ширине и высоте. Таким образом, можно анализировать потери на вихревые токи, а соответственно, и нагрев этих областей, что позволяет существенно повысить точность расчетов при проектировании мощных высокоскоростных синхронных машин с магнитоэлектрическим возбуждением.

Потери на вихревые токи в каждом слое магнита по высоте и в локальных областях разбиения по ширине:

$$P_i = E_i^2 \gamma S \Delta z, \quad (15)$$

где  $S = a_k l$  – площадь поверхности локальной области ПМ с шириной  $a_k$  и длиной  $l$ .

Тогда суммарные потери на вихревые токи в ПМ можно определить:

$$P = \sum E_i^2 \gamma S \Delta z. \quad (16)$$

Для более точных результатов определения потерь с использованием данной методики необходимо соответствующим образом задать граничные условия. Для этого предлагается использовать распределение магнитного поля на поверхности магнита в виде зависимости напряженности поля от времени. Решение полевой задачи для определения граничных условий на поверхности магнита возможно с применением программ численного расчета поля. Наиболее распространено использование программ: FEMM, COMSOL Multiphysics, ANSYS.

Проведем определение магнитных потерь в ПМ для режима холостого хода (ХХ) синхронного генератора. На основе решений задач расчета распределения поля получим напряженность магнитного поля в заданных точках на поверхности ПМ в функции времени  $H(t)$  (рис. 2) при двухмерном моделировании. Такой характер магнитной волны обусловлен зубцами статора и проявляется как пульсирующее магнитное поле. Таким образом, можно разбивать магнит на несколько участков

(рис. 3) для определения характеристики поля в каждой определенной точке магнита и определения локальных потерь в выделенных областях.

Следует отметить, что характер изменения магнитного поля на поверхности ПМ не является синусоидальным и определяется конструктивными особенностями каждой машины на этапе проектных расчетов. Поэтому применение упрощенных математических моделей может привести к значительным возрастаниям погрешностей на этапе определения конструкции ВСГПМ.

Для определения значений граничных условий необходимо вычислить амплитудные значения для каждой расчетной точки графика. Так как зубцовые гармоники магнитного поля имеют периодический характер, достаточно определить значение поля за один период прохождения индукции зубца:

$$T = \frac{2}{fpZ}, \quad (17)$$

где  $Z$  – число зубцов.

Граничные условия можно представить из графика напряженности магнитного поля (рис. 2)  $H(t)$  с одинаковым шагом по времени  $\Delta t$  за период  $T$ . Для каждого значения  $H$  в точке времени  $t_k$  методом прогонки производится расчет значения потерь на вихревые токи  $P_k$ . Суммарные потери на вихревые токи находятся как среднеквадратичное значение мощности:

$$P = \sqrt{\frac{\sum P_j^2 t_j}{T}}. \quad (18)$$

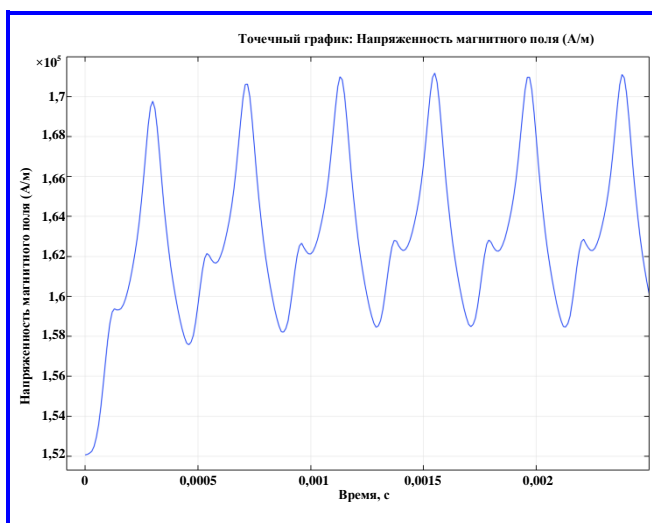


Рис. 2. Распределение напряженности магнитного поля на поверхности в центральной части постоянного магнита

Найдя значения в каждой локальной области магнита и просуммировав, можно определить потери на вихревые токи во всем объеме магнита.

