

Аналитическое и численное моделирование магнитоэлектрических вентильных двигателей

АФАНАСЬЕВ А.А., ГЕНИН В.С.

ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

ВАТКИН В.А., ЕФИМОВ В.В., МАЛИНИН А.И., ТОКМАКОВ Д.А.

АО «ЧЭАЗ», Чебоксары, Россия

Предлагается аналитический метод расчёта магнитного поля магнитоэлектрического вентильного двигателя, основанный на разбиении его активной области на совокупность геометрически однородных листов, на границах которых выполняются условия сопряжения их магнитных полей: скалярные магнитные потенциалы и нормальные составляющие магнитной индукции не претерпевают скачка (разрыва). Если же магнитные листы обмоток по соображениям удобства расчёта располагаются на границах указанных листов, то магнитные потенциалы на границах будут иметь скачок на величину полного тока магнитного листа. Для повышения точности расчёта следует увеличивать количество листов (дискретизацию) активной области. При использовании расчётной технологии разделения переменных Фурье условия сопряжения будут сводиться к решению системы линейных уравнений для нахождения соответствующих постоянных Фурье. В качестве источников магнитного поля двигателя помимо постоянных магнитов и токов обмотки статора предлагаются намагниченности ферромагнитных участков его магнитной цепи. Результаты расчёта магнитного поля предложенным аналитическим методом сравниваются с данными численного моделирования рассматриваемого двигателя на основе программы ELCUT 6.3.

К л ю ч е в ы е с л о в а: разбиение расчётной области, геометрически однородные листы, условия сопряжения магнитного поля, намагниченности ферромагнитных участков, индукция в воздушном зазоре, ЭДС обмотки, электромагнитный момент, метод конечных элементов, программа ELCUT

Вентильные электродвигатели с постоянными магнитами (ВДПМ), имеющие высокую перегрузочную способность, улучшенные статические и динамические характеристики и массогабаритные показатели, успешно применяются в робототехнике, станках высокой точности, автоматических линиях, электроприводах транспортного назначения и изделиях спецтехники.

Следует также отметить, что ВДПМ представляют специфический вентильно-машинный объект, в котором принудительно с помощью ключей преобразователя частоты, фильтрующих элементов и датчика положения ротора (или его имитатора), во-первых, формируется практически синусоидальный ток, во-вторых, задается его фаза относительно ЭДС холостого хода обмотки статора.

Другой особенностью ВДПМ является использование высокоэнергетических постоянных магнитов, которые в рассматриваемой версии располагаются внутри шихтованного роторного сердечника в соответствующих окнах («карманах») прямоугольного поперечного сечения. Такая конструкция позволяет снизить потери от вихревых токов в магнитах, обусловленные зубчатостью статора, улучшить виброшумовые характеристики и повысить КПД машины.

АО «ЧЭАЗ» разработало и серийно выпускает линейку ВДПМ серии 7ДВМ мощностью до 150 кВт с номинальной частотой вращения 3000 мин⁻¹, имеющих ротор модульной конструкции. Мощные двигатели, предназначенные для использования в составе специальной техники, имеют два варианта комплектации – бездатчиковое исполнение и вариант с встроенным трехобмоточным синусно-косинусным вращающимся трансформатором (резольвером).

Теоретические и экспериментальные исследования новых двигателей, проводимые на предприятии, имеют целью повышение их рабочих и функциональных характеристик, поэтому задачи аналитического и численного моделирования ВДПМ являются актуальными.

Аналитическая модель вентильного двигателя с постоянными магнитами достаточно адекватного уровня может быть получена путём разбиения его активной области на совокупность геометрически однородных листов, соответствующих ярмам, зубцам сердечников, их наружным областям, магнитам, воздушному зазору, и использования технологии разделения переменных Фурье [1].

На границах листов выполняются условия сопряжения магнитных полей: скалярные магнитные потенциалы и нормальные составляющие магнитной индукции

не претерпевают скачка (разрыва). Если же магнитные листы обмоток, по соображениям удобства расчёта, располагаются на границах указанных полос, то магнитные потенциалы на границах будут иметь скачок на величину полного тока магнитного листа.

