

АППРОКСИМАЦИЯ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СИНХРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

А.М. Олейников¹, докт. техн. наук, **О.П. Никитин**², канд. техн. наук, **Е.И. Зарицкая**³, асп., **М.В. Прыймак**⁴, асп.

1, 2 – Севастопольский нац. техн. ун-т,
ул. Университетская, 33, Севастополь, 99053, Украина

3 – Одесский нац. морской ун-т,
ул. Мечникова, 34, Одесса, 65029, Украина

4 – Ин-т электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

На примерах ряда многополюсных синхронных генераторов с постоянными магнитами показана возможность аппроксимации картин распределения магнитного поля в различных зонах магнитной цепи электрической машины, построенных в современных программах моделирования таких полей. Библиограф. 3, рис. 5, табл. 2.

Ключевые слова: синхронный, многополюсный, генератор, магнитная цепь, обмотка, гармоники, магниты, поток, индукция, моделирование.

В проблемах, касающихся проектирования многополюсных синхронных машин с постоянными магнитами, одной из главных представляется задача построения реальной картины поля, его описания и определения значений магнитной индукции или магнитного потока для электромагнитного расчета машины. Действительно, наглядное и максимально точное представление о величине и характере распределения магнитного поля в магнитной цепи дает возможность, с одной стороны, при заданной ЭДС рассчитать обмоточные данные якоря, с другой – учесть действие высших гармоник и полей рассеяния на характеристики генератора при различных режимах работы.

Среди современных программ конечно-элементного анализа весьма широким спектром реализации отличается программа ELCUT [3], которая позволяет решать двумерные линейные или нелинейные полевые задачи, описываемые дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скалярного или векторного потенциалов. Геометрия магнитной цепи представляется в виде подобластей с определенным набором физических свойств, а источником поля выступают сосредоточенные и распределенные токи и токовые слои или постоянные магниты.

На рис 1 а представлена для примера конфигурация реальной магнитной цепи экспериментального тихоходного синхронного генератора серии СГПМ 20-125 (20 кВт, 125 об/мин), подготовленная в строго выдержанных размерах для моделирования в программе ELCUT, на рис. 1 б – на фоне полюсного деления в малом масштабе показана кривая распределения индукции под магнитом, а на рис. 1 в сравниваются картины распределения поля на поверхности магнита (кривые 2) и по центру воздушного зазора (кривые 1), причем для полюса распределение индукции и величина потока показаны на ширине магнита, а для зазора – на ширине полюсного деления.

Как видно, во всех случаях распределение B имеет трапецеидальный характер, типичный для поля в синхронной машине при равномерном воздушном зазоре; под магнитом кривые приобретают седлообразный вид с незначительным плавным понижением к центру полюса (это связано с плоской поверхностью магнита), а на его наружной поверхности и особенно в воздушном зазоре имеют место резкие отклонения поля от среднего значения в полном соответствии с конфигурацией воздушного промежутка. В области открытия пазов статора магнитная индукция снижается на 30...35 % от максимальной (до 0,66 Тл).

Из графиков следует, что полный магнитный поток на рассматриваемом участке магнитной цепи неуклонно понижается от нижней грани магнита к его поверхности и далее к расточке статора и по мере продвижения к ярму. В частности, это понижение составляет от

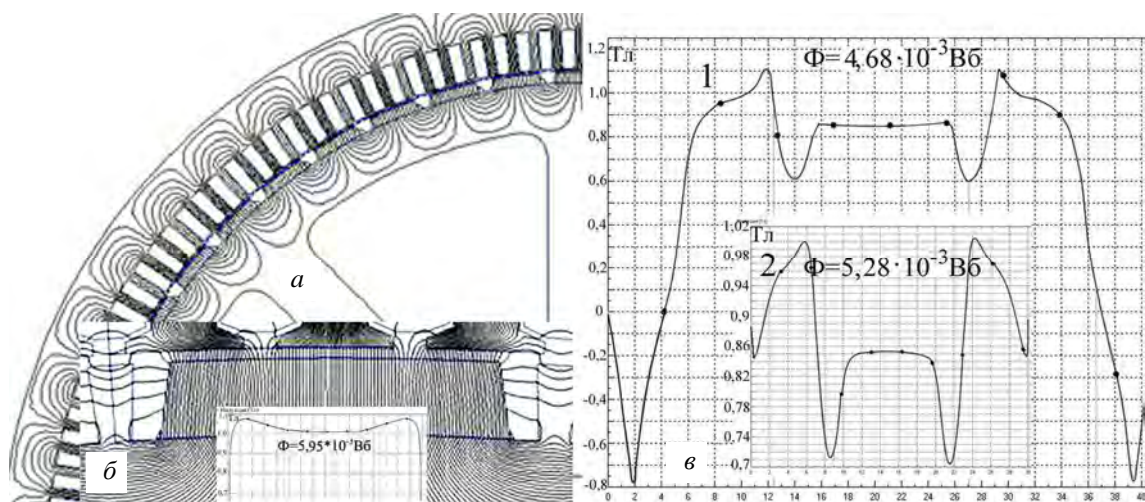


Рис. 1

$5,95 \cdot 10^{-3}$ до $4,68 \cdot 10^{-3}$ Вб, то есть более чем на 20 %, что является следствием как рассеяния в межполюсном пространстве, так и затухания.

