

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ДВУМЯ ИНДУКТОРАМИ

А. Б. Захаренко, К. С. Осикова

Изложены результаты расчета характеристик электрических машин с разными схемами намагничивания постоянных магнитов. Рассмотрены варианты выполнения роторов синхронных электрических машин с постоянными магнитами с двумя индукторами. При этом проводилось моделирование различных схем намагничивания постоянных магнитов, таких как радиальная схема намагничивания, упрощенная схема Хальбаха и схема Хальбаха для сравнения их характеристик. На графиках представлены расчеты распределения магнитной индукции в воздушном зазоре, вариантов с разными схемами намагничивания постоянных магнитов. Произведено разложение в гармонический ряд зависимости магнитной индукции упрощенной схемы Хальбаха и схемы Хальбаха. Приведены наибольшие по абсолютному значению амплитуды гармоник индукции. Определены коэффициенты искажения синусоидальности индукции для этих вариантов намагниченности постоянных магнитов.

Ключевые слова: электрическая машина, магнитная индукция, постоянный магнит, гармонический ряд, коэффициент искажения синусоидальности, схема Хальбаха.

Введение

В последние годы наметилась тенденция к улучшению удельных показателей электрических машин – мощности и момента. Это улучшение возможно за счет применения новых изоляционных, электропроводящих и магнитных материалов в совокупности с увеличением основных электромагнитных нагрузок – линейной токовой нагрузки и магнитной индукции. В то же время, увеличение магнитной индукции в воздушном зазоре электрической машины возможно также за счет применения конструкций магнитных систем с двумя индукторами, созданных с применением специальных схем расположения векторов намагниченности.

В конструкции электрических машин с двумя индукторами [1], в отличие от традиционных, высококоэрцитивные постоянные магниты расположены на двух индукторах ротора, охватывающих статор (якорь) и с внутренней, и с наружной стороны. Такое исполнение позволяет получить повышенные значения магнитного потока. Кроме того, в процессе работы перемагничиваются только зубцы статора. Ярма ротора не перемагничиваются, поэтому магнитные потери мощности предлагаемой конструкции меньше.

Обмотка статора – зубцовая, то есть каждая катушка обмотки сосредоточена на каждом зубце. Такая обмотка является весьма технологичной. Каждая катушка обмотки наматывается непосредственно на каркас, который также играет роль пазовой изоляции катушки. При этом если катушечная группа состоит из трех катушек, соединенных последовательно и встречно, то в таком случае в отличие от традиционной «всыпной», пазовая изоляция обладает следующими преимуществами:

– увеличивается коэффициент заполнения паза, за

счет чего, в конечном счете, улучшается коэффициент полезного действия (КПД) электрической машины;

– лобовые части обмотки плотно прилегают к зубцу, благодаря чему уменьшается расход обмоточной меди и снижается поток лобового рассеяния;

– улучшается теплопроводность обмотки.

Недостатком зубцовых обмоток являются обусловленные ими пульсации вращающего момента.

Таким образом, характерными конструктивными особенностями предлагаемых электрических машин являются: наличие двух индукторов ротора, обеспечивающих высокую концентрацию магнитного потока, и технологичной катушечной обмотки статора. При векторном управлении двигателем, либо в случае генератора, работающего параллельно с сетью, синусоидальная зависимость электродвижущей силы (ЭДС) от времени позволяет получить наилучшие виброакустические показатели электрической машины и привода в целом. Эти свойства в сочетании с высоким КПД при минимальной массе позволяют достичь наилучших потребительских качеств по сравнению с аналогами, в частности высокого удельного вращающего момента (момента, отнесенного к массе машины) и мощности (мощности, отнесенной к массе машины).

Источником магнитных вибраций являются пульсирующие или вращающиеся магнитные силы и моменты, действующие в воздушном зазоре электрической машины, а также явление магнитострикции. Величину этих сил и моментов определяет гармонический состав магнитной индукции [2], поскольку магнитодвижущая сила (МДС) постоянных магнитов обычно существенно больше МДС обмотки якоря. Магнитный шум является следствием магнитных вибраций. Его уровень зависит от амплитуды частоты и формы колебаний статора, величины и свойств излучающей поверхности.

