

Л.В. ОВЕРЬЯНОВА, ассист., НТУ «ХПИ»

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ИНДУКТОРА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНЕРЦИОННОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Выполняется расчет магнитного поля для ряда индукторов электромеханического преобразователя энергии инерционного накопителя. Производится выбор магнитной системы, удовлетворяющей указанным критериям.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, инерционный накопитель энергии, магнитная система, квадрупольное поле.

Введение. С целью экономии энергоресурсов при эксплуатации электрифицированных железных дорог предлагается применять инерционный накопитель энергии на электроподвижном составе пригородного сообщения.

Как отмечалось в работе [1], *электромеханический преобразователь энергии* представляет собой обращенную электрическую машину с возбуждением от постоянных магнитов, отличительной особенностью которой является минимальное наличие ферромагнетика в магнитной цепи. Это вызвано необходимостью, по возможности, исключить эффект одностороннего магнитного притяжения со стороны статора на ротор, что особенно важно для бесконтактного подвеса вращающегося ротора. Однако, отсутствие ферромагнетика существенным образом сказывается на величине и форме кривой электродвижущей силы обмотки якоря, а, следовательно, и развиваемой в процессе работы мощности накопителя.

Поэтому в статье уделяется существенное внимание обеспечению высокой интенсивности и правильному распределению картины магнитного поля, создаваемого системой постоянных магнитов.

Постановка задачи. На примере четырехполюсной электрической машины тестового накопителя необходимо рассчитать картину распределения мгновенных значений магнитного поля, создаваемую вращающимся индуктором, а также его среднее значение для ряда характерных магнитных систем. На основании полученных результатов произвести выбор магнитной системы, которая должна обеспечить установленный уровень мощности накопителя.

Исходя из уровня энергии обмена накопителя 63,2 МДж и монтажного объема, отводимого под накопительную систему, принимаем следующие геометрические размеры маховика: внешний радиус ротора – 0,225 м, внутренний радиус – 0,11 м, высота – 0,335 м. Усредненная удельная масса материала ротора 2700 кг/м³. Частота вращения ротора – 18260 об/мин.

Для указанных геометрических размеров маховика и его скорости вращения могут быть предложены такие геометрические размеры и параметры электрической машины: диаметр статора – 0,214 м, число пар полюсов индуктора – 2, полюсное деление – 0,168 м, активная длина якоря – 0,253 м, толщина магнита в радиальном направлении – 15 мм, воздушный зазор – 0,003 м. Постоянные магниты – Nb-Fe-B с *коэрцитивной силой* по индукции 979 кА/м.

Метод расчета магнитного поля индуктора. Поставленная задача решена методом конечных элементов, который реализован в программной среде FEMM [2]. При расчете были приняты следующие допущения: магнитное поле стационарное плоскопараллельное; магнитный поток вне расчетной области равен нулю; изменение температуры не оказывает воздействие на свойства постоянных магнитов; действие вихревых токов не учитывается.

Для стационарного магнитного поля метод конечных элементов в двухмерной расчетной модели и прямоугольной системе координат заключается в минимизации *нелинейного энергетического функционала* [3, 4]:

$$F = \int_S \int_0^{B_x} \frac{1}{\mu} B_x dB_x dS + \int_S \int_0^{B_y} \frac{1}{\mu} B_y dB_y dS - \int_S A dS, \quad (1)$$

где S – область расчета магнитного поля; B_x, B_y – составляющие вектора магнитной индукции; μ – магнитная проницаемость в треугольном элементе; \vec{A} – векторный магнитный потенциал, определяемый соотношением:

$$\vec{B} = \text{rot} \{0; 0; A\}. \quad (2)$$

Ввиду того, что переменные в функционале являются значениями в вершинах треугольников, минимум функционала можно найти, решая систему уравнений:

$$\partial F^m / \partial A_p = 0, \quad (3)$$

где $p = 1, 2, \dots, n$; $m = 1, 2, \dots, r$.

