

УДК 621.3.013

## ЗАМЕНА ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ НАМАГНИЧЕННОЙ СРЕДОЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБЛАСТИ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ

**И.С. Петухов**, докт. техн. наук, **К.П. Акинин**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина  
e-mail: igor\_petu@mail.ru

*Предложен прием, заключающийся в замене сосредоточенной обмотки электрической машины постоянным магнитом со специальным распределением коэрцитивной силы. При отсутствии в конструкции электрической машины массивных проводящих элементов данный прием позволяет избавиться в математической модели от токов обмотки и сформулировать задачу в терминах скалярного магнитного потенциала. В результате удается расчет переменного магнитного поля от лобовых частей трехфазной обмотки свести к магнитостатической задаче, существенно сгустить сетку и повысить точность решения. Библиограф. 4, рис. 6.*

**Ключевые слова:** постоянный магнит, сосредоточенная обмотка, лобовые части, магнитное поле, скалярный магнитный потенциал, размерность задачи, точность решения.

**Введение.** Основным свойством ресурсов вычислительной техники, таких как объем оперативной памяти и производительность процессора, является то, что их всегда не хватает. Так, увеличение вычислительных возможностей приводит к возрастанию сложности и размерности используемых математических моделей, и снова возникает вопрос о совершенствовании алгоритмов решения и дальнейшем наращивании вычислительных ресурсов. При численном моделировании стационарных магнитных полей в электрических машинах методом конечных элементов одним из приемов, позволяющих увеличить густоту сетки (то есть размерность задачи и соответственно точность решения), является использование в качестве искомой функции скалярного магнитного потенциала вместо векторного. Такой прием возможен в случае отсутствия токопроводящих сред и токов в обмотках, например, при расчете поля при холостом ходе бесконтактного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов (БДПМ).

Однако пренебречь токами обмотки невозможно, если требуется, например, рассчитать влияние этих токов (реакции якоря) на поле возбуждения. На практике такая задача встречается в управляемых двигателях, имеющих в составе системы управления датчик положения ротора. На рис. 1 представлен поперечный разрез микродвигателя, в котором используется датчик на основе преобразователя Холла, расположенный в области торца магнитопровода. Близкое расположение датчика к лобовым частям обмотки требует уточнения влияния поля токов трехфазной обмотки на поле постоянного магнита, которое в этой области несколько ослаблено из-за явления выпучивания. Расположение же датчика в месте центрального сечения машины (рис. 1) нежелательно по технологическим соображениям [1].

Использование магнитопровода статора, выполненного методом порош-

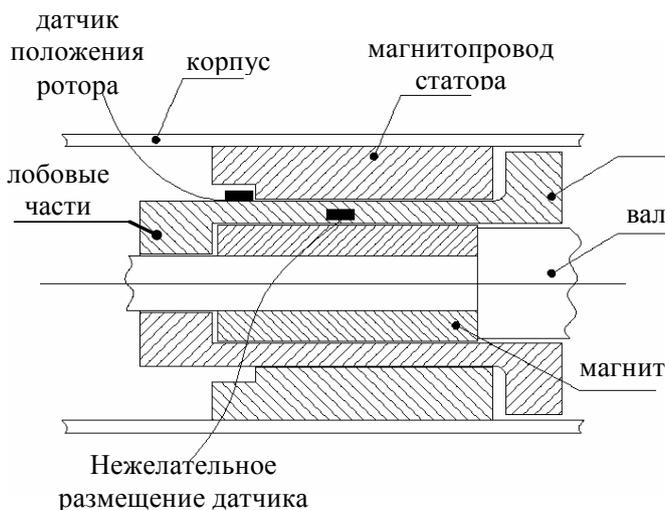


Рис. 1

ковой металлургии, применение корпуса из композитного материала и удаленность массивного вала от места расположения датчика исключают появление сколько-нибудь значимых вихревых токов в элементах конструкции. Единственным элементом конструкции, в котором протекают токи, является сама обмотка. Трехмерная конфигурация поля лобовых частей, ослабленное поле возбуждения возле торцов, требование точного знания интенсивности поля в области датчика вызывают необходимость существенного сгущения сетки в интересующей области. Переход от векторного потенциала к скалярному позволил бы в три раза уменьшить размерность задачи и существенно увеличить густоту сетки, повысив тем самым точность решения.

Как будет показано далее, в случае простой геометрии удастся произвести эквивалентную замену обмотки с током гипотетическим магнитом определенной конфигурации с изменяющейся во времени коэрцитивной силой. Описание допущений, связанных с такой заменой, а также результаты моделирования поля в области лобовых частей и являются целью настоящей статьи.