В качестве источников магнитного поля, кроме токов обмотки статора, выступают намагниченности магнитотвёрдых (магнитов) и магнитомягких (ферромагнитных) сред [2]. Намагниченность M_i i -й среды

$$M_i = \frac{B_i}{\mu_0} - H_i \quad (1)$$

может находиться с помощью известных кривых намагничивания.

Скалярные магнитные потенциалы и нормальные составляющие магнитной индукции в полосах согласно методу разделения переменных Фурье могут описываться выражениями [1, 3, 4]:

$$\begin{cases} u_n(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} (B_{nk}e^{k\sigma y} + C_{nk}e^{-k\sigma y}) \sin k\sigma x; \\ B_{ny}(x, y) = \mu_0 \left(-\frac{\partial u_n}{\partial y} + \sum_{k=1}^{\infty} M_{nyk} \sin k\sigma x \right) = \\ = \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} (-k\sigma B_{nk}e^{k\sigma y} + k\sigma C_{nk}e^{-k\sigma y} + M_{nyk}) \sin k\sigma x, \end{cases} \quad (2)$$

где n – номер листа; $\sigma = \pi/\tau$, τ – полюсное деление;

$\sum_{k=1}^{\infty} M_{nyk} \sin k\sigma x$ – средняя намагниченность n -го листа, представленная в виде тригонометрического ряда; B_{nk} , C_{nk} – неизвестные постоянные, определяемые из условий равенства магнитных потенциалов и радиальных магнитных индукций на границах листов.

Для повышения точности расчёта следует увеличивать количество листов (дискретизацию) активной области.

Предлагаемый метод позволяет найти магнитные индукции для любых координатных точек x, y активной области двигателя. Следовательно, первоначально заданный набор индукций и одновременно намагниченностей в листах с ферромагнитными участками будет уточняться в последующие итерации.

Расчёт магнитного поля электрической машины как решение нелинейной задачи облегчается тем, что при заданной геометрии её активных частей, знании напряжения и частоты обмотки статора становится известной магнитная индукция в воздушном зазоре. Следовательно, по традиционным формулам могут быть достаточно корректно уточнены величины магнитных

индукций и намагниченностей в других частях магнитной цепи машины. Итоговый расчёт должен подтвердить известные уровни магнитной индукции в воздушном зазоре и результирующей ЭДС обмотки статора.

Расчётная схема магнитоэлектрического вентильного двигателя 7ДВМ 250¹ [5], содержащая 9 сред (9 бесконечных листов), показана на рис.1.

Рассматриваемый аналитический метод был задействован для расчёта магнитного поля в этом двигателе в программе Mathcad [6, 7]. В качестве одного из этапов этой вычислительной процедуры рассмотрим расчёт потенциального магнитного поля источников с гармониками нечётных порядков. Источниками этого поля с номерами гармоник $k = 2s - 1$ ($s = 1, 2, \dots, n$) будут средние намагниченности сердечников ярм статора и ротора, верхней стенки внутреннего окна («кармана») с магнитами в сердечнике ротора, самих магнитов, располагающиеся соответственно в листах 2, 3, 4 и 8 на рис.1.

Полагаем, что листы 6 и 7 (зубцы статора) не содержат стальных участков (их намагниченности отсутствуют), магнитные листы МДС обмотки статора, как имеющие другой спектр частот, на этом этапе не рассматриваются.

Ищем скалярные магнитные потенциалы $u_n(x, y)$ и радиальные составляющие магнитной индукции $B_{ny}(x, y)$ в немагнитных листах ($n = 1, 5, 6, 7, 9$) (листы 6 и 7 на этом этапе расчёта, как указано выше, рассматриваются немагнитными) в следующем виде:

$$u_1(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} A_{1k} e^{k\sigma y} \sin k\sigma x; \quad (3)$$

$$B_{1y}(x, y) = -\mu_0 \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\mu_0 \sigma \sum_{k=1}^{\infty} k A_{1k} e^{k\sigma y} \sin k\sigma x, \quad y \leq 0, \quad n = 1;$$

$$u_9(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} A_{9k} e^{-k\sigma y} \sin k\sigma x;$$

