

УДК 621.313

МИНИМИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ИНДУКЦИИ ДЛЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ИНДУКТОРОМ, НАМАГНИЧЕННЫМ ПО СХЕМЕ ХАЛЬБАХА

А. Б. Захаренко, Н. А. Белокурова, К. С. Осикова

Сборки постоянных магнитов, известные как массивы Хальбаха, применяются во многих электротехнических устройствах, в том числе электрических машинах. В современных электроприводах, где требуется минимизация массы электромашин, насыщение магнитной системы весьма распространено. Однако зависимости электродвижущей силы и напряжения от угловой координаты должны стремиться к синусоидальным. Предложен алгоритм минимизации коэффициента несинусоидальности зависимости радиальной составляющей магнитной индукции в зазоре магнитоэлектрической машины при насыщении магнитной системы статора от координаты x . Этот алгоритм использует результаты расчета двумерной математической модели магнитного поля, созданной методом конечных элементов, и метод быстрого преобразования Фурье. С помощью этого алгоритма получен наилучший вариант ширины постоянных магнитов в схеме Хальбаха индуктора магнитоэлектрической машины, позволяющий уменьшить коэффициент несинусоидальности по индукции по сравнению с неоптимизированным вариантом более чем на 40%.

Ключевые слова: быстрое преобразование Фурье, схема Хальбаха, магнитная индукция.

Во многих электротехнических устройствах, в том числе электромашин, применяются сборки постоянных магнитов, известные как массивы Хальбаха. Их основными свойствами являются: усиление магнитного поля на одной стороне сборки, при этом на другой стороне сборки поле практически отсутствует; следствие первого свойства: для ряда приводов (например, торцевых электромашин) можно спроектировать электрическую машину вообще без стальных сердечников [1].

Однако, для насыщенной магнитной системы статора, ротора, или статора и ротора в целом зависимость радиальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре от угловой координаты несинусоидальна, имеет обширный гармонический состав. Следует отметить, что для современных электроприводов, где требуется минимизация массы электромашин, насыщение магнитной системы весьма распространено. Применение сборки Хальбаха обычно позволяет повысить максимальную индукцию в воздушном зазоре до 1,5 Тл, то есть примерно в 1,5 раза по сравнению с индукциями 0,9 Тл в классических электромашин. Соответственно, индукции в магнитной системе также необходимо повысить, что приводит к перенасыщению. Зависимости электродвижущей силы и напряжения от угловой координаты в этом случае содержат большое количество высших гармоник. Для электрогенераторов, работающих параллельно с сетью, это недопустимо, а для электродвигателей – нежелательно.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой междуфазного (фазного) напряжения k_U по ГОСТ 13109-97 [2] определяется формулой:

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} U_v^2}}{U_1} 100\%, \quad (1)$$

где U_1 – действующее значение напряжения основной частоты; U_v – действующее значение v -й гармоники напряжения.

Аналогичным образом можно ввести коэффициент k_B несинусоидальности кривой магнитной индукции, перейдя для упрощения к рассмотрению амплитудных значений индукций от действующих значений:

$$k_B = \frac{\sqrt{\sum_{v=2} B_v^2}}{B_{\text{осн}}} 100\%, \quad (2)$$

где $B_{\text{осн}}$ – амплитудное значение основной гармоники магнитной индукции; B_v – амплитудное значение v -й гармоники магнитной индукции. Чем больше значение полученного коэффициента, тем менее синусоидально поле магнитной индукции, тем больше магнитные вибрации и шум электрической машины, спектр магнитной индукции которой подвергается исследованию.

Гармонический состав зависимости $B_y(x)$ может быть получен с использованием алгоритма ускоренного вычисления дискретного преобразования Фурье (быстрого преобразования Фурье – БПФ, (англ. Fast Fourier Transform – FFT)). Для минимизации получения лишних гармоник искомого спектра БПФ и искажения амплитуд гармоник рекоменду-

ется [3] исследовать полученную численно функцию, имеющую, по крайней мере, один период.

Целью статьи является минимизация коэффициента несинусоидальности кривой магнитной индукции путем подбора ширины постоянных магнитов в сборке Хальбаха при наличии насыщенного статора электромашин.

