

А.Е.Антонов, докт.техн.наук, **И.С.Петухов**, канд.техн.наук (Институт электродинамики НАН Украины, Киев)

ПОТЕРИ НА ВИХРЕВЫЕ ТОКИ В ОБМОТКЕ БЕСПАЗОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Приведена методика расчета потерь на вихревые токи в проводниках круглого сечения, находящихся в магнитном потоке, изменяющемся во времени по гармоническому закону. Создана математическая модель механизма возникновения потерь, получено аналитическое выражение для их расчета.

Наведено методику розрахунку втрат на вихрові струми в провідниках круглого перерізу, які знаходяться в магнітному полі, що змінюється у часі за гармонічним законом. Створено математичну модель механізму виникнення втрат, отримано аналітичний вираз для їхнього розрахунку.

Введение. Беспазовые компоновки электромеханических преобразователей энергии магнито-электрического типа [1] отличаются отсутствием зубцово-пазовой зоны на статоре, характерной для традиционных электрических машин, и наличием возбужденного постоянными магнитами ротора. Обмотка в таком преобразователе располагается непосредственно в магнитном потоке, пронизывающем воздушный зазор. При этом магнитопровод и блок обмоток статора имеют простые формы (цилиндрические при радиальной ориентации потока или плоско-цилиндрические при аксиальной ориентации потока). Обмотка изготавливается отдельно от магнитопровода, благодаря чему достигается высокая технологичность отдельных узлов и устройства в целом. Коэффициент заполнения объема медью в беспазовых конструкциях также выше, так как отпадает необходимость в разделяющем изолирующем слое между поверхностью каждого паза и располагаемой в нем секцией обмотки. Кроме того, ввиду отсутствия зубцово-пазовой зоны в магнитопроводе расчет магнитной системы беспазовой электрической машины гораздо проще, чем в традиционном случае, когда необходимо учитывать сложный характер магнитного поля в зубцах. Применение беспазовых компонок в электромашиностроении стало целесообразным с появлением высококоэрцитивных интерметаллических композиций редкоземельных металлов на основе самария и особенно неодима (SmCo , NdFeB), которые способны обеспечить высокую плотность магнитного потока (до 1 Тл) в относительно больших воздушных зазорах. Применение таких материалов для возбуждения магнитного потока позволило создавать электрические машины, которые имеют наилучшие массогабаритные показатели на единицу полезной мощности среди прочих типов электромеханических преобразователей. Вместе с тем беспазовым компоновкам присущи некоторые особенности, которые необходимо учитывать, особенно при построении высокооборотных и относительно мощных электромеханических преобразователей энергии.

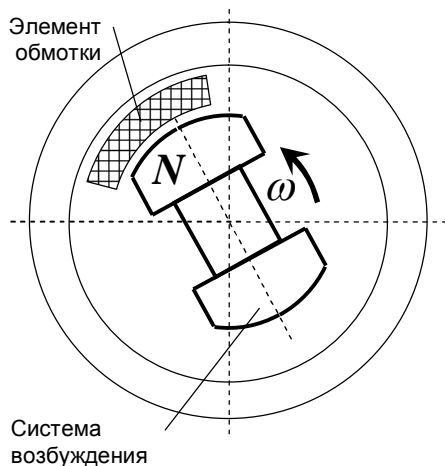


Рис. 1

Беспазовая электрическая машина с радиальной ориентацией оси потока возбуждения от постоянных магнитов, расположенных на роторе, схематически показана на рис. 1. В отличие от зубцово-пазовых структур, в которых витки обмотки пронизывает лишь незначительный поток рассеяния вращающегося ротора, в беспазовой машине магнитный поток пересекает непосредственно витки обмотки. Это означает, что потери на вихревые токи в материале обмотки беспазового статора могут быть намного выше, чем в зубцово-пазовой машине, если не будут приняты определенные меры. Известным способом снижения потерь на вихревые токи в материале провода является выполнение обмоточного провода заданного сечения несколькими параллельными одножильными проводниками, суммарное сечение которых соответствует заданному. Для вы-

бора оптимального количества параллельных проводников в таком многожильном проводе необходимо иметь достоверную методику расчета потерь на вихревые токи, учитывающую все параметры, от которых зависит величина этих потерь. К сожалению, методики расчета, приводимые различными авторами [3,4], противоречивы, а результаты расчета существенно различаются между собой, что и явилось побудительным мотивом для проведения авторами настоящего исследования.