**Математическая модель.** Рассмотрим поперечные сечения плоской сосредоточенной обмотки и магнита, имеющие одинаковые размеры – высоту и ширину (рис. 2). Под "плоской" обмоткой будем понимать такую ее конфигурацию, когда все сечения в плоскостях, параллельных плоскости воздушного зазора, являются одинаковыми. Закон полного тока в случае возбуждения поля током обмотки описывается первым уравнением Максвелла [3]:

$$\int_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = I, \quad (1)$$

где  $\mathbf{H}$  – вектор напряженности магнитного поля;  $l$  – контур интегрирования;  $I$  – полный ток, охватываемый контуром. Если же в расчетной области присутствует намагниченная среда с коэрцитивной силой  $H_c$ , то интеграл (1) можно переписать в виде

$$\int_l (\mathbf{H}' - \mathbf{H}_c) d\mathbf{l} = 0, \quad (2)$$

где  $\mathbf{H}'$  – расчетная напряженность поля. Причем в ненамагниченных (воздушных) областях расчетная напряженность поля тождественно равна истинной напряженности поля

$$\mathbf{H}' \equiv \mathbf{H}. \quad (3)$$

Учитывая, что внутри намагниченных областей истинная напряженность поля нас не интересует, можно считать тождество (3) справедливым всюду. Тогда, преобразовав интеграл в левой части (2), получим равенство

$$\int_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_l \mathbf{H}_c d\mathbf{l}. \quad (4)$$

Из сравнения выражений (1) и (4) следует, что для замены обмотки с током эквивалентной намагниченной средой следует обеспечить равенство правых частей в этих выражениях.

На рис. 2 также представлены соответствующие эпюры плотности тока обмотки, коэрцитивной силы магнита и МДС в обоих случаях. Анализ этих эпюр позволяет предположить, что для эквивалентной замены магнит должен обладать трапециевидальным распределением ко-