При исследовании потерь в переходном режиме работы необходимо провести определение магнитного поля в переходном процессе и затем выполнить расчет потерь, используя полученный закон в качестве граничных условий.

#### 4. Результаты расчета потерь на вихревые токи в постоянных магнитах методом конечных разностей

Начальные и краевые условия магнитного поля на поверхности магнита определялись для режима ХХ. Для более точного распределения напряженности магнитного поля на поверхности магнит разбивался на 8 участков (рис. 3), и для каждого участка проводился расчет граничных условий  $H(t)$  относительно точки, расположенной в центре каждого отрезка расчетной области (рис. 4) в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Расчет поля проводился с шагом по времени равным 0,00001 с.

Как видно из картины распределения магнитных полей (рис. 4), при расчете в COMSOL Multiphysics на каждом отрезке поверхности магнита происходит проявление зубцовых гармоник, которые индуцируют электродвижущие силы, создающие вихревые токи в постоянном магните.

Вычисление потерь на вихревые токи в ПМ с помощью полученной методики расчета для ВГСПМ проводились в программе Microsoft Excel. Начальные условия прогоночных коэффициентов на поверхности магнита со стороны статора задавались относительно значения напряженности магнитного поля  $H(t)$  на каждом участке магнита. Начальные прогоночные коэффициенты, соответственно,  $\alpha_N = 0$  и  $\beta_N = H(t)$ . Граничные условия задавались только на поверхности магнита со стороны воздушного зазора. Шаг разбиения магнита по высоте  $n$  и по времени  $t$  был принят 50 и 25 соответственно. Точность определения потерь с помощью описанной расчетной методики зависит от числа участков, на которые разбивается ПМ по его радиальной ширине. Соответственно, чем больше количество участков, тем выше точность.

Для каждой итерации по времени определялись прогоночные коэффициенты, проводился расчет распространения электромагнитного поля  $H_i$  и  $E_i$  вглубь постоянного магнита для каждого слоя  $i$  по его высоте  $h$ , а также определялись потери в каждом слое.

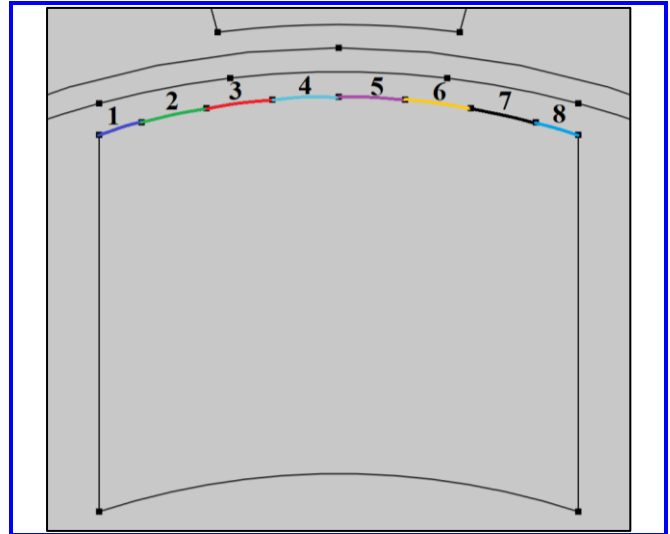


Рис. 3. Распределение потерь на вихревые токи в постоянном магните, а также в стали якоря и ротора

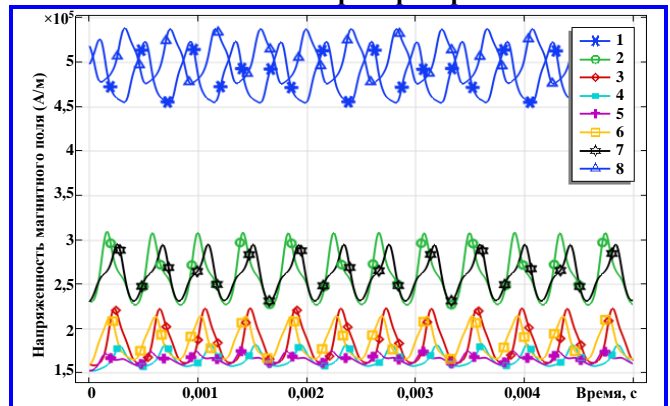


Рис. 4. Распределение напряженности магнитного поля на выделенных участках постоянного магнита