Критериями качества проектирования магнитной системы электромашины обычно являются:

- 1) простота сборки и намагничивания постоянных магнитов;
- 2) повышенное максимальное значение индукции в воздушном зазоре для улучшения удельных показателей;
- 3) пониженный состав высших гармоник для снижения вибраций и шумов.

Целью работы является выбор наилучшей магнитной системы электрической машины с двумя индукторами.

Задачами работы являются:

- расчет магнитного поля ряда конфигураций магнитной системы с двумя индукторами;
- анализ магнитных систем на предмет технологичности, наибольшего значения индукции и наименьшего гармонического состава.

Для выбора наилучшей магнитной системы проведем сравнение результатов расчета магнитного поля трех вариантов магнитных систем:

- 1) постоянные магниты ротора с радиальной намагниченностью с чередованием полюсов North (N) и South (S), якорь с зубцовой обмоткой, расположенной на T-образных зубцах;
- 2) векторы намагниченности постоянных магнитов ротора расположены по упрощенной схеме Хальбаха, описанной в [3], якорь с зубцовой обмоткой, расположенной на T-образных зубцах;
- 3) векторы намагниченности постоянных магнитов ротора расположены по полной схеме Хальбаха, якорь с зубцовой обмоткой, расположенной на T-образных зубцах.

Ярма роторов с размещенными на них постоянными магнитами расположены с внешней и внутренней стороны от статора. Статор состоит из T-образных зубцов с размещенной на них трехфазной обмоткой, соединенной в звезду. Обмотка фазы состоит из двух катушечных групп по три катушки в каждой.

Конструкция ротора с традиционной намагниченностью (вариант 1) понятна из приведенного описания, а эскизы поперечных сечений магнитных систем электрических машин с двумя индукторами со схемами обмотки якоря по вариантам 2 и 3 приведены на рис. 1.

Двумерная модельная задача решалась с использованием программы FEMM. Нулевое условие Дирихле задано на внешнем диаметре внешнего ротора. Источником магнитного поля являются постоянные магниты неодим – железо – бор (Nd – Fe – В) марки N40 [4].

В качестве примера на рис. 2 показано распределение магнитной индукции в поперечном сечении магнитной системы электромашины с радиально намагниченными постоянными магнитами (вариант 1).