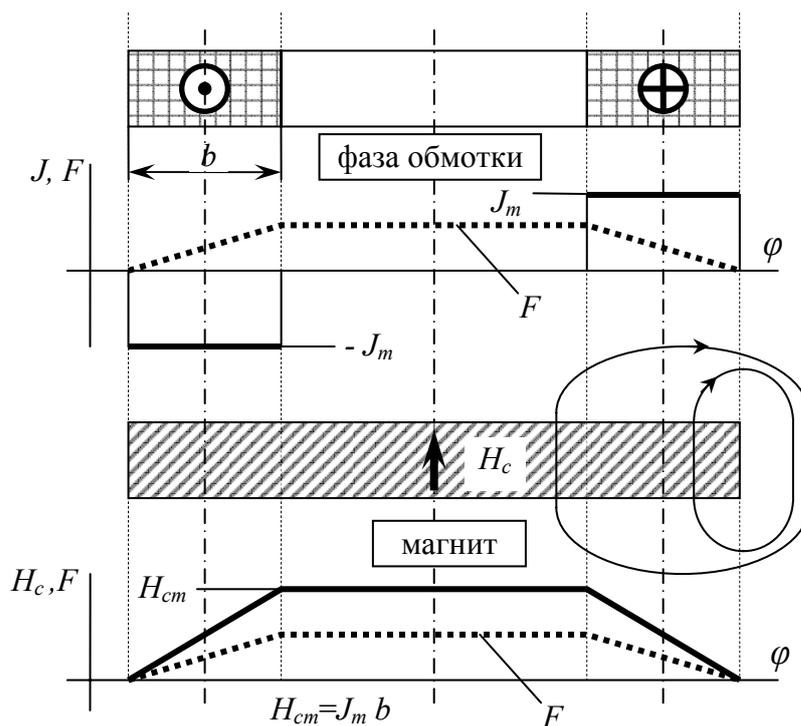


Рис. 2

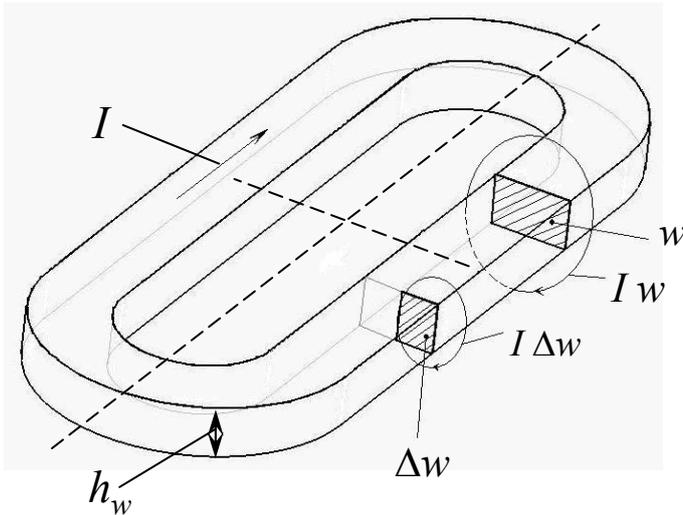


Рис. 3

жечь также, что погрешности при такой замене будут незначительные. Аналогичные предположения об эквивалентности подобной замены имеют место и при рассмотрении лобовых частей плоской сосредоточенной обмотки с числом витков  $w$  (рис. 3).

**Анализ результатов.** Для проверки выдвинутого предположения рассмотрим поперечное сечение БДПМ беспазового исполнения с указанными размерами по отношению к полюсному делению  $\tau$ : воздушный зазор –  $\delta/\tau = 0,056$ ; высота слоя обмотки –  $h_w/\tau = 0,3$ ; высота ярма статора –  $h_{js}/\tau = 0,4$ ; высота магнита на роторе –  $h_{jr}/\tau = 0,5$ . В декартовых координатах поперечное сечение машины представлено на рис. 4 с изолиниями поля векторного магнитного потенциала, рассчитанного в среде COMSOL [4]. При этом вытеснение магнитного потока из магнитопровода статора во внешнюю среду не учитывалось и полагалось, что вал, расположенный под магнитом ротора, является идеальным ферромагнетиком. Эти предположения отражены на рис. 4 соответствующими граничными условиями на верхней и нижней гранях расчетной области. Поскольку высококоэрцитивные магниты имеют характеристику размагничивания близкую к линейной, область магнита ротора можно без ущерба точности заменить линейной средой с магнитной проницаемостью магнита  $\mu' = 1,04$ .

Сравнение данных расчета поля обмотки и магнита, расположенного в том же объеме и имеющего описанное трапецеидальное распределение коэрцитивной силы, приведено на рис. 5, где сплошная линия соответствует полю от обмотки, а маркеры – значениям поля в

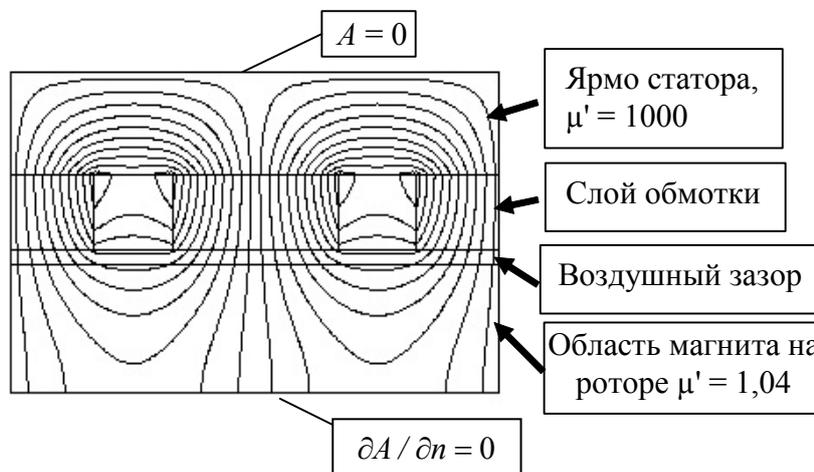


Рис. 4

эрцитивной силы вдоль соответствующей координаты (в данном случае вдоль горизонтальной координаты  $\varphi$ ) и ее амплитудой

$$H_{cm} = J_m b, \quad (5)$$

где  $J_m$  – плотность тока в обмотке;  $b$  – ширина стороны обмотки (рис. 2). Во всяком случае, если в области источника поля (сечения обмотки или магнита) контур интегрирования направлен вдоль действия намагничивающей силы (рис. 2), то выражения (1) и (4) дадут один и тот же результат. А поскольку в воздушном зазоре электрической машины с постоянными магнитами радиальное поле, как правило, доминирует из-за влияния магнитопровода, то можно предполо-

жить, что погрешности при такой замене будут незначительные. Аналогичные предположения об эквивалентности подобной замены имеют место и при рассмотрении лобовых частей плоской сосредоточенной обмотки с числом витков  $w$  (рис. 3).  
соответствующих точках в случае возбуждения поля эквивалентным магнитом. Не анализируя погрешность расчета, получаемую при замене обмотки эквивалентным магнитом (которая не превышает 0,5 % даже в областях, удаленных от воздушного зазора), можно сказать, что результаты расчета как модуля индукции, так и ее нормальной (к зазору) составляющей при рассматриваемой эквивалентной замене достаточно близки.