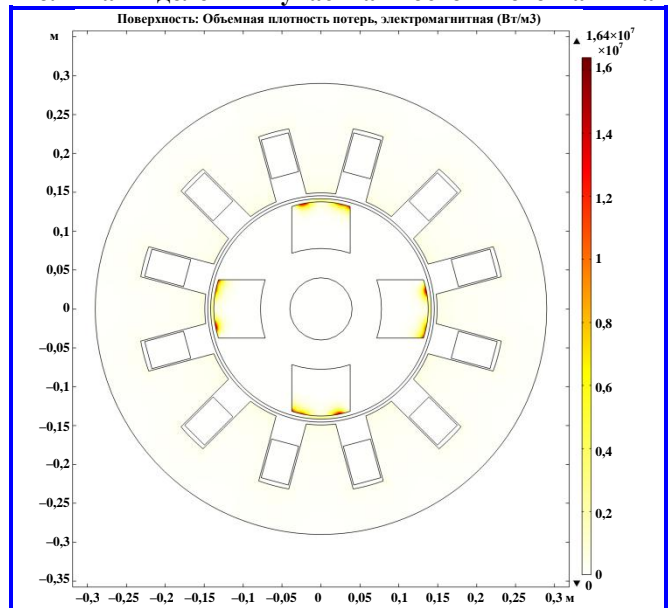


Рис. 5. Распределение потерь на вихревые токи в постоянных магнитах

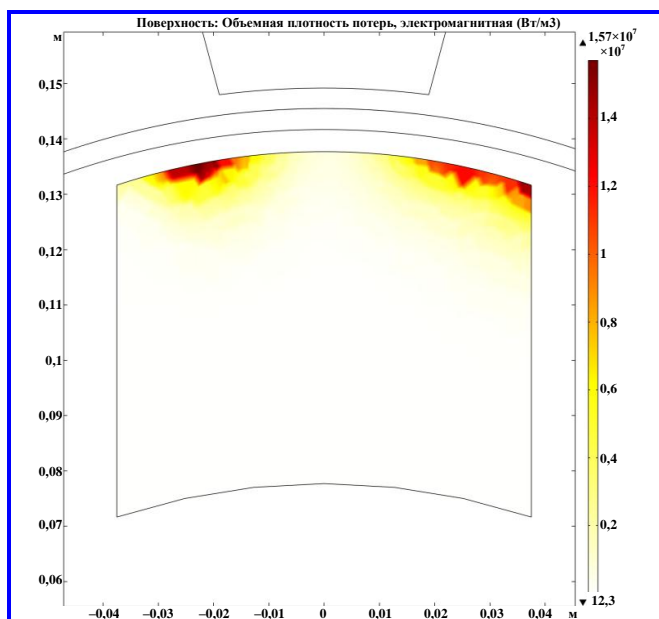


Рис. 6. Распределение потерь на вихревые токи в постоянном магните при расчете потерь в COMSOL Multiphysics

Таблица 3

Суммарные потери на вихревые токи в одном постоянном магните

Исследование потерь	Область магнита	Потери на вихревые токи, Вт
Расчет на основе метода конечных разностей	1	186,7
	2	667,3
	3	465,9
	4	96,1
	5	60,7
	6	362,2
	7	496,8
	8	161
	Во всем объеме	2495,7
Расчет в COMSOL Multiphysics	Во всем объеме	2608,6

Таким образом, был произведен расчет потерь на вихревые токи для каждого значения напряженности магнитного поля относительно шага по времени и определены потери на вихревые токи для каждого участка методом прогонки.

Для сравнительного анализа полученных результатов на основе разработанной методики определения потерь было проведено двухмерное моделирование физических процессов ВГСПМ в программе COMSOL Multyphysics. Данная программа хорошо зарекомендовала себя в научной и технической сферах двух- и трехмерного моделирования физических процессов [21]. Программа COMSOL Multiphysics также позволяет получить распределение потерь в объеме машины (рис. 5).