Еще более наглядно процесс затухания демонстрируется данными табл. 1, в которой для примера приведены отдельные, рассчитанные на модели, значения магнитного потока последовательно от расточки статора и выше для рабочего режима рассматриваемого генератора при различных плотностях тока обмотки статора. Кроме того, измерены потоки рассеяния по всем возможным путям замыкания этой составляющей поля – различные зоны между магнитами, пазы и коронки зубцов. Особенности распределения полей рассеяния видны из рис. 1 б.

Таблица 1

Участок магнитной цепи	Плотность тока статора j , А/мм ²				
	0	2,5	3,0	5,0	7,5
На расточке статора	$6,37 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$4,67 \cdot 10^{-3}$
На высоте $0,5 h_n$	$6,05 \cdot 10^{-3}$	$5,31 \cdot 10^{-3}$	$5,12 \cdot 10^{-3}$	$4,44 \cdot 10^{-3}$	$3,53 \cdot 10^{-3}$
На верхней границе паза	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$5,22 \cdot 10^{-3}$	$5,03 \cdot 10^{-3}$	$4,28 \cdot 10^{-3}$	$3,23 \cdot 10^{-3}$
В ярме якоря ($\Phi_0/2$)	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$2,61 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-3}$
Рассеяние между магнитами (0,05 от торца)	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$3,04 \cdot 10^{-4}$	$3,27 \cdot 10^{-4}$	$3,36 \cdot 10^{-4}$
По центру зубца ротора	$1,44 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,68 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Пазовое		$1,55 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-4}$	$3,03 \cdot 10^{-4}$	$4,42 \cdot 10^{-4}$
По коронкам зубцов статора		$1,74 \cdot 10^{-4}$	$2,09 \cdot 10^{-4}$	$3,16 \cdot 10^{-4}$	$5,17 \cdot 10^{-4}$

Интересно проследить здесь влияние нагрузки; с ее увеличением в зоне магнитопровода статора наблюдается существенное снижение результирующего магнитного потока. При трехкратной перегрузке (при изменении плотности тока от 2,5 до 7,5 А/мм²) магнитный поток снижается на 35 %, что является следствием реакции якоря, а потоки рассеяния возрастают: в зоне пазов в 2,8; по коронкам зубцов в 3; по центру зубца ротора в 2 раза. Все это свидетельствует о необходимости скрупулезного учета реального распределения поля при проведении расчетов электрической машины подобного типа.

Имея в результате моделирования необходимый объем данных по величинам поля в различных участках магнитопровода, приобретаем возможность математического описания картины распределения этого поля, такого, что можно без применения известных эмпирических формул, приведенных, например, в [1], рассчитать его параметры в произвольной зоне магнитной цепи. Такая возможность открывается при использовании многочленов, охватывающих интересующую область, например, активную часть (воздушный зазор и пазово-зубцовую зону якоря) или зону поля рассеяния между коронками зубцов, между магнитами на роторе, а также в любых других элементах магнитной цепи.

При необходимости аппроксимировать функцию $z = F(x,y)$ многочленом третьей степени относительно переменных x и y , общий вид которого записывается в виде

$$P(x, y) = a_0 \cdot x \cdot y^2 + a_1 \cdot y^3 + a_2 \cdot y^2 + a_3 \cdot y + a_4 \cdot x \cdot y + a_5 \cdot x^2 \cdot y + a_6 + a_7 \cdot x + a_8 \cdot x^2 + a_9 \cdot x^3, \quad (1)$$

в среде Mathcad выполняются следующие операции: задаются матрицы – столбцы переменных X , Y и Z ; матрицы X и Y функцией `augment (X,Y)` объединяются в одну матрицу XY ; задается степень n многочлена; с помощью функции `regress (XY,Z,n)` готовится матрица R ; выражение функции для дальнейших расчетов определяется из равенства

$$f(x, y) = \text{int } \text{erp}(R, XY, Z, \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}); \quad (2)$$

коэффициенты полинома определяются матрицей

$$A_n = \text{submatrix} (R, 3, \text{rows} (R) - 1, 0, 0). \quad (3)$$

Если, например, необходимо функцию

$$K(x, y) = x^2 + 5 \cdot x^2 \cdot y - 4 \cdot y^3 - x \cdot y^2 - y^2 - 0,1 \sin(x + y) + 4 - 2 \cdot e^{-(x+3 \cdot y)}, \quad (4)$$

заданную в области $0 \leq x \leq 8$, $0 \leq y \leq 8$, аппроксимировать многочленом третьей степени от двух переменных с шагом $h = 1$, готовятся матрицы X , Y и Z , область задания функции разбивается сеткой с шагом 1, тогда количество точек, в которых вычисляются значения функции, равно 81:

$$i = 0 \dots 80, \quad X_i = \text{floor} \left(\frac{i+1}{9} \right), \quad Y_i = i - 9 \cdot X_i + 1, \quad Z_i = K(X_i, Y_i);$$

$$f(x, y) = \text{int } \text{erp}[R, XY, Z \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}]; \quad A_n = \text{submatrix}(R, 3, \text{rows}(R) - 1, 0, 0).$$

Матрица коэффициентов A_n полинома включает следующие значения:

$$A_n = -0,997; -3,998; -2,044; 0,27; -0,035; 5,001; 3,501; 0, 129; 0,99; 1,004 \cdot 10^{-4}.$$

Таким образом, аппроксимирующий полином приобретает вид

$$P(x, y) = -0,98 \cdot x \cdot y^2 - 4 \cdot y^3 - 2,05 y^2 + 0,27 y - 0,04 \cdot x \cdot y + 5 \cdot x^2 \cdot y + 3,5 - 1,29 \cdot x + 0,99 \cdot x^2, \quad (5)$$

а коэффициенты в нем записываются с точностью 0,01 в той последовательности, которая определена в равенстве (1):

$$x_0 = 0; \quad x_1 = 8; \quad y_0 = 0; \quad y_1 = 8; \quad M = \text{CreateMesh}(f, x_0, x_1, y_0, y_1).$$

Решение этого полинома в координатах x , y и z определяет поверхность изменения аппроксимируемой функции (рис. 2).