Векторный магнитный потенциал внутри треугольника – линейная функция, значения которой в пределах треугольного элемента определяется согласно выражению:

$$A = \frac{1}{S_m} \left[(a_i + b_i x + c_i y) A_i + (a_j + b_j x + c_j y) A_j + (a_k + b_k x + c_k y) A_k \right].$$

Тогда магнитная индукция в пределах конечного элемента (треугольника) является постоянной величиной и ее можно вычислить по формуле:

$$B = \frac{1}{2 S_m} \sqrt{(c_i A_i + c_j A_j + c_k A_k)^2 + (b_i A_i + b_j A_j + b_k A_k)^2}. \quad (4)$$

Из уравнений (3), (4) следует, что система уравнений для поиска мини-

му аппроксимирующего функционала (1) имеет столько же уравнений, сколько выбрано расчетных точек, а каждое уравнение содержит столько членов, сколько треугольных элементов имеют общую вершину в расчетной точке. Решение системы сводится к решению системы линейных уравнений с нелинейными коэффициентами вида

$$T \times A = \Delta,$$

где T – матрица коэффициентов, составляющаяся из матриц коэффициентов треугольников G поэлементным суммированием коэффициентов с одинаковыми индексами и расстановкой их в матрице T на соответствующие, согласно этим индексам, положения.

Матрица G описывается выражением:

$$G = \frac{1}{4\mu} \begin{matrix} i \\ j \\ k \end{matrix} \begin{matrix} i & j & k \\ \left[\begin{array}{ccc} b_i^2 + c_i^2 & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_i b_j + c_i c_j & b_j^2 + c_j^2 & b_j b_k + c_j c_k \\ b_i b_k + c_i c_k & b_j b_k + c_j c_k & b_k^2 + c_k^2 \end{array} \right] \end{matrix},$$

где i, j, k – номера рядов матрицы G ; b, c – коэффициенты, определяющиеся по координатам вершин треугольника.

Магнитная проницаемость для треугольных элементов, находящихся в нелинейных средах, является величиной переменной и зависит от величин векторных магнитных потенциалов. Поэтому решение такой системы нелинейных уравнений должно производиться итерационными методами.

Вектор столбец Δ составляется из векторов столбцов треугольных элементов δ таким же методом, как и матрица коэффициентов T . Вектор-столбец δ определяется по формуле:

$$\delta = (J S_m / 3) \cdot [1 \ 1 \ 1]^T,$$

где J – плотность тока в треугольнике.

После составления матрицы T и Δ производится задание граничных условий, для чего приравняются нулю все элементы строки и столбца матрицы T , в которых номер диагонального элемента соответствует номеру точки с заданным векторным потенциалом. Диагональный элемент с этим номером приравняется к единице, а элемент вектора столбца Δ – к величине векторного магнитного потенциала в данной точке. Поскольку *граничные условия второго и третьего рода* в данной методике не используются, то порядок их учета не рассматривается.

Анализ интенсивности и распределения магнитного поля. В качестве расчетной области было принято поперечное сечение магнитной системы ряда индукторов:

- секторного типа без ферромагнетика;
- с одним ферромагнитным экраном;

- с двумя ферромагнитными экранами;
- составного секторного типа с элементарными ориентировано намагниченными секторами;
- составного пластинчатого типа с элементарными ориентировано намагниченными пластинами.

При выборе магнитной системы для электрической машины накопителя следует руководствоваться более высоким значением индукции и низким коэффициентом пульсации, который равен отношению ее максимального значения к среднему.

Сравнительный анализ представлен в таблице. Порядковый номер варианта магнитной системы соответствует последовательности ее упоминания в тексте. Систему № 2, как более подходящую по критериям, но сложно реализуемую с точки зрения сохранения равновесия ротора относительно его оси вращения, не принимаем во внимание.