Рассмотрим эту задачу на примере магнитоэлектрической машины с числом полюсов ротора $2p \geq 6$, числом пазов (зубцов) статора $Z \geq 9$ сравнительно большого диаметра, когда кривизна статора и ротора практически не влияют на распределение магнитной индукции. Эскиз поперечного сечения электромашин изображен на рис. 1. При наличии намагниченных по схеме Хальбаха постоянных магнитов ротора магнитного ярма не требуется. Для снижения потерь от высших гармоник в роторе вал может быть выполнен из неэлектропроводного композитного материала, либо композитного материала с очень высоким удельным электрическим сопротивлением. Материал постоянных магнитов ротора NdFeB марки N40UH, статор шихтован из отечественной электротехнической стали 2212. По направлению вектора намагниченности выделено три вида постоянных магнитов: с радиальной намагниченностью M1, тангенциальной намагниченностью M3 и намагниченностью под углом 45° к вышеперечисленным M2. Важными для моделирования являются следующие размеры магнитной системы: полюсное деление ротора τ , ширина и высота постоянных магнитов $b_{M1}, b_{M2}, b_{M3}, h_M$, воздушный зазор между статором и ротором δ . Следует отметить, что ширина постоянных магнитов определялась в их среднем сечении, которое показано штриховой линией на рис. 1. Паза статора показаны на рис. 1 схематично для обозначения t_z и $b_{ш}$.

Задачей расчетной модели является анализ влияния насыщения статора на гармонический состав индукции в воздушном зазоре $B_y(x)$ при различной геометрии постоянных магнитов ротора.

Расчетная модель и алгоритм расчета. Для получения общей математической модели для целого ряда электромашин (рис. 2) пренебрегаем кривизной статора и ротора (рис. 1), развернув статор и ротор вдоль оси x (рис. 2). Паза статора в математической модели учитываются коэффициентом воздушного зазора (коэффициентом зубчатости) [4] k_δ :

$$\delta_1 = k_\delta \cdot \delta, \quad (3)$$

где

$$k_\delta = \frac{t_z}{t_z - \frac{\delta(b_{ш} / \delta)^2}{5 + b_{ш} / \delta}}; \quad (4)$$

$b_{ш}$ – ширина шлица паза статора; t_z – зубцовое деление статора.

При этом ширины и высота постоянных магнитов $b_{M1}, b_{M2}, b_{M3}, h_M$ в математической модели (рис. 2) не изменяются по сравнению с рис. 1, а воздушный зазор между статором и ротором δ_1 определяется формулой (3).

Двумерная расчетная модель (рис. 2) построена с использованием метода конечных элементов. При построении расчетной модели установлены следующие граничные условия:

- за границы отрезков A_1A_2 и A_3A_4 магнитное поле не выходит (векторный магнитный потенциал равен нулю);
- магнитные индукции на отрезках A_1A_4 и A_2A_3 равны.