Математическая модель. Как правило, обмотки беспазовых электрических машин выполняются медным проводом круглого сечения в эмалевой изоляции, которые формуются и компаундируются специальными электроизолирующими компаундами. Проводники в пределах объема обмотки располагаются, как правило, хаотично, за исключением особых случаев, когда намотка производится «виток к витку». Как следует из рис. 1, вращающееся магнитное поле магнита пронизывает каждый из проводников обмотки, расположенной в воздушном зазоре. Поскольку проводники внутри катушки достаточно плотно прилегают друг к другу и расположены хаотично, геометрия поперечного сечения достаточно сложна. И прежде чем решать поставленную задачу целесообразно установить степень взаимного влияния проводников и особенности электромагнитных процессов, происходящих внутри отдельно взятого проводника. Ограничимся рассмотрением электромагнитного поля в двухмерной постановке, когда определяющей поле функцией является векторный магнитный потенциал,

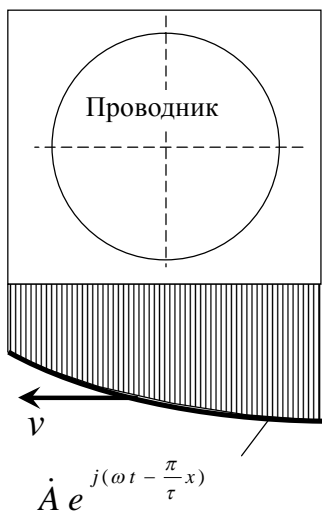


Рис. 2

имеющий одну составляющую $A=A_z$. Рассмотрим поперечное сечение уединенного разомкнутого проводника (рис. 2), расположенного в прямоугольной области, на нижней границе которой задана бегущая волна векторного магнитного потенциала, создаваемого постоянными магнитами системы возбуждения

$$\dot{A}(t, x) = \dot{A} e^{j(\omega t - \pi x/\tau)}, \quad (1)$$

где t – время, x – пространственная координата, ω – угловая частота изменения поля, τ – полюсное деление.

Ввиду хаотичного расположения остальных проводников, записать условия на других границах не представляется возможным. Поэтому необходимо либо решать задачу минимум на половине полюсного деления, если предположить, что структура проводников на каждом полюсном делении симметрична, либо далее упрощать задачу.

Предположим, что проводники расположены упорядоченно – в центрах квадратной решетки, причем сторона квадрата d больше диаметра провода на толщину изоляции, как показано на рис. 3. Вследствие симметрии такой структуры магнитный поток, направленный вдоль вертикальной оси, постоянен во всех горизонтальных сечениях рассматриваемой области. Для этой области можно сформулировать краевую задачу относительно векторного магнитного потенциала, который удовлетворяет уравнению

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \dot{A}) = 0, \quad (2)$$

где ∇ – оператор Гамильтона; μ – магнитная проницаемость среды.

Граничные условия и параметры сред указаны на рис. 3, причем разница значений векторного потенциала на правой и левой границах определяется из условия

$$\dot{B}_n = (\dot{A}_2 - \dot{A}_1)/d. \quad (3)$$

Ввиду того, что полный ток в поперечном сечении равен нулю, можно положить $\dot{A}_2 = -\dot{A}_1$. Тогда это будет означать замену бегущего магнитного поля переменным магнитным полем, пронизывающим проводник. Учитывая, что диаметр проводника гораздо меньше полюсного деления, такую замену можно считать допустимой. Решение краевой задачи для уравнения (2) в области, показанной на рис. 3 с приведен-

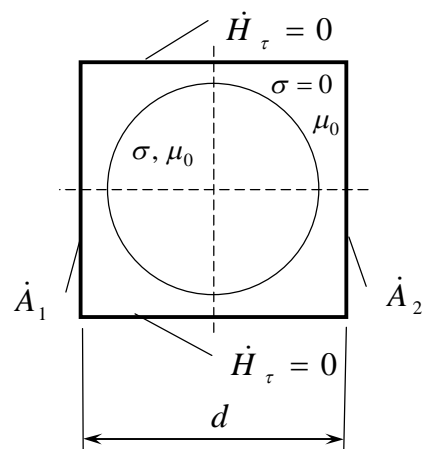


Рис. 3

ными там же краевыми условиями, проводилось с помощью пакета программ GE2D, разработанного в ИЭД НАН Украины [5].