$$B_{9y}(x, y) = -\mu_0 \frac{\partial u_{10}}{\partial y} = \quad (4)$$

$$= -\mu_0 \sigma \sum_{k=1}^{\infty} k A_{9k} e^{-k\sigma y} \sin k\sigma x, \quad y \geq \Delta_7, \quad n = 9;$$

$$\begin{cases} u_n(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} (B_{nk}e^{k\sigma y} + C_{nk}e^{-k\sigma y}) \sin k\sigma x; \\ B_{ny}(x, y) = -\mu_0 \frac{\partial u_n}{\partial y} = \mu_0 \sigma \sum_{k=1}^{\infty} (-kB_{nk}e^{k\sigma y} + kC_{nk}e^{-k\sigma y}) \sin k\sigma x; \end{cases} \quad (5)$$

$\Delta_3 \leq y \leq \Delta_4, \quad n = 5; \quad \Delta_4 \leq y \leq \Delta_5, \quad n = 6; \quad \Delta_5 \leq y \leq \Delta_6, \quad n = 7.$

¹Вентильный двигатель 7ДВМ 250 мощностью 150 кВт имеет данные: $I = 250$ А; линейная ЭДС 450 В; $n = 3000$ об/мин; магниты – самарий-кобальтовые; $H_{cb} = 780$ кА/м; $h_m = 14,2$ мм; $h_p = 4,8$ мм – толщина стенки магнитного «кармана»; $D_i = 0,29$ м; $I_s = 0,396$ м; $\delta = 0,001$ м; $Z = 72$; $p = 3$; $q = 4$; $a = 6$; $w = 12$.

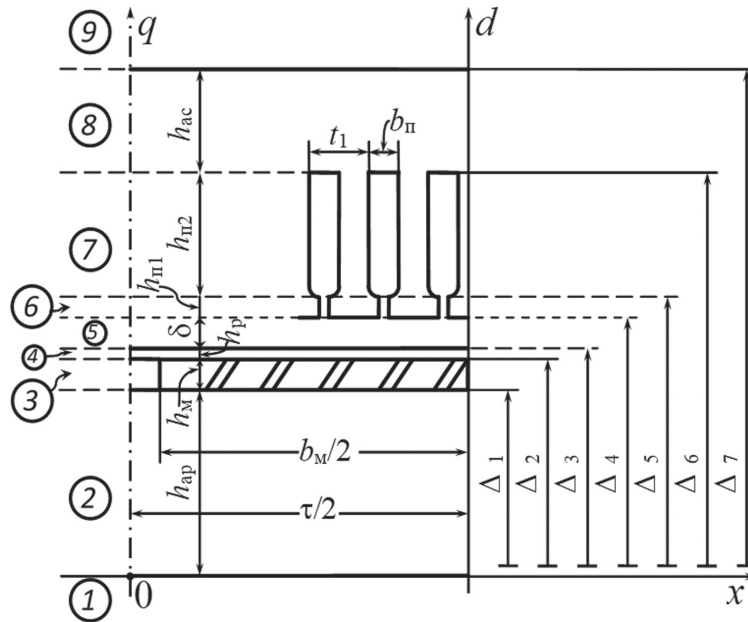


Рис. 1. Расчётная схема двигателя с девятью средами: 1, 9 – немагнитное внешнее пространство; 2, 8 – ярма сердечников соответственно ротора, статора; 3 – постоянные магниты; 4 – верхняя стенка магнитных окон «карманов»; 5 – воздушный зазор; 6 – первый зубцовый слой с пазовыми шлицами; 7 – второй зубцовый слой, пазы которого содержат клинья и проводники обмотки статора

Fig. 1. Design scheme of the engine with nine media: 1, 9 – non-magnetic external space; 2, 8 – yoke cores of the rotor and stator, respectively; 3 – permanent magnets; 4 – the upper wall of the magnetic windows of the "pockets"; 5 – air gap; 6 – the first tooth layer with grooved slots; 7 – the second tooth layer, the grooves of which contain wedges and conductors of the stator winding