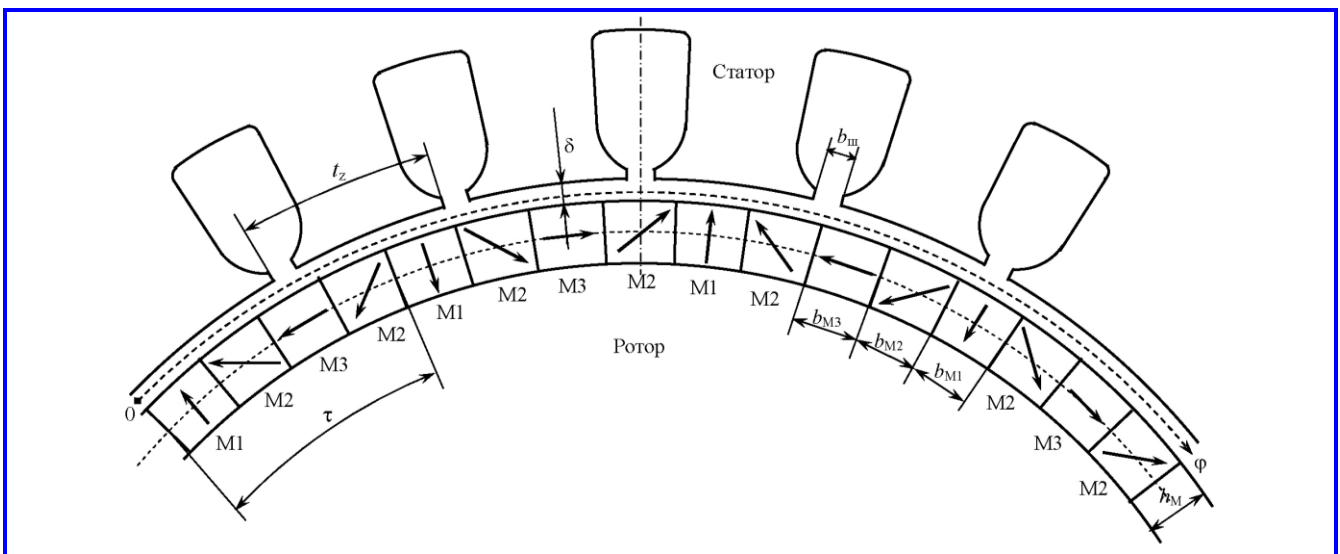


Рис. 1. Окрестность воздушного зазора многополюсной магнитоэлектрической машины с векторами намагниченности постоянных магнитов, направленными по схеме Хальбаха

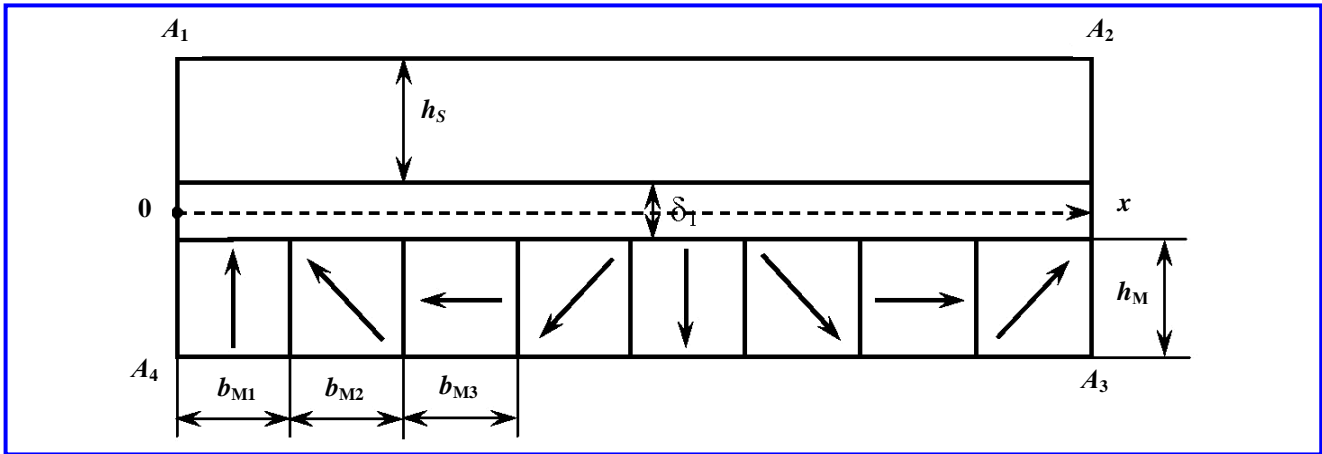


Рис. 2. Эскиз расчетной модели многополюсной магнитоэлектрической машины с векторами намагниченности постоянных магнитов, направленными по схеме Хальбаха

Расчет проводился в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Расчет поля магнитной индукции, БПФ и k_B для исходного варианта без насыщения, $b_{M1} = b_{M2} = b_{M3}$.
2. Уменьшение h_s для получения требуемого насыщенного значения магнитной индукции. Например, для стали 2212 насыщенное значение индукции более 2,5 Тл.
3. Расчет поля магнитной индукции, БПФ и k_B для полученного варианта с насыщением, $b_{M1} = b_{M2} = b_{M3}$.
4. Перебор возможных вариантов b_{M1} , b_{M2} , b_{M3} , при $\tau = \text{const}$. Расчет поля магнитной индукции, разложение в гармонический ряд при помощи БПФ и расчет k_B для каждого варианта.
5. Выявление варианта с минимальным k_B .

