

ПОТЕРИ ОТ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ  
ТРЕХСТЕПЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

И.С.Петухов, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.  
e-mail: [igor\\_petu@mail.ru](mailto:igor_petu@mail.ru)

Обоснована необходимость определения потерь от вихревых токов, вызванных потоками рассеяния, в элементах конструкции трехступенной электрической машины. Разработан метод определения потерь в тонкой проводящей оболочке, пронизываемой потоком рассеяния. Оценена точность определения потерь от высших гармоник магнитного поля. Получены зависимости потерь от ориентации ротора в пространстве для материалов с различной электропроводностью. Библ. 2, рис. 3.

**Ключевые слова:** трехступенная электрическая машина, поток рассеяния, вихревые токи, потери.

Трехступенная электрическая машина (ТЭМ) содержит ротор, вращающийся вокруг своей оси, которая удерживается двумя взаимно перпендикулярными кардановыми подвесами. Поэтому ось вращения имеет возможность изменять свою ориентацию в двух взаимноперпендикулярных плоскостях, отклоняясь от нейтрального (нулевого) положения на угол  $\alpha$ , как показано на рис. 1. Классическим примером применения ТЭМ является гироскоп. Магнитопровод статора с обмотками условно изображен на этом рисунке штриховой окружностью в центре конструкции. Ось магнитопровода статора перемещается соосно с осью ротора. Отметим, что магнитопроводы статора и ротора подобны. Подвижная конструкция магнитопровода охвачена сферической оболочкой, которая усечена сверху и снизу (в области перемещения оси вращения).

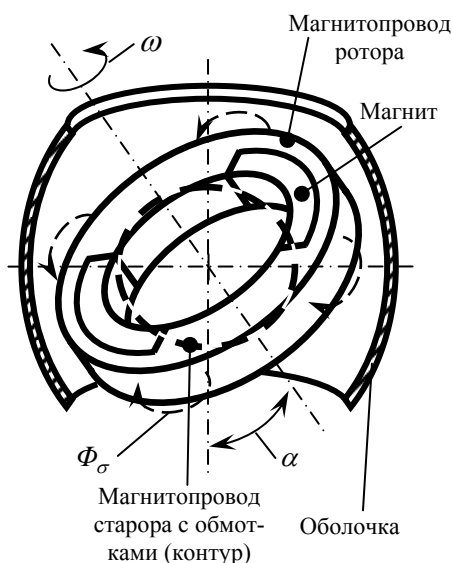


Рис. 1

При проектировании ТЭМ стремятся минимизировать массу магнитной системы с целью обеспечения быстродействия системы. Для этого уменьшают толщину ярма, что приводит к его насыщению и появлению ощутимых потоков рассеяния. Линии потоков рассеяния в области максимального насыщения ярма ротора схематически показаны на рис. 1 и обозначены  $\Phi_\sigma$ . Проникновение потоков рассеяния в оболочку приводит к возникновению в ней вихревых токов и потерь от них. Поскольку частота вращения ротора в гироскопе может быть очень высокой, потери также могут достигать существенных величин и приводить к значительным паразитным моментам, действующим на ротор [1]. С целью уменьшения этих потерь оболочка выполняется из низкопроводящего металла или сплава. Тем не менее, определение величины потерь и зависимости их от ориентации ротора и конструктивных параметров необходимо для внесения поправок в систему управления устройством. Эта задача сводится к расчету распределения вихревых токов в оболочке, которые возбуждаются в ней вращающимся магнитным полем рассеяния ротора.

Ввиду короткой активной (осевой) длины машины поле рассеяния нельзя упрощенно полагать двумерным. В конструкции магнитопровода и оболочки имеет место центральная симметрия, а также симметрия относительно плоскости, перпендикулярной оси

вращения и ортогональной ей плоскости, совпадающей с осью поля магнитов (см. рис. 1). При отличном от нуля угле наклона ротора сохраняется только периодичность. Соответственно, поле вихревых токов в оболочке также сохраняет периодичность и симметрию относительно экваториальной плоскости. Поэтому возможно рассчитывать трехмерное периодическое электромагнитное поле лишь в объеме над экваториальной плоскостью.

Магнитоэлектростатическое поле системы возбуждения целесообразно рассчитывать, решая уравнения относительно скалярного магнитного потенциала  $\varphi_m$ . Для трехмерного поля вихревых токов в тонкой оболочке имеется упрощенная модель в пакете COMSOL, однако в этой модели не предусмотрено задание распределенного источника поля в виде потока, пронизывающего оболочку. Решение же такой задачи относительно векторного потенциала весьма трудоемко и не всегда позволяет задать сетку требуемой густоты. Поэтому потребовалась разработка специальной математической модели.

Слабое влияние вихревых токов на поле рассеяния ротора позволяет расчленив задачу и рассчитывать упомянутые поля независимо друг от друга. Это слабое влияние объясняется достаточно большими воздушными промежутками на пути потоков рассеяния, низкой электропроводностью оболочки и высокой коэрцитивной силой постоянных магнитов системы возбуждения.