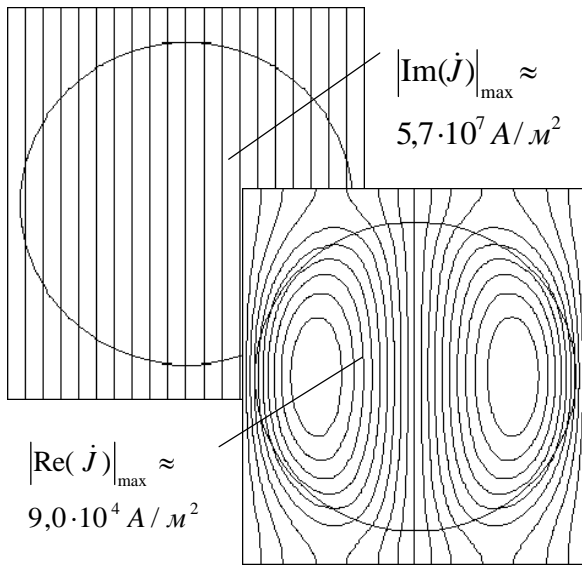


Рис. 4

На рис. 4 показаны изолинии полей действительной и мнимой составляющих векторного потенциала в расчетной области при диаметре медного проводника 0,28 мм и частоте поля 3200 Гц. Там же приведены максимальные значения соответственно мнимой и действительной частей плотности вихревого тока в проводнике. Картины полей и соответствующие им значения вихревого тока позволяют сделать вывод о слабом искажении поля возбуждения полем вихревых токов, иными словами, о слабо выраженном поверхностном эффекте и отсутствии взаимного влияния соседних проводников обмотки. Таким образом, можно считать, что векторный потенциал в горизонтальном сечении проводника изменяется линейно, о чем свидетельствует равномерность изолиний на приведенной картине электромагнитного поля на рис. 4 (слева сверху). Соответственно, плотность вихревого тока в горизонтальном сечении, перпендикулярном направлению магнитного потока, также должна изменяться линейно.

На основании изложенного примем следующие допущения:

- магнитное поле является однородным и магнитная индукция в пределах сечения проводника неизменна по величине и направлению;
- плотность вихревого тока в проводнике в сечении, перпендикулярном направлению магнитного потока, изменяется линейно;
- взаимное влияние проводников отсутствует.

Сделанные допущения позволяют рассчитать интегральное значение потерь в проводнике при синусоидальном изменении индукции во времени. Ввиду линейности задачи, несинусоидальное изменение индукции потребует суммирования результатов таких расчетов для каждой временной гармонике индукции. Рассмотрим сечение проводника и выделим в нем бесконечно тонкий слой вихревого тока dx , расположенный в плоскости направления вектора магнитной индукции B_m и отстоящий от вертикальной оси симметрии OY на расстояние x (рис. 5).

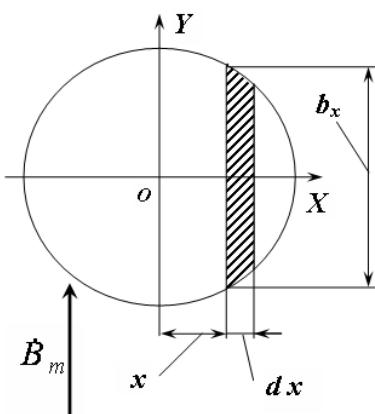


Рис. 5

этого слоя b_x (рис. 5),

Очевидно, что в левой и правой полуплоскостях существуют симметрично расположенные слои вихревого тока, в которых ток протекает в противоположных направлениях. Обозначим длину проводника l . Тогда магнитный поток Φ_m в интервале $[-x, x]$ определится из выражения

$$\Phi_m = 2 B_m x l . \quad (4)$$

Соответственно действующее значение ЭДС в слое dx будет

$$E = \sqrt{2} \omega B_m x l . \quad (5)$$

Определим активное сопротивление dr слоя проводника dx для прямого и встречного (расположенного симметрично относительно оси ординат) направлений вихревого тока, обозначив высоту

$$dr = 2 \rho l / b_x dx , \quad (6)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника.

В результате величина потерь dP_a от слоя вихревого тока определится из выражения

$$dP_a = E^2 b_x dx / (2 \rho l) . \quad (7)$$

Учитывая, что высота слоя вихревого тока b_x выражается через радиус проводника R в соответствии с выражением

$$b_x = 2 \sqrt{R^2 - x^2} , \quad (8)$$

можем записать интегральное выражение для потерь в проводнике

$$P = (2 \omega^2 B_m^2 l / \rho) \int_0^R x^2 \sqrt{R^2 - x^2} dx . \quad (9)$$

Хотя решение интеграла в (9) имеет приведенный ниже сложный вид [4]

$$\int_0^R x^2 \sqrt{R^2 - x^2} dx = \left\{ -\frac{x}{4} \sqrt{R^2 - x^2} + \frac{R^2}{8} \left[x \sqrt{R^2 - x^2} + R^2 \arcsin(x/R) \right] \right\} \Big|_0^R , \quad (10)$$

но при заданных пределах интегрирования ненулевой вклад вносит только последнее слагаемое, входящее в (10). В результате получаем выражение для определения потерь от вихревых токов в круглом проводнике, находящемся в однородном переменном синусоидальном магнитном поле, которое в терминах, принятых в теории электрических машин, имеет следующий вид:

$$P = \pi^3 m w a f^2 B_m^2 d_{np}^4 l_a / 16 \rho , \quad (11)$$

где m – число фаз обмотки, w – число витков в фазе, a – число параллельных ветвей (параллельных проводников в жгуте), f – частота переменного магнитного поля, d_{np} – диаметр провода, l_a – активная длина машины.