В результате расчетов магнитного поля построены

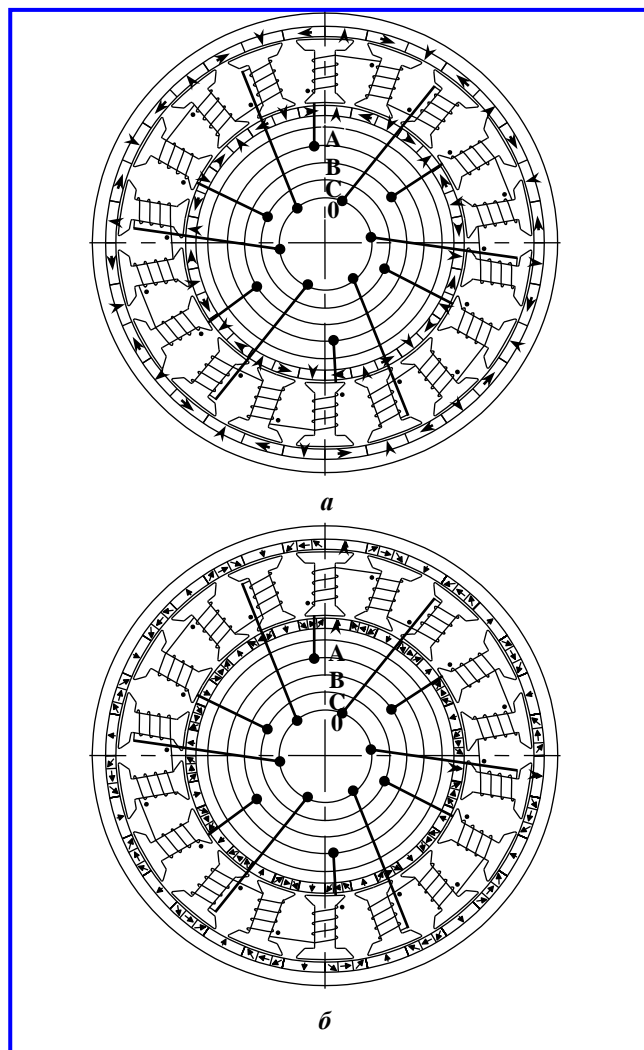


Рис. 1. Поперечные сечения магнитных систем электрических машин с двумя индукторами со схемами обмотки якоря: а – с упрощенной схемой Хальбаха расположения векторов намагниченности (вариант 2); б – с одной из полных схем Хальбаха расположения векторов намагниченности (вариант 3)

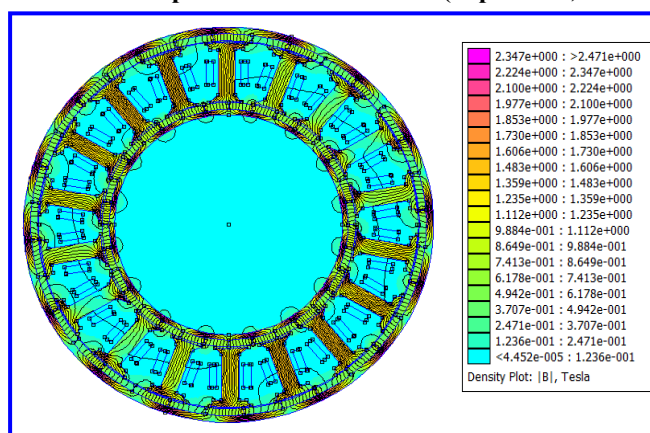


Рис. 2. Распределение магнитной индукции в поперечном сечении магнитной системы электромашины с радиально намагниченными постоянными магнитами (вариант 1)

графики зависимости магнитной индукции от угловой координаты во внешнем воздушном зазоре для рассматриваемых вариантов (рис. 3). Для удобства обозрения приведена только часть зависимостей в интервале $\alpha \in [0 \div 180^\circ]$. Из рис. 3 видно, что амплитудные значения магнитной индукции больше у вариантов 2 и 3 с намагничиванием постоянных магнитов по схеме Хальбаха, они и являются наиболее интересными.

Зависимости магнитной индукции от угловой координаты по вариантам 2 и 3 в интервале $\alpha \in [0 \div 360^\circ]$ разложены в гармонический ряд [5]. На рис. 4 приведен спектр магнитной индукции в электрических машинах с векторами намагниченности постоянных магнитов, расположенных по схеме Хальбаха, где v – номер гармоники.

В таблице приведены наибольшие по абсолютному значению амплитуды гармоник магнитной индукции, то есть, например, для варианта 2:

$$B(\alpha) \approx -0,649\sin(8\alpha) + 0,164\sin(10\alpha) + 0,12\sin(24\alpha) + 0,17\sin(26\alpha) - 0,20\sin(40\alpha). \quad (1)$$

Из анализа рис. 4 и таблицы видно, что восьмая гармоника является основной, ее амплитуда больше на 17% у варианта 3, по второму критерию третий вариант наилучший.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой фазного напряжения по K_U ГОСТ 13109-97 [6] определяется по формуле:

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

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

Аналогичным образом можно ввести коэффициент искажения синусоидальности кривой магнитной индукции K_B , перейдя для упрощения от действующих значений к амплитудным:

$$K_B = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} B_v^2}}{B_{осн}} 100\%, \quad (3)$$

где $B_{осн}$ – амплитудное значение магнитной индукции основной гармоники; B_v – амплитудное значение v -й гармоники магнитной индукции. Чем больше значение полученного коэффициента, тем менее синусоидален исследуемый спектр, тем больше вибрация и шум электрической машины.