Представляется возможным показать как по изложенному методу, используя более подробные данные измерений (по примеру табл. 1), описать одним уравнением такой массив параметров поля для определенной области, например, в области пазов, т. е. ту главную зону, в которой происходит взаимодействие поля с обмоткой, и построить пространственную картину поля для такой области.

Этот массив ниже обозначен Z и включает первую строку из значений плотности тока j в обмотке якоря и ряд столбцов (кроме первого), где

по вертикали записаны значения магнитного потока на различных уровнях зубцовой зоны статора, начиная от линии расточки. Первый столбец, начиная со второй строчки, определяет относительную высоту распространения волны в пределах от нуля до 10.

Нами определено, что наиболее эффективно аппроксимация такого массива возможна с помощью квадратичной или кубической парабол, постоянные коэффициенты которых определяются по специальной программе по методу наименьших квадратов:

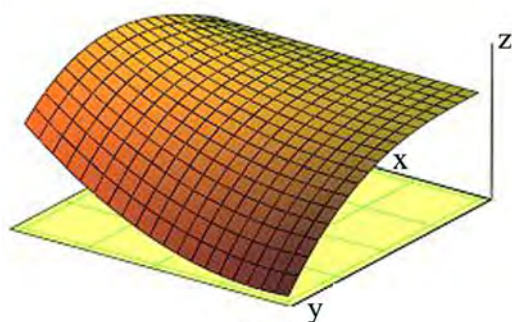


Рис.2

$$Z := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2.5 & 3 & 5 & 7.5 \\ 0 & 0.00608 & 0.0057 & 0.0056 & 0.0052 & 0.00467 \\ 1.5 & 0.00608 & 0.00555 & 0.00541 & 0.00493 & 0.00382 \\ 2.5 & 0.00608 & 0.0054 & 0.00524 & 0.00463 & 0.00382 \\ 5 & 0.00605 & 0.00531 & 0.00512 & 0.00444 & 0.00353 \\ 7.5 & 0.0062 & 0.00523 & 0.00505 & 0.00431 & 0.00334 \\ 10 & 0.006 & 0.0052 & 0.00503 & 0.00428 & 0.0032 \end{pmatrix}.$$

Уравнение квадратичной параболы имеет вид

$$P(x, y) = a_{10} \cdot x \cdot y + a_{11} y^2 + a_{12} y + a_{13} + a_{14} \cdot x + a_{15} \cdot x^2, \quad (6)$$

где x – значения плотности тока статора; y – относительная глубина проникновения волны в сердечник; $P(x, y)$ – величина магнитного потока в определенных зонах при определенной плотности тока.

Для рассматриваемого массива Z значения постоянных коэффициентов определены в следующих числах:

$$a_1 = (-1,61 \cdot 10^{-5}; 8,521 \cdot 10^{-6}; -8,998 \cdot 10^{-5}; 6,207 \cdot 10^{-3}; -1,796 \cdot 10^{-4}; -8,25 \cdot 10^{-6}).$$

Уравнение кубической параболы включает 10 членов

$$P_1(x, y) = a_0 \cdot x \cdot y^2 + a_1 \cdot y^3 + a_2 \cdot y^2 + a_3 \cdot y + a_4 \cdot x \cdot y + a_5 \cdot x^2 \cdot y + a_6 + a_7 \cdot x + a_8 \cdot x^2 + a_9 \cdot x^3 \quad (7)$$

со значениями постоянных коэффициентов

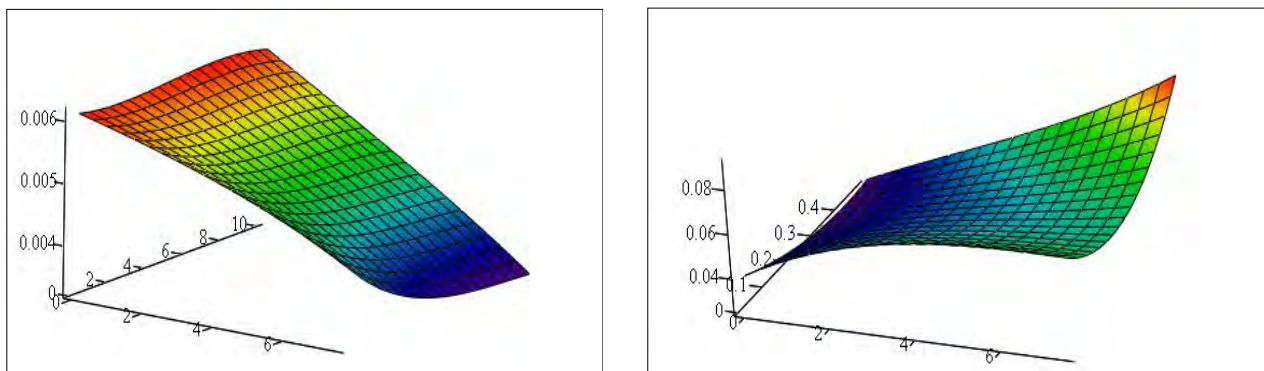
$$a = (2,636 \cdot 10^{-6}; -1,592 \cdot 10^{-6}; 2,29 \cdot 10^{-5}; -7,882 \cdot 10^{-5}; -4,585 \cdot 10^{-5}; 4,403 \cdot 10^{-7}; 6,121 \cdot 10^{-3}; -1,505 \cdot 10^{-4}; -2,651 \cdot 10^{-6}; -6,867 \cdot 10^{-7}). \quad (8)$$