Для магнитных листов ярм ($n = 2, 8$), магнитов ($n = 3$), верхней стенки магнитных окон («карманов») ($n = 4$) будет справедливо:

$$\begin{cases} u_n(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} (B_{nk} e^{k\sigma y} + C_{nk} e^{-k\sigma y}) \sin k\sigma x; \\ B_{ny}(x, y) = \mu_0 \left(-\frac{\partial u_n}{\partial y} + \sum_{k=1}^{\infty} M_{nyk} \sin k\sigma x \right) = \\ = \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} (-k\sigma B_{nk} e^{k\sigma y} + k\sigma C_{nk} e^{-k\sigma y} + M_{nyk}) \sin k\sigma x; \\ 0 \leq y \leq \Delta_1, n = 2; \quad \Delta_1 \leq y \leq \Delta_2, n = 3; \\ \Delta_2 \leq y \leq \Delta_3, n = 4; \quad \Delta_6 \leq y \leq \Delta_7, n = 8, \end{cases} \quad (6)$$

где $M_{2(8)yk} = \frac{4 M_{2(8)y}}{\pi k}$; $M_{3yk} = \frac{4 M_{3y}}{\pi k} \cos \alpha_m k$; $M_{4yk} = \frac{4 M_{4y}}{\pi k}$; $\alpha_m = \frac{\tau - b_m}{2\tau} \pi$; b_m – ширина магнита; M_{2y} – намагниченность ярма ротора; M_{8y} – намагниченность ярма статора; M_{3y} – намагниченность магнита, M_{4y} – намагниченность верхней стенки отверстий («карманов»).

Входящие в уравнения (3)–(6) шестнадцать постоянных $A_{1k}, A_{9k}, B_{nk}, C_{nk}$ ($n = 2-8$) находим из следующих шестнадцати граничных условий, получаемых приравнением магнитных потенциалов и радиальных магнитных индукций на границах сред:

$$A_{1k} - B_{2k} - C_{2k} = 0; \quad (7)$$

$$-B_{2k} + C_{2k} + A_{1k} = -m_{2yk}; \quad (8)$$

$$B_{2k} e^{k\sigma \Delta_1} + C_{2k} e^{-k\sigma \Delta_1} - B_{3k} e^{k\sigma \Delta_1} - C_{3k} e^{-k\sigma \Delta_1} = 0; \quad (9)$$

$$-B_{2k} e^{k\sigma \Delta_1} + C_{2k} e^{-k\sigma \Delta_1} + B_{3k} e^{k\sigma \Delta_1} - C_{3k} e^{-k\sigma \Delta_1} = -m_{2yk} + m_{3yk}; \quad (10)$$

$$B_{3k} e^{k\sigma \Delta_2} + C_{3k} e^{-k\sigma \Delta_2} - B_{4k} e^{k\sigma \Delta_2} - C_{4k} e^{-k\sigma \Delta_2} = 0; \quad (11)$$

$$-B_{3k} e^{k\sigma \Delta_2} + C_{3k} e^{-k\sigma \Delta_2} + B_{4k} e^{k\sigma \Delta_2} - C_{4k} e^{-k\sigma \Delta_2} = -m_{3yk} + m_{4yk}; \quad (12)$$

$$B_{4k} e^{k\sigma \Delta_3} + C_{4k} e^{-k\sigma \Delta_3} - B_{5k} e^{k\sigma \Delta_3} - C_{5k} e^{-k\sigma \Delta_3} = 0; \quad (13)$$

$$-B_{4k} e^{k\sigma \Delta_3} + C_{4k} e^{-k\sigma \Delta_3} + B_{5k} e^{k\sigma \Delta_3} - C_{5k} e^{-k\sigma \Delta_3} = -m_{4yk}; \quad (14)$$

$$B_{5k} e^{k\sigma \Delta_4} + C_{5k} e^{-k\sigma \Delta_4} - B_{6k} e^{k\sigma \Delta_4} - C_{6k} e^{-k\sigma \Delta_4} = 0; \quad (15)$$

$$-B_{5k} e^{k\sigma \Delta_4} + C_{5k} e^{-k\sigma \Delta_4} + B_{6k} e^{k\sigma \Delta_4} - C_{6k} e^{-k\sigma \Delta_4} = 0; \quad (16)$$