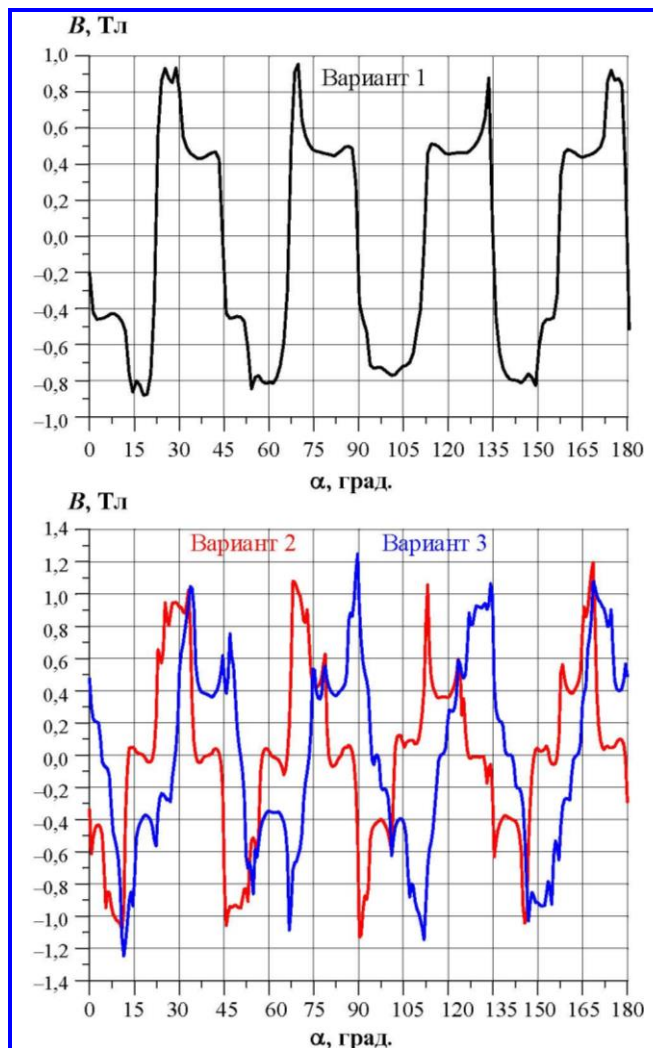


Рис. 3. Графики зависимости магнитной индукции в электрической машине с радиальным вектором намагниченности постоянных магнитов (вариант 1), а также с упрощенной схемой Хальбаха и обычной схемой Хальбаха (варианты 2 и 3) от угловой координаты во внешнем воздушном зазоре

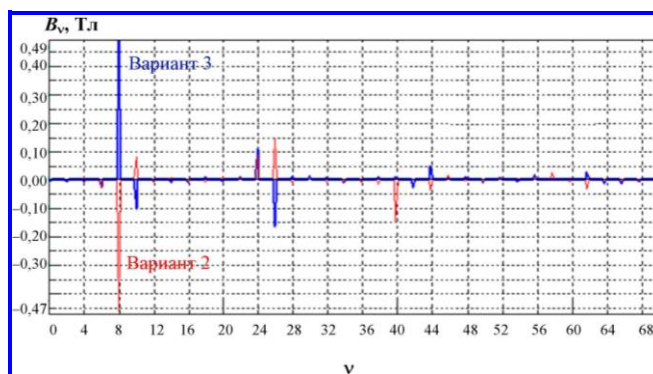


Рис. 4. Спектр магнитной индукции в электрических машинах с векторами намагниченности постоянных магнитов, расположенных по схеме Хальбаха (по вариантам 2 и 3)

Таблица
**Наибольшие по абсолютному значению
 амплитуды гармоник индукции**

№ гармоники, ν	Абсолютные значения амплитуд гармоник, Тл	
	Вариант 2	Вариант 3
8	0,649	0,761
10	0,164	0,175
24	0,12	0,14
26	0,17	0,21
40	0,20	0,05

С учетом наиболее значимых гармоник магнитной индукции, принимая во внимание, что при данном разложении в ряд основная гармоника восьмая, формула (3) примет вид:

$$K_B \approx \frac{\sqrt{B_{10}^2 + B_{24}^2 + B_{26}^2 + B_{40}^2}}{B_8} 100\% . \quad (4)$$

Для варианта 2 коэффициент искажения синусоидальности приблизительно равен 51%, а для варианта 3 – 30%. По третьему критерию третий вариант также наилучший.