В данном случае погрешность аппроксимации не превышает уровня 10^{-5} (для квадратичной параболы 10^{-4}).

Искомая поверхность, построенная в среде Mathcad, в наглядном и удобном для обозрения и анализа виде представлена на рис. 3 а, при этом угол обзора и масштаб могут изменяться в нужном соотношении. Самое же главное заключается в том, что при такой аппроксимации имеется возможность определять значения поля в любой точке охватываемой массивом зоны, при любом режиме работы машины, задаваясь координатами и величиной нагрузки. Отпадает, в частности, необходимость в приближенном расчете по эмпирическим формулам потока рассеяния в различных зонах магнитной цепи (пазового, между магнитами или коронками зубцов), а требуемое в расчете машины значение магнитного потока – в воздушном зазоре, в пазовой зоне якоря, в ярме и т.д. определять на основе результатов моделирования. Например, для режима номинальной нагрузки рассмотренного генератора СГПМ 20–125 при реальной плотности номинального тока обмотки якоря $j = 3 \text{ А/мм}^2$ среднее значение магнитного потока в области пазово-зубцовой зоны от коронок зубцов до верха пазов составляет $\Phi = 5,17 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$, что непосредственно использовано при расчете числа последовательно соединенных витков фазы статора для обеспечения заданного напряжения на выходе генератора.

Следует подчеркнуть, что данная программа аппроксимации реализуется для любой исследованной зоны магнитной цепи, достаточно в массив Z ввести варьируемые параметры x (в линейных размерах или относительных единицах) и y (в размерности плотности тока, А/мм^2), при этом и число столбцов, и число строк должно быть не менее трех.

Подобные построения для примера выполнены и для поля в зоне замыкания потоков рассеяния между магнитами (рис. 1 б). В массив внесены результаты измерений магнитного потока в трех уровнях от торца магнита вплоть до середины зубца (здесь расстояния указаны в относительных единицах от торцевой грани магнита) при тех же значениях плотности тока:



a

б

Рис. 3

$$Z := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2.5 & 3 & 5 & 7.5 \\ 0.05 & 1.97 \cdot 10^{-4} & 3.1 \cdot 10^{-4} & 3.04 \cdot 10^{-4} & 3.27 \cdot 10^{-4} & 3.36 \cdot 10^{-4} \\ 0.15 & 1.78 \cdot 10^{-4} & 2.46 \cdot 10^{-4} & 2.55 \cdot 10^{-4} & 2.81 \cdot 10^{-4} & 3 \cdot 10^{-4} \\ 0.5 & 1.44 \cdot 10^{-4} & 2.5 \cdot 10^{-4} & 2.68 \cdot 10^{-4} & 3.7 \cdot 10^{-4} & 5 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Для кубической параболы (7) определены значения постоянных коэффициентов $a = 0,041927; 0,045593; 0,054613; -0,067088; -0,025501; 0,001964; 0,040412;$

$0,010725; -0,001328; 0,000052$

(9)

и построена поверхность (рис. 3 б), включающая спектр значений магнитного потока рассеяния в рассматриваемой зоне.

Построенная поверхность точно отражает количественную сторону потока рассеяния, представленного на рис. 1 б при наличии зубцов в межполюсном пространстве. Как видно, по мере распространения волны поля от торца магнита в межполюсное пространство величина этого потока неуклонно возрастает и достигает наибольшего значения в центре зубца, и происходит это как за счет ответвления сюда части потока рассеяния через коронки зубцов якоря, так и за счет «выдавливания» в зону зубца ротора основного магнитного потока, замыкающегося через ярмо ротора. При этом плавный изгиб поверхности, наиболее проявляемый в зоне зубца по мере увеличения нагрузки, подчеркивает усиление рассматриваемых потоков в этом процессе.

Это обстоятельство весьма убедительно подтверждает способность предложенных уравнений аппроксимации достаточно точно отражать результаты моделирования магнитного поля в программе ELCUT, которая, в свою очередь, наглядно представляет и общую картину поля, и его количественные параметры. Ясно, что предложенные уравнения способны реализовать результаты решений уравнений поля и в любых других программах, важно только обеспечить соответствие результатов моделирования и реальных процессов, что может составить предмет дальнейших исследований.