Результаты расчетов. Расчеты проводились для высоты постоянных магнитов $h_M = 6$ мм, воздушного зазора $\delta_1 = 1$ мм, $\tau = 16$ мм и трех случаев, описанных в табл. 1. При этом насыщение магнитной системы статора моделировалось изменением высоты статора h_s : для случая «а» насыщение статора практически отсутствует, для случаев «б», «в» – насыщение статора есть, $B_{\text{max}} = 2,89$ Тл.

На рис. 3 приведены результаты расчета поля магнитной индукции B для трех рассматриваемых случаев.

Полученные при этом зависимости радиальной составляющей магнитной индукции B_y (сплошная линия) от координаты x показаны на рис. 4. Два периода зависимости показаны для удобства обозрения.

С использованием быстрого преобразования Фурье был получен гармонический состав этих зависимостей. Первые гармонические составляющие (пунктирная линия) приведены на рис. 4, a , наиболее значимые высшие гармонические составляющие сведены в табл. 2, следующие гармоники практически отсутствуют.

Таблица 1

Условия математического эксперимента для трех расчетных случаев

<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>
Насыщения статора нет	Насыщение статора есть, оптимизации нет	Насыщение статора есть, оптимизация есть
$b_{M1} = 4 \text{ мм} = 0,25\tau$, $b_{M2} = 4 \text{ мм} = 0,25\tau$, $b_{M3} = 4 \text{ мм} = 0,25\tau$, $h_s = 9 \text{ мм}$	$b_{M1} = 4 \text{ мм} = 0,25\tau$, $b_{M2} = 4 \text{ мм} = 0,25\tau$, $b_{M3} = 4 \text{ мм} = 0,25\tau$, $h_s = 1 \text{ мм}$	$b_{M1} = 6,3 \text{ мм} = 0,39\tau$, $b_{M2} = 4,3 \text{ мм} = 0,27\tau$, $b_{M3} = 1,1 \text{ мм} = 0,07\tau$, $h_s = 1 \text{ мм}$

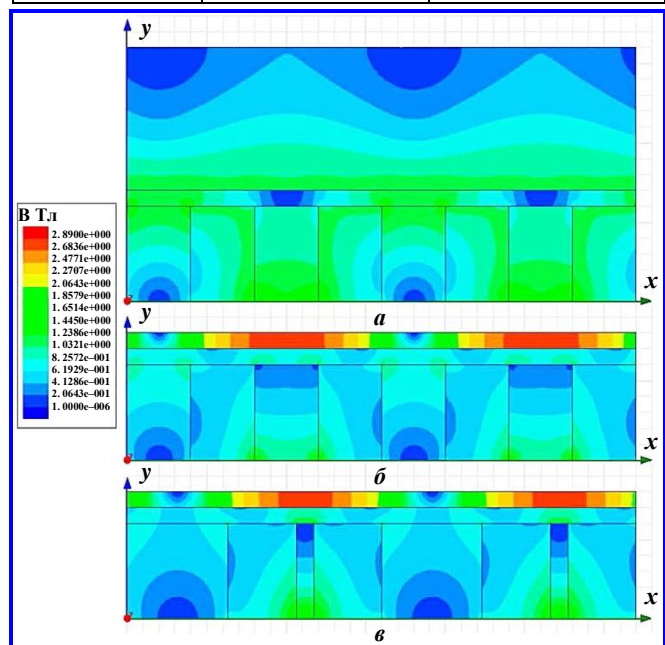


Рис. 3. Картина поля магнитной индукции B для трех случаев: насыщения статора нет (*a*); насыщение статора есть, оптимизации нет (*б*); насыщение статора есть, оптимизация есть (*в*)