Однако более простым при сборке и технологичным при намагничивании является вариант 2 с упрощенной схемой Хальбаха [7]. Для намагничивания ротора по варианту 3 необходимо использовать достаточно сложное намагничивающее устройство, приведенное в патенте [8], при этом результат намагничивания не всегда удовлетворителен.

Выводы

1. Рассмотрены варианты выполнения роторов синхронных машин с постоянными магнитами с двумя индукторами. Получены распределения магнитного поля, графики и спектральные составы индукции в воздушном зазоре для роторов с традиционной сборкой из радиально намагниченных магнитов, упрощенной сборкой Хальбаха и полной сборкой Хальбаха.

2. Установлено, что наиболее перспективными являются варианты ротора с расположением магнитов по схеме Хальбаха. При этом в части технологичности сборки и намагничивания наилучшим является вариант с упрощенной схемой Хальбаха,

а по максимальному значению индукции в воздушном зазоре и пониженному составу высших гармоник в зависимости от значений магнитной индукции от тангенциальной координаты вдоль воздушного зазора наилучшим является вариант с полной схемой намагничивания Хальбаха.

Литература

1. Оптимизация проектирования тихоходного вентильного двигателя с двумя индукторами для привода мотор-колеса / А. Б. Захаренко, А. Ф. Авдонин // Электротехника. – 1999. – № 12. – С. 6 – 13.
2. Вопросы электромеханики. Методы проектирования малошумных электрических машин. Труды НПП ВНИИЭМ / В. А. Воронкин, В. Я. Геча, Э. А. Городецкий [и др.]. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – Т. 103. – 178 с., ил.
3. Патент на изобретение № 2720233 Российская Федерация, МПК H02K 21/12(2006.01), H02K 16/02(2006.01), H02K 1/27(2006.01). Электромашинa с ротором, созданным по схеме Хальбаха : № 2019143132 : заявл. 23.12.2019 : опубл. 28.04.2020 / А. Б. Захаренко, А. К. Надкин, К. С. Осикова, М. Е. Решетников. – Бюл. № 13. – 11 с.
4. Неодимовый магнит диск D19xh10 N40 // ООО «Полимагнит» [сайт]. – 2019. – URL : http://www.ndfeb.ru/catalog/neodymium_magnets (дата обращения: 10.10.2020).
5. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва : Наука, 1981. – 723 с.
6. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : межгосударственный стандарт : издание официальное : дата введения 1999-01-01 / разработан Техническим комитетом по стандартизации в области электромагнитной совместимости технических средств. – Москва : Стандартиформ, 2006. – 31 [1] с.
7. Способы намагничивания и сборки колец Хальбаха роторов синхронных машин / А. Б. Захаренко, А. К. Надкин, К. С. Осикова // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2020. – Т. 175. – № 2 – С. 3 – 7.
8. Патент на изобретение № 2549835 Российская Федерация МПК H01F 13/00(2006.01), H02K 15/03(2006.01). Способ намагничивания ротора электромашин, намагничивающая система для ротора электромашин и способ изготовления ротора электромашин : № 2010142360 : заявл. 18.10.2010 : опубл. 27.04.2015 / Стивенс Ч. М., Уйбер К. Р., Галиото С. Д., Карл Р. Д. мл. ; патентообладатели Дженерал Электрик Компани (US). – Бюл. № 12. – 18 с.