Картина распределения волны магнитного поля в магнитопроводе электрических машин, независимо от способа создания этого поля, имеет, как правило, сходный характер; на поверхности полюса она определяется конфигурацией полюсного наконечника, в воздушном зазоре и сердечнике имеют место затухание и искажение, обусловленное сложной структурой магнитной цепи. Поэтому можно описанный подход к аппроксимации картины поля расширить на ряд электрических машин, имеющих сходные закономерности в распределении полей. При этом задача, как показано далее, реализуется на тех же уравнениях квадратичной или кубической параболических поверхностей, приведенных для СГ СГПМ 20–125, с введением в них поправочных функций, учитывающих разницу в количественных значениях параметров поля.

Здесь такой подход продемонстрирован для аппроксимации картин поля трех СГ с постоянными магнитами, имеющих сходные типы роторов, но различные комбинации геометрических соотношений и номинальных данных – мощности, числа полюсов, напряжения и частоты (табл. 2).

Магнитная система генератора СГПМ 20–125 образована двумя магнитами на одной паре полюсов, а у генераторов СГПМ 2,5–375 и ГСМП 132–18 на два полюса приходится один магнит, т. е. сам магнит образует активный полюс, а второй полюс пассивный, образованный выступающей частью стального магнитопровода.

Таблица 2

Тип СГПМ	P_1 , кВт	$2p$	n , об/мин	f , Гц	U_ϕ , В	I_1 , А	Геометрические размеры, D_i, L_i , мм
СГПМ 20 - 125	20	48	125	50	270	25,6	630, 200
СГПМ 2,5 - 375	2,5	18	375	50	127	7,54	209, 60
ГСМП 132 - 18	4,0	18	750	125	320	7,32	132, 176

На рис. 4 в том же порядке, как и в табл. 2, представлены элементы магнитопроводов названных машин и картины поля, реализованные в среде ELCUT. Здесь же построены графики распределения магнитной индукции по центру воздушного зазора и приведены полные магнитные потоки Φ_δ .

Общим для всех кривых $B = f(L)$ являются весьма заметные пульсации магнитной индукции, связанные с неравномерностью зазора, при этом ее отклонения от среднего значения $B_{\text{ср}} \approx 0,82.. 0,95$ Тл достигают 25...30 % , что было отмечено выше, в прямой зависимости от конфигурации магнитной цепи. Ясно, что величина магнитного потока для каждого генератора определяется геометрией полюсного деления.

Кроме того, для всех рассматриваемых машин проведены измерения магнитного поля в пазово-зубцовой зоне на одинаковых относительных расстояниях от расточки и при тех же значениях плотности тока в обмотках якоря, которые приняты первоначально для генератора СГПМ 20 – 125. Для учета влияния реакции якоря характер нагрузки у каждого из названных генераторов определен; у первого нагрузка чисто активная ($\cos\varphi = 1, \varphi = 0$), у второго – активно-индуктивная ($\cos\varphi \approx 0,8, \varphi \geq 0$), у третьего – активно-емкостная ($\cos\varphi \approx 0,8, \varphi \leq 0$).

Все данные измерений потока записываются в соответствующих массивах: Z125 (для СГПМ 20–125); Z375 (для СГПМ 2,5–375); Z750 (для ГСМП 132–18).

Уравнения аппроксимации также представляются в виде квадратичной

$$B(I, h) = c_{10} \cdot I^2 + c_{11} \cdot I \cdot h + c_{12} \cdot h^2 + c_{13} \cdot I + c_{14} \cdot h + c_{15} \quad (10)$$

или кубической

$$B(I, h) = b_0 \cdot I^3 + b_1 \cdot I^2 \cdot h + b_2 \cdot I \cdot h^2 + b_3 \cdot h^3 + b_4 \cdot I^2 + b_5 \cdot I \cdot h + b_6 \cdot h^2 + b_7 \cdot I + b_8 \cdot h + b_9 \quad (11)$$

параболическими зависимостями.

Постоянные коэффициенты c и b в этих уравнениях определены для матрицы Z125 и имеют следующие значения:

$$c_{1n} = \left\{ -7,6 \cdot 10^{-6}; -6,3 \cdot 10^{-6}; 1,1 \cdot 10^{-6}; -1,414 \cdot 10^{-4}; -3,63 \cdot 10^{-5}; 6,165 \cdot 10^{-3} \right\}$$

$$b_n = \left\{ -5,12 \cdot 10^{-7}; -1,23 \cdot 10^{-7}; -3,01 \cdot 10^{-7}; -0,79 \cdot 10^{-7}; -5,93 \cdot 10^{-7}; -1,46 \cdot 10^{-5}; -3,93 \cdot 10^{-6}; -1,43 \cdot 10^{-4}; -4,96 \cdot 10^{-5}; -6,15 \cdot 10^{-3} \right\}.$$

Поверхность магнитных потоков в пазово-зубцовой зоне СГ СГПМ 20–125, построенная по уравнению (7), была показана на рис. 3 а. Решение этих уравнений для матриц Z375 и Z750 производится с введением поправочной функции

$$Pr(I, h, N) = \left(1,52 - 4,57 \cdot 10^{-3} \cdot N + 3,67 \cdot 10^{-6} \cdot N^2 \right) \cdot e^{(3I^2 + I \cdot h) (1,4 - 0,0136 \cdot N + 1,92 \cdot 10^{-5} \cdot N^2)} 10^{-3}, \quad (12)$$

представляющей собой произведение полинома второй степени на экспоненту, полученную методом наименьших квадратов при реализации промежуточного массива параметров, как результата деления базовой (Z125) матрицы на текущую матрицу (например, на Z375).