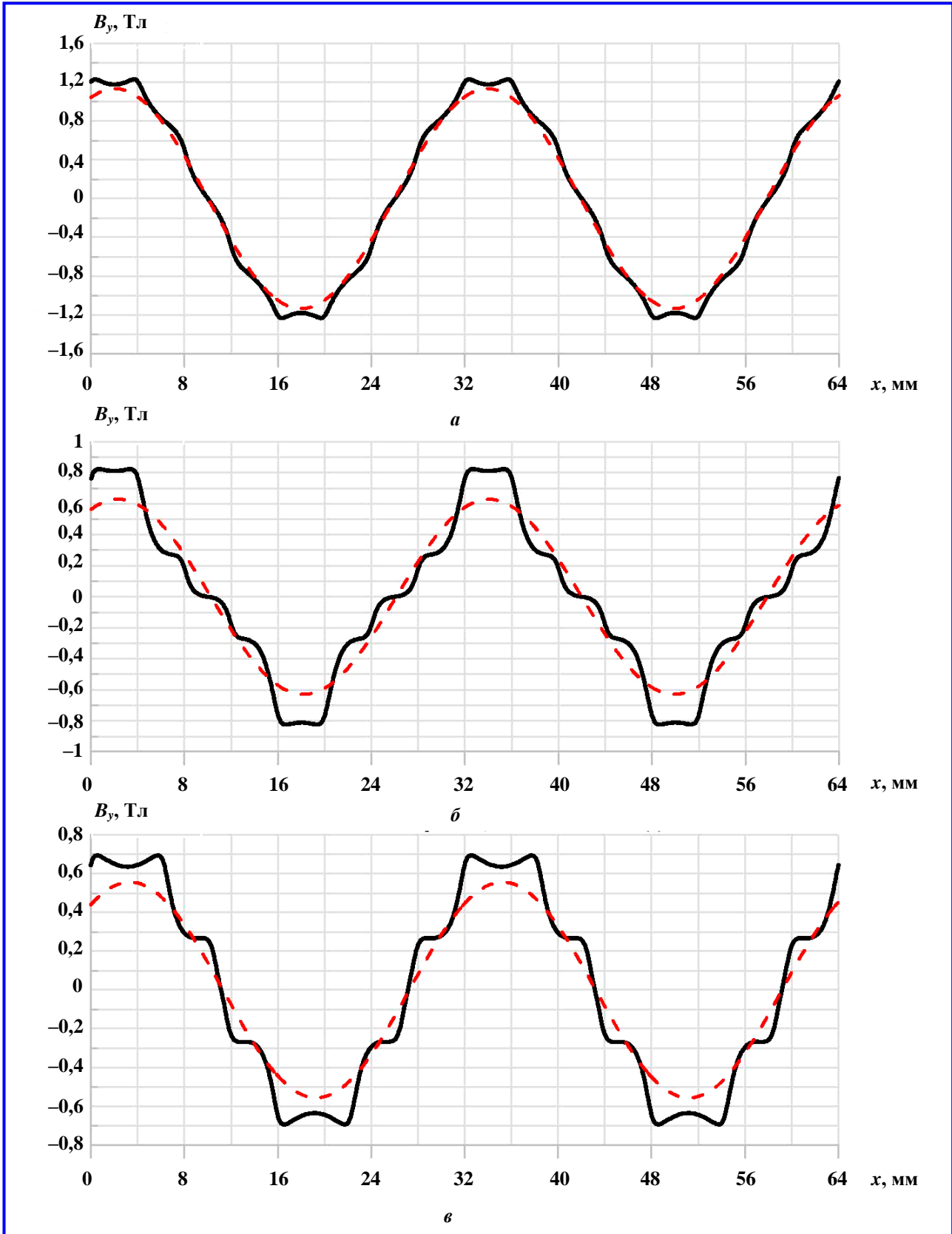


Рис. 4. Зависимости составляющей магнитной индукции B_y (сплошная линия) и её первой гармонической (пунктирная линия) от координаты x : *a* – насыщения статора нет; *b* – насыщение статора есть, оптимизации нет; *v* – насыщение статора есть, оптимизация есть

Таблица 2

Гармонический состав и коэффициент несинусоидальности зависимости $B_y(x)$ при $\tau = 16$ мм

Условия математического эксперимента	Насыщения статора нет (<i>a</i>)	Насыщение статора есть $B_{\max} = 2,89$ Тл, оптимизации нет (<i>b</i>)	Насыщение статора есть $B_{\max} = 2,89$ Тл, оптимизация есть (<i>e</i>)
Фаза гармоники ν , мм	$B_{y\nu}$, Тл	$B_{y\nu}$, Тл	$B_{y\nu}$, Тл
31,25*	1,134358	0,628870	0,556201
93,75	0	0,060461	-0,002459
156,25	0	-0,014888	0,004378
218,75	0,000101	0,007230	0,034187
281,25	0,055613	0,061155	0,022565
343,75	0	0,0021334	0,009235
468,75	0	0	0,011300
531,25	0	0,012244	0
k_B	4,90%	14,05%	7,84%

*Примечание: основная гармоника $\nu = 1$.