Источником вихревых токов в оболочке является ЭДС, возбуждаемая нормальной по отношению к плоскости оболочки составляющей магнитной индукции  $B_n$ . Это следует из второго уравнения Максвелла

$$\oint_l \vec{E} dl = - \frac{\partial}{\partial t} \int_s B_n ds, \quad (1)$$

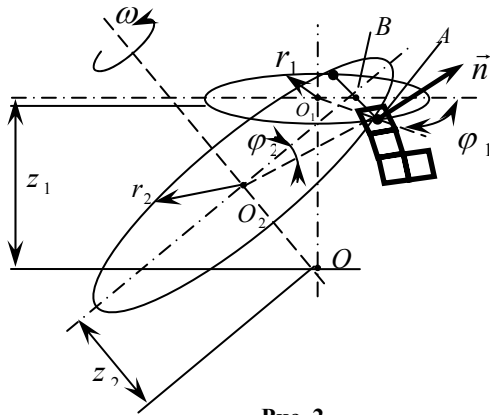


Рис. 2

ординат  $(r_2, \varphi_2, z_2)$  к временным гармоникам составляющих индукции поля в неподвижной системе координат  $(r_1, \varphi_1, z_1)$ . Распределение индукции поля  $\vec{B}(\varphi)$  на траекториях, проходящих через центры ячеек сетки (рис. 2) во вращающейся системе координат, определяется из решения трехмерной полевой задачи. Затем для определения поля в неподвижной системе координат в выражении для комплексной амплитуды  $k$ -ой гармоники следует просто заменить пространственную координату временной

$$\vec{B}_k e^{jk\varphi} \rightarrow \vec{B}_k e^{jk t}. \quad (2)$$

После этого определяется временная зависимость в интересующей точке, имеющей пространственный (а, следовательно, и временной) сдвиг по фазе  $\varphi_2$  (см. рис. 2), путем умножения на соответствующий комплекс  $e^{j\varphi_2}$ .

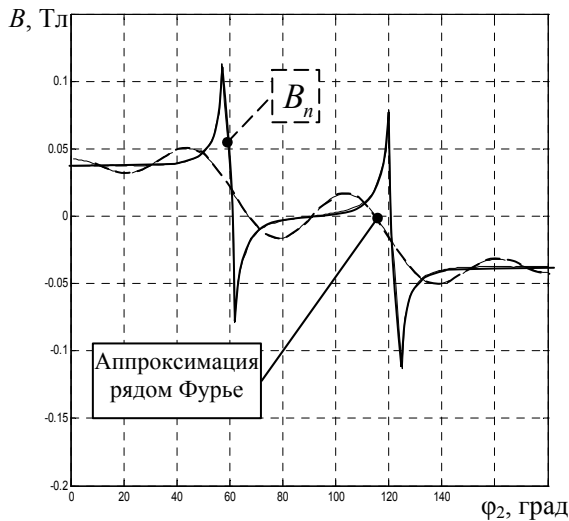


Рис. 3

достаточно большое число членов ряда Фурье.

Для каждой из временных гармоник магнитного потока, проходящего через ячейку сетки, решается задача распределения токов в электрической цепи, ветвями в которой являются активные сопротивления, соответствующие ребрам сетки (рис. 2). Результаты работы [2] позволяют оценить погрешность определения потерь таким методом. Эта точность определяется количеством ячеек сетки на периоде изменения поля и степенью поверхностного эффекта в оболочке. Например, в упомянутой работе показано, что погрешность вычисления потерь в 1% достигается при разбиении периода на 20 частей. То есть, для учета с такой точностью, например, одиннадцати гармоник поля требуется  $20 \cdot 11 = 220$  ячеек сетки на пространственном периоде. Принимая во внимание, что по второй координате сетка имеет близкий размер, общее число ячеек сетки составит около 40000. Такой размер матрицы контурных токов, которая имеет ленточную структуру, можно считать приемлемым.

Перечисленные процедуры производятся с каждой пространственной составляющей магнитной индукции. В результате для нее определяется временная зависимость нормальной составляющей в указанном узле сетки в виде тригонометрического полинома. На рис. 3 показан график нормальной составляющей индукции на полупериоде траектории, лежащей на плоскости симметрии магнитопровода. Там же штриховой линией показан результат аппроксимации этого графика отрезком ряда Фурье с учетом пяти гармоник, которых явно недостаточно для достижения удовлетворительной точности. Отметим, что всплески поля рассеяния наблюдаются в области краев магнитных полюсов (рис. 1). Причем имеет место два разнополярных всплеска – в области "выхода" и "входа" потока рассеяния на границе магнитопровода. Именно этим фактом объясняется наличие всплесков индукции в районе угла  $\varphi_2 = 60$  и  $120$  градусов. И в связи с этим необходимо учитывать в расчете

Вторым показателем точности решения является отношение глубины проникновения поля в оболочку к ее толщине [2]. Так, при частоте вращения ротора 24000 об/мин. глубина проникновения  $\Delta$  одиннадцатой гармоники поля в нихром, имеющий электропроводность  $0,7 \cdot 10^6$  (Ом·м)<sup>-1</sup>, составит

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \gamma \omega}} = \sqrt{\frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,7 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 24000 / 30 \cdot 11}} = 0,009 \text{ (м)}. \quad (3)$$

При толщине оболочки 0,5 мм ее относительная толщина (толщина по отношению к глубине проникновения поля) составит 0,055. Следовательно, получим погрешность вычисления потерь около 0,1%.