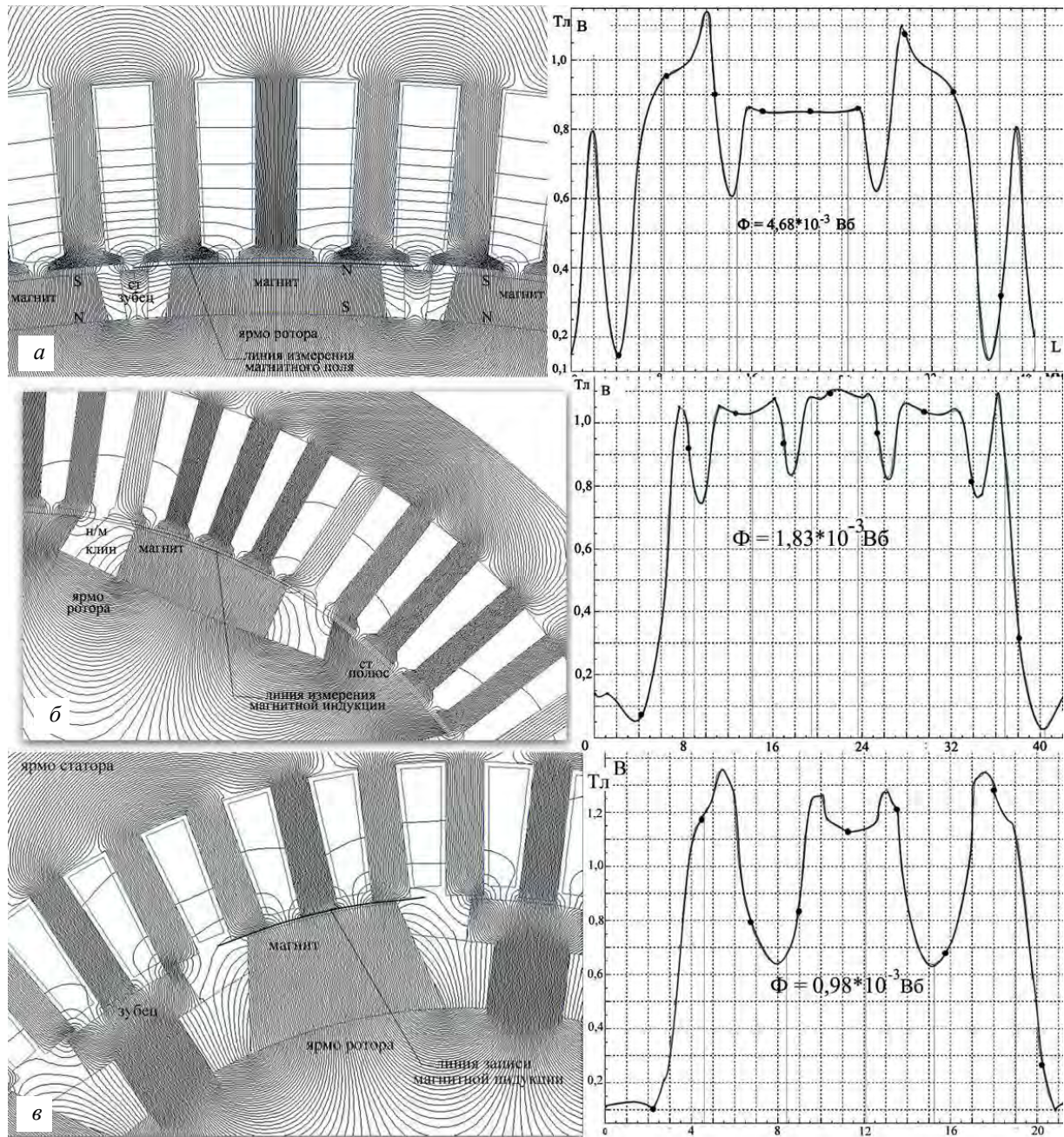


Рис. 4

Таким образом, решение уравнений аппроксимации для матриц Z_{375} и Z_{750} производится по соотношениям

$$B(I, h) = \text{Pr}(I, h, N) \cdot (I, h), \quad (13)$$

при этом при решении задачи для определенного генератора, например, СГПМ 2,5–375, параметрам Z и N необходимо присвоить значения $Z = 375$, $N = 375$, а для ГСМП 132–18 соответственно $Z = 750$, $N = 750$.

Погрешность Δ по результатам аппроксимации рассчитывается по соотношению

$$\Delta_{i,j} = B(Z_{0,j}, Z_{i,0}) - Z_{i,j} \quad (14)$$

и также представляется в матричной форме для каждого значения магнитного потока, входящего в исходную матрицу (в данном случае Z_{125}):