Таблица 3

Гармонический состав и коэффициент несинусоидальности зависимости $B_y(x)$ при $\tau = 80$ мм, $h_M = 30$ мм, $\delta_1 = 5$ мм

Условия математического эксперимента	Насыщения статора нет (<i>a</i>)	Насыщение статора есть, $B_{\max} = 2,81$ Тл, оптимизации нет (<i>b</i>)	Насыщение статора есть, $B_{\max} = 2,88$ Тл, оптимизация есть (<i>e</i>)
		$b_{M1} = 20$ мм = $0,25\tau$, $b_{M2} = 20$ мм = $0,25\tau$, $b_{M3} = 20$ мм = $0,25\tau$, $h_S = 45$ мм	$b_{M1} = 20$ мм = $0,25\tau$, $b_{M2} = 20$ мм = $0,25\tau$, $b_{M3} = 20$ мм = $0,25\tau$, $h_S = 5$ мм
Фаза гармоники ν , мм	$B_{y\nu}$, Тл	$B_{y\nu}$, Тл	$B_{y\nu}$, Тл
6,25*	1,134463	0,628837	0,526732
18,75	0	0,060491	-0,004569
31,25	0	-0,014926	-0,004430
43,75	0,000026	0,007175	0,037541
56,25	0,055934	0,061536	0,018160
68,75	0	0,002143	0,008732
81,25	0	0,00031	-0,001448
93,75	0,011934	0,002012	0,009732
k_B	5,04%	13,98%	8,39%

*Примечание: основная гармоника $\nu = 1$.

Расчет коэффициента несинусоидальности k_B для радиальной (y -й) составляющей магнитной индукции $B_y(x)$ проводился по формуле (2) с учетом наиболее значимых высших гармоник, амплитуда следующих гармоник пренебрежимо мала. Результаты расчета коэффициента несинусоидальности k_B приведены в табл. 2. Оптимизация ширины постоянных магнитов b_{M1} , b_{M2} , b_{M3} проводилась методом перебора возможных вариантов в диапазоне значений: от 0,5 мм до $\tau/2$. В результате найден вариант (*e*) $b_{M1} = 6,3$ мм = $0,39\tau$, $b_{M2} = 4,3$ мм = $0,27\tau$, $b_{M3} = 1,1$ мм = $0,07\tau$, при этом $h_M = 6$ мм = $0,375\tau$, с наименьшим коэффициентом несинусоидальности $k_B = 7,84\%$.

Вариант (*e*) имеет коэффициент несинусоидальности хуже исходного ненасыщенного, однако луч-

ше на 44%, чем у неоптимизированного насыщенного варианта.

Полученные результаты ширины постоянных магнитов в схеме Хальбаха $b_{M1} = 0,39\tau$, $b_{M2} = 0,27\tau$, $b_{M3} = 0,07\tau$, необходимые для минимизации коэффициента несинусоидальности, справедливы также при кратном увеличении размеров модели до 10 раз, то есть для $\tau = 16 - 160$ мм. В качестве примера в табл. 3 приведен гармонический состав зависимости $B_y(x)$ и коэффициенты несинусоидальности при кратном увеличении размеров исходной модели в 5 раз.

Выводы

1. Предложен алгоритм минимизации коэффициента несинусоидальности зависимости радиаль-

ной составляющей магнитной индукции $B_y(x)$ в зазоре магнитоэлектрической машины при насыщении магнитной системы статора ($B_{\max} = 2,89$ Тл), использующий результаты расчета двумерной модели магнитного поля методом конечных элементов и алгоритм быстрого преобразования Фурье.