Таблица – Сравнительный анализ магнитных систем

Номер варианта	1	2	3	4	5
Среднее значение индукции, Тл	0,002	0,270	0,147	0,196	0,152
Коэффициент пульсации индукции, отн. ед.	2,37	1,10	1,22	1,15	1,21

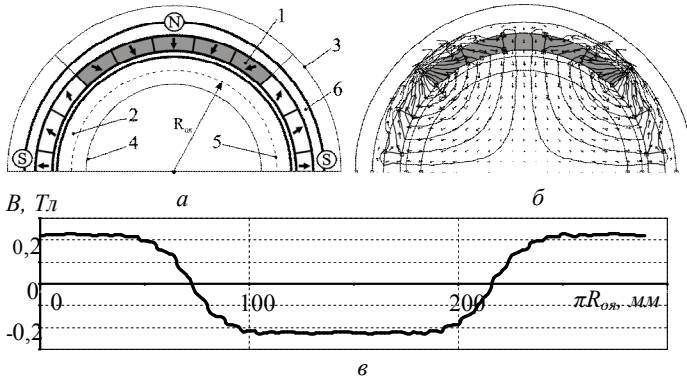


Рис. – Магнитная система составного секторного типа: а – конструкция индуктора, б – распределение магнитных силовых линий, в – кривая распределения индукции на уровне средней линии якорной обмотки; 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – внешняя граница расчетной области; 4 – внутренняя граница якорной обмотки; 5 – средняя линия зоны якорной обмотки; б – внешний ферромагнитный экран; R_{oy} – радиус обмотки якоря на уровне ее средней линии.

Для дальнейших исследований выбираем магнитную систему составного секторного типа с ферромагнитным экраном. Для четырехполюсной магнитной системы, которая создает *квадрупольное магнитное поле* (рис.), на один полюс приходится пять элементарных ориентировано намагниченных секторных магнитов, имеющих внешний радиус 0,125 мм, внутренний – 0,11 мм. Для такой системы среднее значение индукции составляет 0,196 Тл, а коэффициент пульсации – 1,15. Кривая распределения индукции имеет трапециевидный характер, что приемлемо для проектируемой системы.

Это вызвано разделением полюса индуктора на элементарные магниты, намагниченные таким образом, чтобы силовые линии стремились к центральному радиально-намагниченному сектору, что способствует «выталкиванию» последних во внутреннюю область системы и равномерному их распределению.

Выводы. Для возбуждения электромеханического преобразователя накопителя энергии целесообразно принять магнитную систему секторного типа с ориентировано намагниченными элементарными магнитами, которая обеспечивает рациональное распределение индукции в области якорной обмотки со средним значением 0,196 Тл и коэффициентом пульсации 1,15. Применение такой магнитной системы даст возможность производить обмен энергией на уровне 63,2 МДж между накопителем и системой тягового привода электроподвижного состава при мощности 240 кВт.

Список литературы. 1. Оверьянова Л.В. Электромеханический преобразователь инерционного накопителя энергии для электроподвижного состава пригородного сообщения // Вестник НТУ «ХПИ» – Харьков, 2012. – Вып.20. – С.84-90. 2. <http://femm.berlios.de>. 3. Сильвестр П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров - электриков. – М.: Мир, 1986. – 232 с. 4. Chari M.V.K, Laskaris E.T., Angelo J.D. Finite element analysis of magnetic fluid seal for large-diameter high-speed rotating [Text] / M.V.K. Chari, // Transactions of IEEE on magnetic, vol. MAG-17. – 1981. – № 6. – Р. 3000-3001.

Поступила в редколлегию 25.10.2012

УДК 621.924

Магнитная система индуктора электромеханического преобразователя инерционного накопителя энергии / Л.В. Оверьянова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №54(960). – С.165-169. – Бібліогр.: 4 назви.

Виконується розрахунок магнітного поля ряду індукторів для електромеханічного перетворювача енергії інерційного накопичувача. Проводиться вибір магнітної системи, яка задовольняє зазначеним критеріям.

Ключові слова: електромеханічний перетворювач, інерційний накопичувач енергії, магнітна система, квадрупольне поле.

The magnetic field range of inductors for electromechanical energy conversion inertial drive are calculates. The magnetic system which satisfy the criteria is selects.

Key words: electromechanical transducer, the inertial energy storage, magnetic system, the quadrupole field.