Разработанный метод позволяет анализировать и определять физику процесса возникновения вихревых токов в локальных областях магнита, которые в наибольшей степени подвергаются нагреву за счет протекания вихревых токов.

На рис. 6 показано рассчитанное распределение потерь в магните, полученное на основе применения COMSOL Multiphysics.

Результаты расчетов магнитных потерь на вихревые токи в ПМ, полученные с использованием разработанной методики и с помощью двухмерного моделирования в COMSOL Multiphysics представлены в табл. 3. Различие рассчитанных значений потерь на вихревые токи составляет менее 0,1%, что позволяет сделать вывод о достаточно высокой точности моделирования физических процессов в ПМ ВГСПМ, полученных с использованием разработанной методики. Значительные потери выделяются на крайних участках ПМ и составляют более 92% от суммарных потерь в объеме магнита.

## 5. Выводы

Разработана уточненная методика определения потерь на вихревые токи в ПМ ВГСПМ в установившихся и переходных режимах работы.

Разработанная методика расчета потерь на вихревые токи позволяет определять потери и анализировать физику процессов образования вихревых токов в ПМ с учетом распределения электромагнитного поля в объеме ПМ с учетом нелинейности магнитных характеристик и реального характера перемагничивания материала ПМ.

Применение разработанной методики достаточно эффективно при использовании на этапе выполнения поисковых расчетов и не требует больших вычислительных мощностей, как например применение программного обеспечения COMSOL Multiphysics.

Разработанная методика может применяться с целью увеличения точности проектирования новых мощных высокоскоростных синхронных машин с магнитным возбуждением, для расчетов и анализа рабочих параметров и характеристик ВГСПМ с учетом вихревых токов в ПМ, исследования конструктивных особенностей магнитной системы и систем охлаждения, а также обоснования применения магнитов с различными свойствами.

## Литература

1. Ледовский А. Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А. Н. Ледовский. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.
2. Лифанов В. А. Расчет электрических машин малой мощности с возбуждением от ПМ : учебное пособие /

- В. А. Лифанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 164 с.
3. Балагуров В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока : Учеб. пособие для студентов вузов / В. А. Балагуров. – Москва : Высшая школа, 1982. – 272 с.
4. Calculation of eddy-current losses in permanent magnets of synchronous machines / Deak C., Petrovic L., Binder A. [et al.] // In Proceedings of the 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. – Ischia, Italy, 11 – 13 June 2008. – Vol. 30. – P. 26 – 31.
5. Harmonic Loss Calculation in Rotor Surface Permanent Magnets / Pyrhonen J., Jussila H., Alexandrova Y. [et al.] // New Analytic Approach. IEEE Trans. Magn. – 2012. – Vol. 48. – P. 2358 – 2366.
6. Rotor Loss Analysis of Interior Permanent Magnet Motors Using Combination of 2D and 3D Finite Element Method / Yamazaki K., Kanou Y. // IEEE Trans. Magn. – 2009. – Vol. 45. – P. 1772 – 1775.
7. Analytical Model of Permeance Variation Losses in Permanent Magnets of the Multipole Synchronous Machine / Gotovac G., Lampic G., Miljavec D. // IEEE Trans. Magn. – 2013. – Vol. 49. – P. 921 – 928.
8. 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.
9. A survey of state-of-the-art methods to compute rotor eddy-current losses in synchronous permanent magnet machines / A. Tessarolo // In Proceedings of the 2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis. – Nottingham, UK, 20 – 21 April 2017. – P. 12 – 19.
10. Reduction of Eddy-Current Losses in Fractional-Slot Concentrated-Winding Synchronous PM Machines / G. Choi, T. M. Jahns // IEEE Trans. On Magn. – 2016. – Vol. 52. – № 1. – DOI : 10.1109/TMAG.2016.2517144
11. Comparison between models for eddy-current loss calculations in rotor surface-mounted permanent magnets / J. Alexandrova, H. Jussila, J. Nerg [et al.] // In Proceedings of the 19th International Conference on Electrical Machines. – Rome, Italy, 6 – 8 September 2010. – DOI : 10.1109/ICELMACH.2010.5608247.
12. Analytical prediction of rotor eddy-current loss due to stator slotting in PM machines / D. A. Wills, M. J. Kamper // In Proceedings of the 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta. – GA, USA, 12 – 16 September 2010. – P. 992 – 995.
13. Кирякин А. А. Разработка уточненного метода расчета распределения потерь в магнитопроводах машин переменного тока : специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алексей Алексеевич Кирякин. – Москва, 1986. – 242 с.
14. Извеков В. И. Проектирование турбогенераторов / В. И. Извеков, Н. А. Серихин, А. И. Абрамов. – Изд-во МЭИ, 2005. – 439 с.
15. Магниты Неодим-Железо-Бор (NdFeB), неодимовые магниты // Научно-производственная компания «Магниты и системы». Производство постоянных магнитов : [сайт]. – 2005 – 2021. – URL : <https://magnet-prof.ru/index.php/magnity-ndfeb.html>.
16. Копылов И. П. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / под ред. И. П. Копылова. – 4-е изд., испр. и доп. – Москва : Высшая школа, 2005. – 767 с.
17. Самарский А. А. Численные методы математической физики / А. А. Самарский, А. В. Гулин – 2-е изд. – Москва : Научный мир, 2003. – 316 с.
18. Годунов С. К. Разностные схемы: введение в теорию : Учебное пособие / С. К. Годунов, В. С. Рябенкий. – Москва : Наука, 1977. – 440 с.
19. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – Москва : Наука, 1978. – 512 с.
20. Пакулина А. Н. Практикум по методам вычислений. Часть 2 / А. Н. Пакулина. – Санкт-Петербург : СПбГУ, 2019. – 113 с.
21. Учет потерь на вихревые токи при расчете электродвигателя с постоянными магнитами / В. Cunningham // COMSOL. Блог COMSOL : [сайт]. – 2017. – URL : <https://www.comsol.ru/blogs/capturing-eddy-current-losses-in-a-permanent-magnet-motor-design/>.