2. Получен наилучший вариант ширин постоянных магнитов в схеме Хальбаха индуктора магнитоэлектрической машины с $b_{M1} = 0,39\tau$, $b_{M2} = 0,27\tau$, $b_{M3} = 0,07\tau$, $h_M = 0,375\tau$ для $\tau = 16 - 160$ мм, позволяющий уменьшить коэффициент несинусоидальности по магнитной индукции по сравнению с неоптимизированным вариантом более чем на 40%.

Литература

1. Comparative study between interior and surface permanent magnet traction machine designs / Rong Yang, N. Schofield, A. Emadi // 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – Dearborn, MI, USA, 2016. – P. 1–6. – DOI : 10.1109/ITEC.2016.7520249.

2. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие Постановлением Государственного Комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 28 августа 1998 г. № 338 : взамен ГОСТ 13109–87 : дата введения 01.01.1999 / разработан Техническим комитетом по стандартизации в области электромагнитной совместимости технических средств. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1999; Стандартиформ, 2006. – 31 [1] с.

3. Павлейно М. А. Спектральные преобразования в MATLAB : учебно-методическое пособие для вузов / М. А. Павлейно, В. М. Ромаданов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет, 2007. – 160 с.

4. Копылов И. П. Проектирование электрических машин : учебник для бакалавров / И. П. Копылов; ответственный редактор И. П. Копылов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2018. – 767 с.

Поступила в редакцию 18.12.2023

Андрей Борисович Захаренко, доктор технических наук, доцент, начальник отдела, т. 8 (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.

Нина Андреевна Белокурова, кандидат технических наук, начальник сектора, т. (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.

Кристина Сергеевна Осикова, научный сотрудник, аспирант, т. 8 (495) 366-01-47, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

MINIMIZATION OF NON-SINUSOIDAL COEFFICIENT OF INDUCTION FOR MAGNETIC-ELECTRICAL MACHINES WITH THE INDUCTOR MAGNETIZED ACCORDING TO HALBACH SCHEME

A. B. Zakharenko, N. A. Belokurova, K. S. Osikova

Assemblies of permanent magnets known as Halbach arrays are applicable in many electro-technical devices including electrical machines. In the modern electrical drives, where minimization of the electrical machine mass is required, the saturation of magnetic system is highly used. However, dependencies of electromotive force and voltage from angular coordinate shall approach to the sinusoidal. Algorithm of minimization the dependency of non-sinusoidal coefficient of magnetic induction radial component in electrical machine gap during the saturation of stator magnetic system from the x coordinate is presented. The present algorithm is using the results of calculation of the magnetic field two-dimensional mathematical model created by the finite-element method and by the fast Fourier transformation method. The best variant of widths of permanent magnets in Halbach scheme of magneto-electrical machine, which allows reducing non-sinusoidal coefficient as per induction more than 40% in comparison with non-optimized variant, is obtained using the present algorithm.

Key words: Fast Fourier transformation, Halbach scheme, magnetic induction.

References

1. Comparative study between interior and surface permanent magnet traction machine designs / Rong Yang, N. Schofield, A. Emadi // 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – Dearborn, MI, USA, 2016. – P. 1–6. – DOI : 10.1109/ITEC.2016.7520249.

2. GOST 13109– 97. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems: interstate standard: official edition: brought into force by the Order of State Committee of Russian Federation on Standartization, Metrology and Certification No. 338 of 28 August 1998: introduced instead of GOST 12109-87: date of introduction 01.01.1999 / prepared by Technical Committee for Standardization in the Field of Electromagnetic Compatibility. – Moscow: FGUP IPK Standards Publishing House, 1999: Standardinform, 2006. – 31 [1] p.

3. Pavleyno M. A. Spectral transformation in MATLAB: textbook for higher educations institutions/ M. A. Pavleyno, V. M. Romadanov. – Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University, 2007. – 160 p.
4. Kopylov I. P. Designing of electrical machines: textbook for bachelors / I. P. Kopylov; responsible editor. – I. P. Kopylov. – 4th edition, revised and enlarged. – Moscow: Urait Publishing House, 2018. – 767 p.

*Andrei Borisovich Zakharenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of Department, t. 8(495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.*
*Nina Andreevna Belokurova, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Sector,
t. 8 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.*
*Kristina Sergeyevna Osikova, Researcher, Graduate Student,
t. 8 (495) 366-01-47, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.
(JSC «VNIEM Corporation»).*