В случае же, когда обмотка трехфазная, обладает кривизной и секции обмотки имеют отгибы лобовых частей, то есть не являются плоскими, предположение о возможной эквивалентной замене обмотки магнитом, строго говоря, сделать не удастся. Однако ввиду того, что датчик находится на некотором удалении от сформированных и некоторым образом "перемешанных" проводников лобовых частей, будем считать, что погрешность от изменения конфигурации при формировании незначительна и коэрцитивные силы эквивалентных магнитов различных фаз складываются алгебраически. В результате выполненной замены, аппроксимировав определенным образом лобовые части обмотки [2], можно сформулировать трехмерную задачу расчета магнитного поля в терминах скалярного магнитного потенциала.

Задача анализа взаимного влияния полей обмотки и магнита системы возбуждения достаточно обширна. Для формирования сигналов системы управления величину этого влияния следует знать для всех возможных значений угла  $\theta$  между векторами МДС ротора и обмотки статора с тем, чтобы эффективно управлять машиной в динамических режимах. То, что обмотка в микромашинах часто выполняется сосредоточенной, а питание является импульсным, еще более осложняет исследование.

Здесь же для иллюстрации ограничимся лишь анализом установившегося режима с оптимальным углом  $\theta$ . Результаты расчета в среде COMSOL 3.1 влияния на поле возбуждения от постоянного магнита на роторе поля лобовых частей трехфазной обмотки при угле  $\theta = 90^\circ$  представлены на рис. 6. Для повышения точности задавалось сильное сгущение сетки в области расположения датчика на протяжении полюсного деления машины. Приведенные результаты показывают, что искомая разница составляет около 4 %, может быть аппроксимирована синусоидой соответствующей амплитуды. Указанное значение угла  $\theta$  является оп-