$$B_{6k} e^{k\sigma \Delta_5} + C_{6k} e^{-k\sigma \Delta_5} - B_{7k} e^{k\sigma \Delta_5} - C_{7k} e^{-k\sigma \Delta_5} = 0; \quad (17)$$

$$-B_{6k} e^{k\sigma \Delta_5} + C_{6k} e^{-k\sigma \Delta_5} + B_{7k} e^{k\sigma \Delta_5} - C_{7k} e^{-k\sigma \Delta_5} = 0; \quad (18)$$

$$B_{7k} e^{k\sigma \Delta_6} + C_{7k} e^{-k\sigma \Delta_6} - B_{8k} e^{k\sigma \Delta_6} - C_{8k} e^{-k\sigma \Delta_6} = 0; \quad (19)$$

$$-B_{7k} e^{k\sigma \Delta_6} + C_{7k} e^{-k\sigma \Delta_6} + B_{8k} e^{k\sigma \Delta_6} - C_{8k} e^{-k\sigma \Delta_6} = m_{8yk}; \quad (20)$$

$$B_{8k} e^{k\sigma \Delta_8} + C_{8k} e^{-k\sigma \Delta_8} - A_{9k} e^{-k\sigma \Delta_8} = 0; \quad (21)$$

$$-B_{8k} e^{k\sigma \Delta_8} + C_{8k} e^{-k\sigma \Delta_8} + A_{9k} e^{-k\sigma \Delta_8} = -m_{8yk}; \quad (22)$$

где $m_{2(8)yk} = \frac{M_{2(8)yk}}{\sigma k}$; $m_{3yk} = \frac{M_{3yk}}{\sigma k}$; $m_{4yk} = \frac{M_{4yk}}{\sigma k}$.

По уравнению (5) на рис. 2 построена кривая магнитной индукции для середины воздушного зазора ($y = \Delta_3 + 0,5\delta$, $n = 5$). Были приняты в качестве сред-

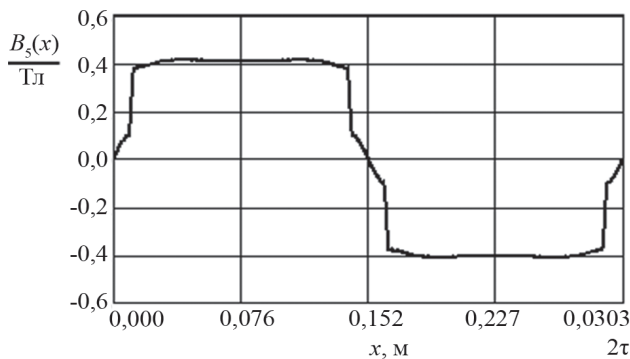


Рис. 2. Распределение магнитной индукции на середине воздушного зазора с максимумом 0,41 Тл, вызванной намагниченностями магнитов, верхней стенки магнитных окон «карманов» и ям при отсутствии тока и зубцов статора

Fig. 2. The distribution of magnetic induction in the middle of the air gap with a maximum of 0.41 T, caused by the magnetization of the magnets, the upper wall of the magnetic windows of the "pockets" and the pits in the absence of current and stator teeth

них магнитные индукции: в верхней стенке отверстий («карманов») 0,8 Тл, в ямах соответственно статора и ротора 0,4 и 0,5 Тл.

По завершению всех последующих этапов, связанных с источниками поля других порядков: потенциального магнитного поля токов обмотки статора (порядки $k = 6s + 1$ и $k = 6s - 1, s = 1, 2, \dots, n$), магнитного поля намагниченности зубцов статора (порядки $k = 1, 2, \dots, n$ со средней индукцией в зубцах 1,9 Тл), была получена результирующая кривая индукции в воздушном зазоре для номинального режима двигателя, показанная на рис. 3.

Была вычислена ЭДС фазы обмотки статора для номинального режима, представленная на графике рис. 4.