Поступила в редакцию 08.04.2022

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

*Евгений Владимирович Щетинин, аспирант, т. 8 (495) 362-71-83, e-mail: evgenschetinin@yandex.ru. (НИУ МЭИ).*

## DETERMINATION OF MAGNETIC LOSSES IN THE PERMANENT MANETS OF A SYNCHRONOUS MACHINE BASED ON THE CALCULATION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD DISTRIBUTION IN THE ROTOR POLES

A. A. Kiryakin, E. V. Shchetinin

*An improved method for calculating magnetic losses in permanent magnets based on solutions to the system of Maxwell equations has been developed. The distribution of the field inside a permanent magnet is studied and the losses in permanent magnets are determined*

by solving the system of Maxwell equations by the finite difference method. The sweep method is used to solve algebraic finite-difference equations. A numerical calculation of losses in permanent magnets was carried out using the COMSOL Multiphysics program. A comparative analysis of the results of determining the eddy current losses in permanent magnets of a high-speed synchronous generator based on the application of the developed methodology and specialized COMSOL Multiphysics software is performed.

**Key words:** high-speed machines, synchronous machines with permanent magnets, magnetic losses, synchronous generator, eddy currents.

### References

1. Ledovsky A. N. Electric machines with high-coercive permanent magnets / A. N. Ledovsky. – Moscow: Energoatomizdat, 1985. – 168 p.
2. Lifanov V. A. Calculation of electrical machines of low power with excitation from PM: tutorial / V. A. Lifanov. – 2nd ed., revised, and additional - Chelyabinsk: Publishing Center of SUSU, 2010. – 164 p.
3. Balagurov V. A. Design of special electrical machines for alternating current: Proc. allowance for university students / V. A. Balagurov. – Moscow: Higher School, 1982. – 272 p.
4. Calculation of eddy-current losses in permanent magnets of synchronous machines / Deak C., Petrovic L., Binder A. [et al.] // In Proceedings of the 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion . – Ischia, Italy, 11 – 13 June 2008. – Vol. 30. – P. 26 – 31.
5. Harmonic Loss Calculation in Rotor Surface Permanent Magnets / Pyrhonen J., Jussila H., Alexandrova Y. [et al.] // New Analytic Approach. IEEE Trans. Magn. – 2012. – Vol. 48. – P. 2358 – 2366.
6. Rotor Loss Analysis of Interior Permanent Magnet Motors Using Combination of 2D and 3D Finite Element Method / Yamazaki K., Kanou Y. // IEEE Trans. Magn. – 2009. – Vol. 45. – P. 1772 – 1775.
7. Analytical Model of Permeance Variation Losses in Permanent Magnets of the Multipole Synchronous Machine / Gotovac G., Lampic G., Miljavec D. // IEEE Trans. Magn. – 2013. – Vol. 49. – P. 921 – 928.
8. 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.
9. A survey of state-of-the-art methods to compute rotor eddy-current losses in synchronous permanent magnet machines / A. Tessarolo // In Proceedings of the 2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis. – Nottingham, UK, 20 – 21 April 2017. – P. 12 – 19.