Поступила в редакцию 19.10.2020

*Андрей Борисович Захаренко, начальник отдела, доктор технических наук, доцент, т. (495) 366-26-44.
 Кристина Сергеевна Осикова, аспирант, инженер, т. (495) 366-01-47,
 E-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.
 (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

STUDY OF MAGNETIC SYSTEMS OF ELECTRICAL MACHINES WITH TWO INDUCTORS

A. B. Zakharenko, K. S. Osikova

The article specifies the results of calculation of characteristics of electrical machines with different schemes of magnetization of permanent magnets. Several designs of rotors of synchronous electrical machines with permanent magnets with two inductors have been considered. Modelling of different schemes of magnetization of permanent magnets, such as radial magnetization scheme, simplified Halbach scheme and Halbach scheme, has been performed to compare their characteristics. The calculations of magnetic induction distribution in the air gap for the designs with different permanent magnet magnetization schemes are presented in graphs. Harmonic expansion of the magnetic induction dependence for the simplified Halbach scheme and Halbach scheme has been performed. The amplitudes of induction harmonics with the greatest absolute value are specified. The induction waveform distortion factors for these types of magnetization of permanent magnets have been determined.

Key words: electrical machine, magnetic induction, permanent magnet, harmonic sequence, waveform distortion factor, Halbach scheme.

References

1. Optimization of designing of a low-speed permanent magnet motor with two inductors for motor-wheels drive / A. B. Zakharenko, A. F. Avdonin // Electrical engineering. – 1999. – No. 12. – Pp. 6 – 13.
2. Matters of electromechanics. Methods of designing low-noise electrical machines. NPP VNIIEEM proceedings / V. A. Voronkin, V. Ia. Gecha, E. A. Gorodetskii [et al.]. – Moscow : FSUE ‘NPP VNIIEEM’, 2006. – V. 103. – 178 p., with figures.
3. Patent of invention No. 2720233 Russian Federation, IPC H02K 21/12(2006.01), H02K 16/02(2006.01), H02K 1/27(2006.01). Electrical machine with a rotor developed according to Halbach scheme : No. 2019143132 : appl. 23.12.2019: publ. 28.04.2020 / A. B. Zakharenko, A. K. Nadkin, K. S. Osikova [et al.]. – Bul. No. 13. – 11 p.
4. Neodymium magnet disk D19xh10 N40 // Polymagnet LLC [website]. – 2019. – URL : http://www.ndfeb.ru/catalog/neodymium_magnets (date of access: 10.10.2020).
5. Bronshtein I. N. Mathematics handbook for engineers and students / I. N. Bronshtein, K. A. Semendiaev. – Moscow : Nauka (Science), 1981. – 723 p.
6. GOST 13109-97. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems : interstate standard : official edition : introduction date 1999-01-01 / prepared by Technical Committee for Standardization in the Field of Electromagnetic Compatibility. – Moscow : Standartinform, 2006. – 31 [1] p.
7. Methods of magnetization and assembly of Halbach rings for rotors of synchronous machines / A. B. Zakharenko, A. K. Nadkin, K. S. Osikova // Matters of electromechanics. VNIIEEM proceedings. – Moscow : VNIIEEM Corporation JC, 2020. – V. 175. – No. 2 – Pp. 3 – 7.
8. Patent of invention No. 2549835 Russian Federation, IPC H01F 13/00(2006.01), H02K 15/03(2006.01). Electrical machine rotor magnetization method, magnetizing system for electrical machine rotor and electrical machine rotor manufacturing method : No. 2010142360 : appl. 18.10.2010 : publ. 27.04.2015 / Ch. M. Stephens, K. R. Weeber, S. D. Galioto, R. D. Jr. Carl; patent holder General Electric Company (US). – Bul. No. 12. – 18 p.

*Andrei Borisovich Zakharenko, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Head of Department,
Associate Professor, tel.: +7 (495) 366-26-44.*

*Kristina Sergeevna Osikova, PG Student, Engineer, tel. +7 (495) 366-01-47.
E-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.
(JC «VNIIEEM Corporation»).*