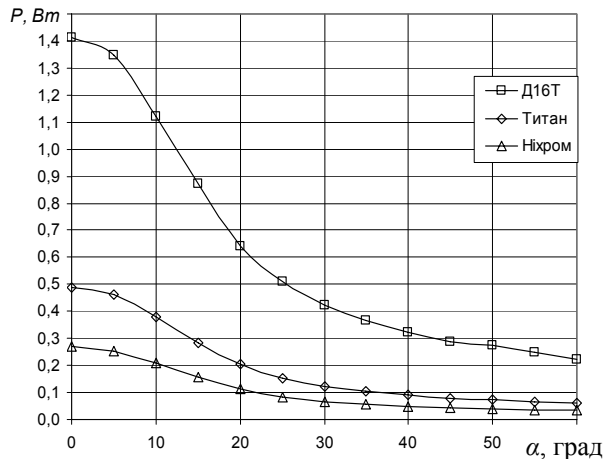


Рис. 4

На рис. 4 показаны результаты расчета суммарных потерь в оболочке в зависимости от угла наклона в пределах изменения последнего от 0 до 60° для сплава алюминия Д16, титана ВТ-1-0 и нихрома марки Х27105Т. Электропроводность этих материалов соответственно составляет 19 МСм·м<sup>-1</sup>; 1,818 МСм·м<sup>-1</sup>; 0,7 МСм·м<sup>-1</sup>. Кривые имеют сходный характер, что объясняется линейностью процесса растекания вихревых токов в оболочке из-за слабого влияния этих токов на насыщение ярма магнитопровода ротора. Сравнительный анализ кривых показывает, что материалы с высоким удельным сопротивлением (сплавы титана на нихрома) обеспечивают потери в оболочке в 3 ... 4 раза меньше, чем алюминиевый конструкционный сплав. Полученные зависимости необходимы при проектировании системы управления ТЭМ и используются при выработке поправок напряжений питания обмоток, ориентирующих ротор в пространстве.

1. Антонов А.Е. Двухкоординатные электрические машины для следящих систем. – Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2000. – 191 с.

2. Петухов И.С., Рекстина Л.В. Метод расчета потерь от внешних потоков рассеяния в конструктивных элементах трехстепенных электрических машин // Техн. электродинамика. – 2009. – №6. – С. 28–32.

УДК 621.313.323:001

#### ВТРАТИ ВІД ВИХРОВИХ СТРУМІВ В ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЇ ТРИСТЕПЕНЕВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ

І.С.Петухов, канд.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

e-mail: [igor\\_petu@mail.ru](mailto:igor_petu@mail.ru)

Обґрунтовано необхідність визначення втрат від вихрових струмів, викликаних потоками розсіювання, в елементах конструкції триступеневої електричної машини. Розроблено метод моделювання вихрових струмів в тонкій оболонці, що перетинається потоком розсіювання. Оцінено точність визначення втрат від вищих гармонічних складових магнітного поля. Отримано залежності втрат від орієнтації ротора у просторі для матеріалів, що мають різну електропровідність. Бібл. 2, рис. 4.

**Ключові слова:** триступенева електрична машина, потік розсіювання, вихрові струми, втрати.

#### EDDY CURRENT LOSSES IN STRUCTURAL ELEMENTS OF THE THREE-FREEDOM ELECTRIC MACHINE

I.S.Petukhov

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

e-mail: [igor\\_petu@mail.ru](mailto:igor_petu@mail.ru)

The necessity of determination of eddy current losses, caused by leakage flux, in structural members of three-freedom electric machine is grounded. The method for determining of losses in thin conductive shell, which is penetrated by leakage flux, is developed. The accuracy rating of determination of losses caused by high harmonics of magnetic field is assessed. The dependences of losses from rotor orientation are found for materials with different conductivity. References 2, figures 4.

**Key words:** three-freedom electric machine, leakage flux, eddy currents, electric losses.

1. Antonov A.E. The two-coordinate electric machines for control systems. – Kiev: Institut elektrodinamiki NAN Ukrainy, 2000. – 191 p. (Rus)

2. Petukhov I.S., Rekstina L.V. The method for modeling of the eddy current losses in structural elements of the three-freedom electric machines // Tekhnichna elektrodynamika. – 2009. – №6. – Pp. 18–26. (Rus)

Надійшла 10.02.2014