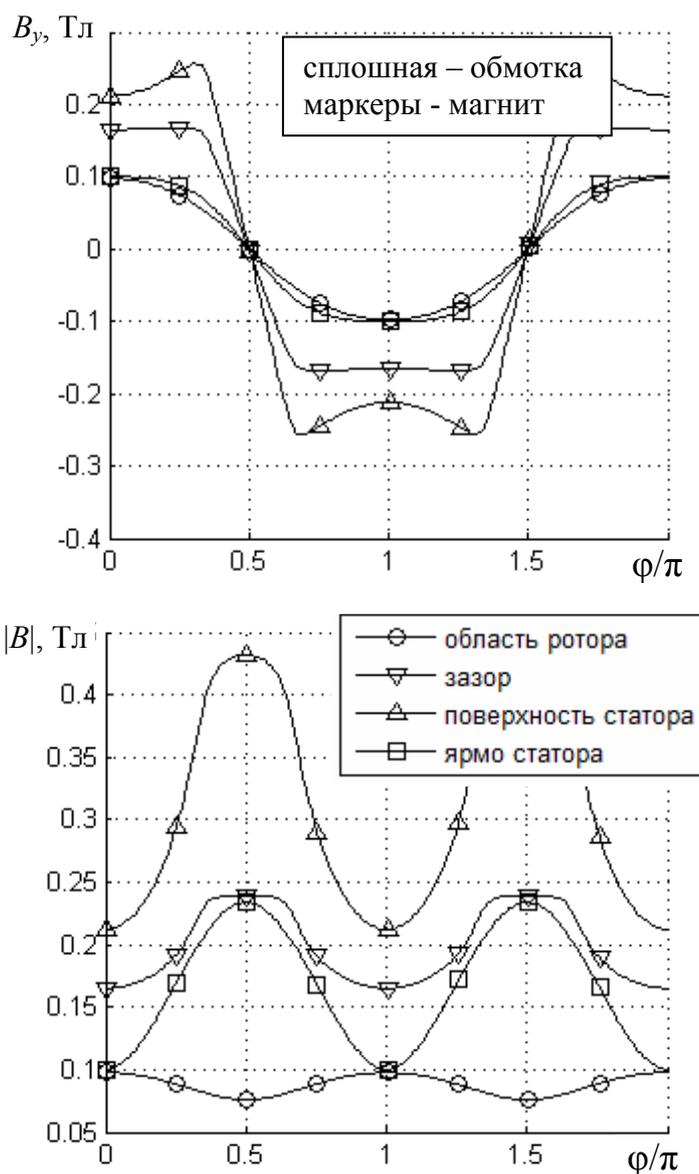


Рис. 5

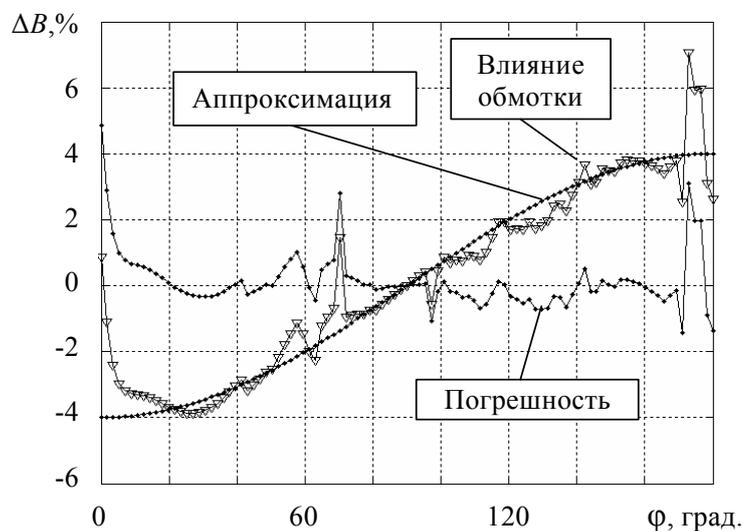


Рис. 6

тимальним при установившемся режиме. В переходных режимах расчетная разность имеет иные значения, и ее величина зависит от этого угла. Исследование этой зависимости выходит за рамки настоящей статьи.

**Выводы.** При отсутствии в активной зоне машины массивных токопроводящих элементов конструкции и использовании в ней однослойной обмотки, фазы которой состоят из сосредоточенных катушек, можно выполнить эквивалентную замену катушек обмотки магнитами соответствующей конфигурации с определенным распределением коэрцитивной силы. В результате можно перейти от формулировки магнитостатической задачи в терминах векторного потенциала, использующей в качестве источника токи, к формулировке в терминах скалярного потенциала и получить задачу втрое меньшей размерности.

1. Акинин К.П., Антонов А.Е., Киреев В.Г. Бесконтактный магнитоэлектрический двигатель с инвертором напряжения // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины: 36 наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – № 2(17). – С. 24–29.
2. Леус О.М., Петухов І.С. Моделирование магнитного поля лобовых частей обмотки безпазовой электрической машины // Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – 2011. – № 2. – С. 42–44.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: в 2-х т. Учебник для вузов. Том I. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд., 1981. – 536 с.
4. COMSOL multiphysics modeling and simulation software – Available at: [http // www.comsol.com/](http://www.comsol.com/).

УДК 621.3.013

**І.С. Петухов**, докт. техн. наук, **К.П. Акинін**, канд. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

**Заміна обмотки електричної машини намагніченим середовищем при моделюванні магнітного поля в області лобових частин**

*Запропоновано прийом, що полягає в заміні зосередженої обмотки електричної машини постійним магнітом зі спеціальним розподілом коерцитивної сили. За умов відсутності в конструкції електричної машини масивних електропровідних елементів цей прийом дає змогу позбутися в математичній моделі від струмів обмотки та сформулювати задачу в термінах скалярного магнітного потенціалу. В результаті вдається розрахунок змінного магнітного поля від лобових частин трифазної обмотки звести до магнітостатичної задачі, суттєво згустити сітку та підвищити точність розв'язку. Бібл. 4, рис. 6.*

**Ключові слова:** постійний магніт, зосереджена обмотка, лобові частини, магнітне поле, скалярний магнітний потенціал, розмірність задачі, точність рішення.

**I.S. Petukhov, K.P. Akinin**

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

**Replacing of the electrical machine winding with magnetized medium at modeling of magnetic field in overhang parts**

*A reception is to replace the concentrated winding permanent magnet electric machine with a special distribution of the coercive force. In the absence of the electrical machine design solid conductive elements, this technique allows you to get rid of in a mathematical model of the winding currents and formulate the problem in terms of the scalar magnetic potential. As a result, it is possible the simulation of the alternating magnetic field from the overhang parts of the three-phase windings to reduce to the magnetostatic problem and significantly refine the mesh as well as increase the accuracy of the solution. References 4, figures 6.*

**Key words:** permanent magnet, concentrated winding, overhang parts, magnetic field, scalar magnetic potential, dimension of problem, accuracy of solution.

Надійшла 17.11.2016

Received 17.11.2016