10. Reduction of Eddy-Current Losses in Fractional-Slot Concentrated-Winding Synchronous PM Machines / G. Choi, T. M. Jahns // IEEE Trans. On Magn. – 2016. – Vol. 52. – No. 1. – DOI: 10.1109/TMAG.2016.2517144.
11. Comparison between models for eddy-current loss calculations in rotor surface-mounted permanent magnets / J. Alexandrova, H. Jussila, J. Nerg [et al.] // In Proceedings of the 19th International Conference on Electrical Machines. – Rome, Italy, 6 – 8 September 2010. – DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5608247.
12. Analytical prediction of rotor eddy-current loss due to stator slotting in PM machines / D. A. Wills, M. J. Kamper // In Proceedings of the 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta. – GA, USA, 12 – 16 September 2010. – P. 992 – 995.
13. Kiryakin A. A. Development of a refined method for calculating the distribution of losses in the magnetic circuits of AC machines: specialty 05.09.01 "Electro-mechanics and electrical apparatus": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Aleksey Alekseevich Kiryakin. – Moscow, 1986. – 242 p.
14. Izvekov V. I. Design of turbogenerators / V. I. Izvekov, N. A. Serikhin, A. I. Abramov. – MPEI Publishing House, 2005. – 439 p.
15. Magnets Neodymium-Iron-Boron (NdFeB), neodymium magnets // Research and Production Company «Magnets and Systems». Production of permanent magnets: [website]. – 2005 – 2021. – URL: <https://magnet-prof.ru/index.php/magnity-ndfeb.html> (date of access: 01/15/2022).
16. Kopylov I. P. Design of electrical machines: a textbook for universities / ed. I. P. Kopylova. – 4th ed., Rev. and additional. – Moscow: Higher School, 2005. – 767 p.
17. Samarsky A. A. Numerical methods of mathematical physics / A. A. Samarsky, A. V. Gulin – 2nd ed. – Moscow: Scientific world, 2003. – 316 p.
18. Godunov S. K. Difference schemes: an introduction to theory : Textbook / S. K. Godunov, V. C. Ryaben-cue. – Moscow: Nauka, 1977. – 440 p.
19. Kalitkin N. N. Numerical methods / N. N. Kalitkin. – Moscow: Nauka, 1978. – 512 p.
20. A. N. Pakulina, Practicum on Computational Methods. Part 2 / A. N. Pakulina. - St. Petersburg: St. Petersburg State University, 2019. – 113 p.
21. Accounting for eddy current losses in the calculation of an electric motor with permanent magnets / B. Cunningham // COMSOL. COMSOL Blog: [website]. – 2017. – URL : <https://www.comsol.ru/blogs/capturing-eddy-current-losses-in-a-permanent-magnet-motor-design/> (date of access: 10.12.2021).

*Aleksey Alekseevich Kiryakin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, tel.: 8 (495) 365-26-69, e-mail: kiriakinaa@mcc.vniiem.ru. (JC «VNIEM Corporation»).*

*Evgeniy Vladimirovich Shchetinin, post-graduate student, tel.: 8 (495) 362-71-83, e-mail: evgenschetinin@yandex.ru. (Moscow Power Engineering Institute (NRU MPEI)).*