Оценка точности результатов. Для оценки точности формулы (11) результаты, полученные с ее помощью, сравнивались с численным расчетом методом конечных элементов (МКЭ). С помощью этого метода решалась краевая задача, сформулированная выше (уравнение (2), граничные условия, приведенные на рис. 3). Как уже упоминалось, для численного моделирования применялся пакет программ GE2D. Расчеты проводились в диапазоне частот 400...3200 Гц и диапазоне диаметров провода 0,08...0,8 мм. Указанный диапазон параметров охватывает подавляющее большинство типоразмеров машин с беспазовой конструкцией. Сходимость численного решения проверялась путем решения ряда задач на сгущающейся сетке. По найденному численным методом значению потерь определялась относительная погрешность полученной формулы δ в соответствии с выражением

$$\delta = (P - P_{МКЭ}) / P_{МКЭ} \cdot 100\% , \quad (12)$$

где $P_{МКЭ}$ – значение мощности, рассчитанное с помощью численного метода.

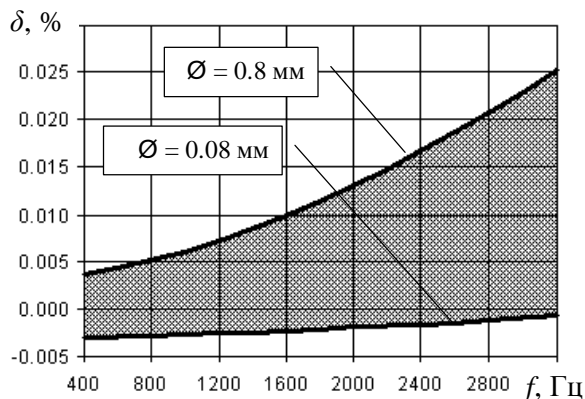


Рис. 6

Результаты расчета погрешности показаны на рис. 6. Область значений погрешности, определенной в приведенных выше диапазонах частоты и диаметра провода, обозначена на рисунке заштрихованной областью, нижней и верхней границей которой являются соответственно кривые, полученные для диаметров провода 0,08 и 0,8 мм. Для иных значений диаметров аналогичные кривые, как показывают расчеты, выглядят подобно.

Как видно, формула (11) дает при больших диаметрах завышенное значение потерь и заниженное значение – при малых диаметрах. Тем не менее, абсолютная величина погрешности свидетельству-

ет о высокой точности данной формулы в рассматриваемом диапазоне частот и диаметров проводника. Отметим, что значение погрешности не зависит от амплитуды магнитной индукции, что объясняется линейностью рассматриваемой задачи.

В случае необходимости можно оценить также погрешность, вызванную изменением удельного сопротивления проводника, используя выражения (11), (12) и график рис. 6, соответственно изменив отношение d_{np}^4 / ρ и приняв во внимание, что график на рис. 6 получен для значения $\rho = 0,2174 \cdot 10^{-7}$ Ом·м (удельное сопротивление меди при 75 °С).

Выводы. Полученная аналитическая зависимость (11) позволяет на стадии проектирования беспазовых электромеханических преобразователей энергии магнитоэлектрического типа с достаточной для практических целей точностью оценивать потери на вихревые токи в обмотках, выполненных круглым проводом. В результате становится возможным выбор оптимального числа элементарных проводников в многожильном проводе, которым выполняется намотка обмоток с целью минимизации потерь мощности с учетом конструктивных и технологических факторов.

Погрешность вычисления потерь в диапазоне диаметров провода 0,08...0,8 мм и частоте переменного магнитного поля до 3200 Гц не превышает 0,03 %.

В заключение заметим, что стремление снизить потери на вихревые токи в массиве меди за счет уменьшения сечения элементарных жил в многожильном проводе приводит к увеличению их числа, что, в свою очередь, может приводить к росту потерь на так называемые уравнивающие токи в элементарных короткозамкнутых контурах, образованных параллельными жилами. Чтобы избежать этого, многожильный провод должен быть свит для обеспечения равномерного перемешивания проводников и уменьшения площадей элементарных короткозамкнутых контуров.

1. Антонов А.Е., Киреев В.Г., Акинин К.П. Концепция построения беспазовых электрических машин магнитоэлектрического типа и электропривода на их основе // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – 2005. – №1(10). – С. 25–29.

2. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся Втузов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

3. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. – М.: Машиностроение, 1968. – 251 с.

4. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат. 1985. – С. 76–77.

5. Петухов И.С. Моделирование переменного электромагнитного поля в ферромагнитной проводящей среде методом конечных элементов // Техн. електродинаміка. – 2008. – №4. – С. 18–26.

Надійшла 04.02.2010