$$\Delta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2.583 \times 10^{-5} & -5.419 \times 10^{-5} & -3.18 \times 10^{-5} & 1.999 \times 10^{-5} & 1.509 \times 10^{-4} \\ 0 & 3.703 \times 10^{-5} & 3.062 \times 10^{-6} & 7.651 \times 10^{-6} & 3.944 \times 10^{-5} & 1.597 \times 10^{-4} \\ 0 & 4.364 \times 10^{-5} & 1.214 \times 10^{-5} & 7.982 \times 10^{-6} & 4.777 \times 10^{-5} & 1.624 \times 10^{-4} \\ 0 & 3.601 \times 10^{-5} & 7.295 \times 10^{-6} & 4.113 \times 10^{-6} & 3.769 \times 10^{-5} & 1.278 \times 10^{-4} \\ 0 & 2.421 \times 10^{-5} & 4.636 \times 10^{-6} & -1.149 \times 10^{-5} & 1.121 \times 10^{-5} & 8.706 \times 10^{-5} \\ 0 & 1.471 \times 10^{-5} & 9.849 \times 10^{-7} & -7.309 \times 10^{-6} & 5.034 \times 10^{-6} & 5.783 \times 10^{-5} \\ 0 & 1.13 \times 10^{-5} & 2.566 \times 10^{-6} & -4.863 \times 10^{-6} & 1.822 \times 10^{-6} & 3.997 \times 10^{-5} \\ 0 & 1.219 \times 10^{-5} & 8.613 \times 10^{-6} & 1.535 \times 10^{-5} & 7.327 \times 10^{-6} & 2.453 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

Из матрицы Δ видно, что погрешность для основной массы параметров магнитного поля СГ типа ГСМП 132–750 не превышает 1 %, за исключением нескольких значений потока при трехкратной перегрузке машины (столбец при $j = 10 \text{ A/mm}^2$).

Трехмерное представление поверхности основного магнитного потока в активной части якоря каждого из трех рассматриваемых генераторов показано на рис. 5 (левые графики), где также приведены и картинки потоков рассеяния между полюсами ротора этих генераторов (правые графики), рассчитанные на тех же уравнениях (9)...(13) и реализующие соответствующие матрицы ZR125, ZR375 и ZR750. Для примера приведем матрицу ZR750 и погрешности ее аппроксимации.

Во всех расчетах погрешности аппроксимации укладываются в основной части массивов в пределы от 1 до 1,5 % и только для отдельных значений потока достигают 2,4 %, что следует считать вполне приемлемым для практических расчетов:

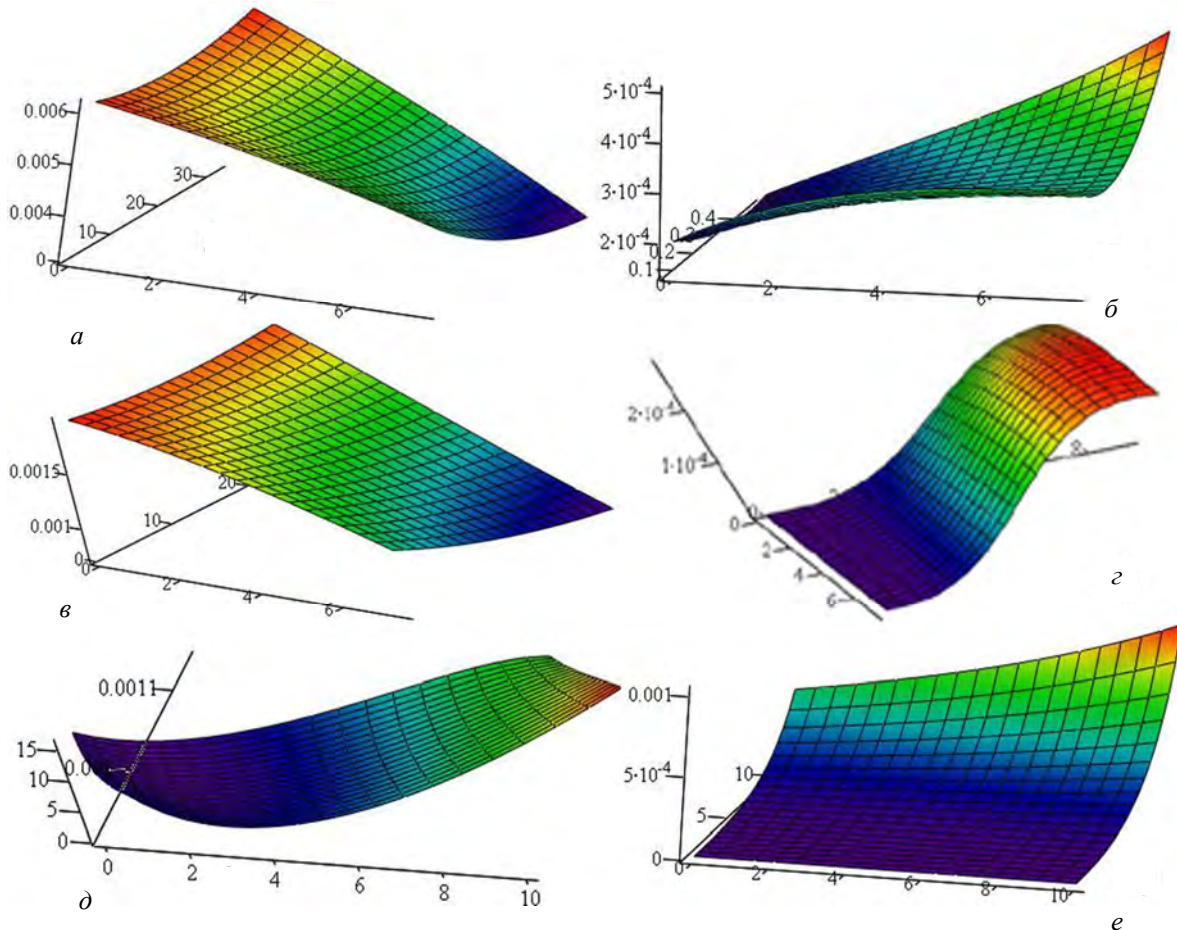


Рис. 5

$$\mathbf{ZR750} := \begin{pmatrix} \text{"y|x"} & 0 & 2.5 & 5 & 7 & 10 \\ 0 & 0.026 \cdot 10^{-3} & 0.038 \cdot 10^{-3} & 0.0195 \cdot 10^{-3} & 0.0175 \cdot 10^{-3} & 0.0125 \cdot 10^{-3} \\ 1.2 & 0.038 \cdot 10^{-3} & 0.047 \cdot 10^{-3} & 0.0527 \cdot 10^{-3} & 0.0503 \cdot 10^{-3} & 0.039 \cdot 10^{-3} \\ 3.6 & 0.048 \cdot 10^{-3} & 0.0518 \cdot 10^{-3} & 0.0572 \cdot 10^{-3} & 0.065 \cdot 10^{-3} & 0.064 \cdot 10^{-3} \\ 6 & 0.145 \cdot 10^{-3} & 0.137 \cdot 10^{-3} & 0.096 \cdot 10^{-3} & 0.083 \cdot 10^{-3} & 0.082 \cdot 10^{-3} \\ 9 & 0.165 \cdot 10^{-3} & 0.157 \cdot 10^{-3} & 0.126 \cdot 10^{-3} & 0.098 \cdot 10^{-3} & 0.094 \cdot 10^{-3} \\ 10.8 & 0.161 \cdot 10^{-3} & 0.155 \cdot 10^{-3} & 0.141 \cdot 10^{-3} & 0.1 \cdot 10^{-3} & 0.098 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Погрешность для ZR750 приведена в массиве Δ :

$$\Delta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2.5862 \times 10^{-5} & -3.7793 \times 10^{-5} & -1.9257 \times 10^{-5} & -1.724 \times 10^{-5} & -1.2215 \times 10^{-5} \\ 0 & -3.7596 \times 10^{-5} & -4.6211 \times 10^{-5} & -5.1417 \times 10^{-5} & -4.8496 \times 10^{-5} & -3.6081 \times 10^{-5} \\ 0 & -3.8195 \times 10^{-5} & -3.7356 \times 10^{-5} & -3.7141 \times 10^{-5} & -3.9374 \times 10^{-5} & -2.7296 \times 10^{-5} \\ 0 & -9.524 \times 10^{-5} & -7.1188 \times 10^{-5} & -1.0736 \times 10^{-4} & 2.1497 \times 10^{-5} & 6.0501 \times 10^{-5} \\ 0 & 5.3037 \times 10^{-5} & 1.1206 \times 10^{-4} & 2.0591 \times 10^{-4} & 2.9654 \times 10^{-4} & 4.2468 \times 10^{-4} \\ 0 & 3.1025 \times 10^{-4} & 4.1138 \times 10^{-4} & 5.4395 \times 10^{-4} & 7.0388 \times 10^{-4} & 9.4242 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

В заключение отметим, что рассмотренные на примерах магнитоэлектрических синхронных генераторов подходы к моделированию картины магнитного поля, уравнения для описания его пространственного распределения и способы их решения могут быть распространены и на любые другие электротехнические или электромеханические устройства.

1. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
2. Олейников А.М., Канов Л.Н. Исследование режимов маломощного генератора с постоянными магнитами методом схемного моделирования // Вестн. СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2007. – Вып. 80. – С. 29–34.
3. ELCUT. Программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. <http://elcut.ru/>

УДК 621.318.1

О.М. Олейников¹, докт. техн. наук., О.П. Нікітін², канд. техн. наук, О.І. Зарицька³, асп., М.В. Приймак⁴, асп.

1, 2 – Севастопольський нац. техн. ун-т,

вул. Університетська, 33, Севастополь, 99053, Україна

3 – Одеський нац. морський ун-т, вул. Мечникова, 34, Одеса, 65029, Україна;

4 – Ін-т електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Апроксимація закону розподілу магнітного поля в синхронному генераторі з постійними магнітами

На прикладах різних синхронних генераторів з постійними магнітами показано можливість апроксимації картин розподілу магнітного поля в різних зонах магнітного ланцюга електричної машини, побудованих у сучасних програмах моделювання таких полів. Бібл. 3, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова: синхронний, багатополосний, генератор, магнітне коло, обмотка, гармоніки, магніти, потік, індукція, моделювання.

O.M. Oleynykov¹, O.P. Nikitin¹, O.I. Zarytsca³, M.V. Pryimak⁴

1, 2 – Sevastopol National Technical University,

University st., 33, Sevastopol, 99053, Ukraine

3 – Odesa National Maritime University, Mechnikov st., 34, Odesa, 65029, Ukraine

4 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Approximation of law of magnetic field distribution in synchronous generator with permanent magnets

As the examples of the various synchronous generators with permanent magnets which models were built in modern programs for field distribution modeling the possibility of the approximation of the magnetic field distribution in different branches of the magnetic circuit of electric machine was shown. References 3, figures 5, tables 2.

Key words: synchronous, multipolar, generator, magnetic circuit, winding, harmonic components, magnets, flow, induction, simulation.

Надійшла 22.02.2012

Received 22.02.2012