Были также определены мощность и электромагнитный момент двигателя:

$$P = \frac{m}{T} \int_0^T e_s^1(t) i(t) dt = 151,1 \cdot 10^3 \text{ Вт}; \quad M = \frac{P}{\Omega} = 481 \text{ Нм},$$

которые оказались близкими к своим номинальным значениям: $P_n = 150 \text{ кВт}, M_n = 478 \text{ Нм}.$

Численная математическая модель рассматриваемого двигателя получена методом конечных элементов с использованием программы *ELCUT* 6.3 [8]. Математическое моделирование методом конечных элементов вентильных двигателей со встроенными магнитными редукторами и самих магнитных редукторов с постоянными магнитами достаточно полно представлено в работах [9–16].

На рис. 5 показана расчетная модель электродвигателя, число узлов сетки которой составляет 5303551.

В результате расчета была получена картина магнитного поля (рис.6), из которой видно, что наибольшие значения индукции (2,5 Тл и более) наблюдаются в магнитных мостиках, связывающих верхние стенки

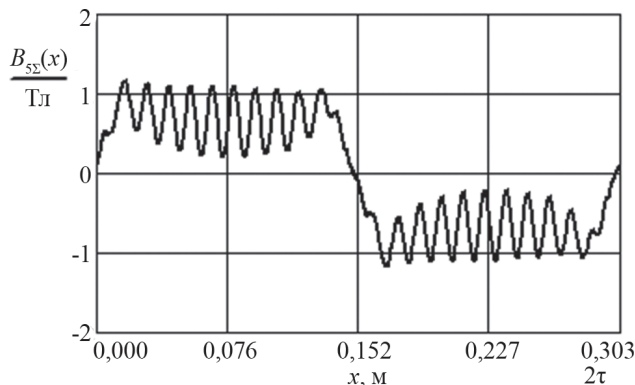


Рис. 3. Распределение магнитной индукции на середине воздушного зазора с максимумом 1,16 Тл, вызванное всеми источниками магнитного поля в номинальном режиме двигателя

Fig. 3. Magnetic induction distribution in the middle of the air gap with a maximum of 1.16 T caused by all magnetic field sources in the rated motor mode

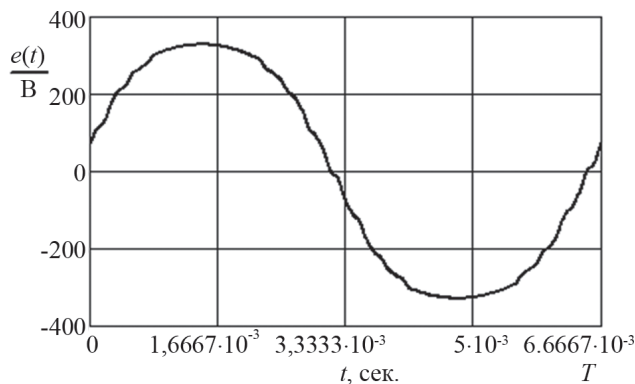


Рис. 4. Фазная ЭДС обмотки статора в номинальном режиме с амплитудой 321 В

Fig. 4. Phase EMF of the stator winding in nominal mode with an amplitude of 321 V

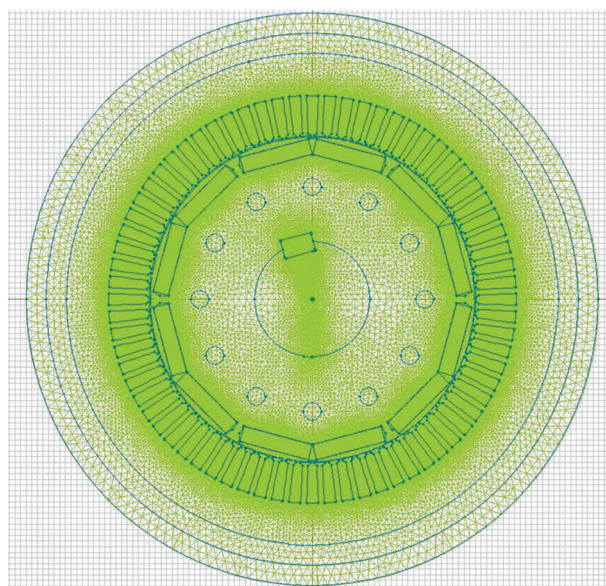


Рис. 5. Сетка узлов конечных элементов

Fig. 5. Grid of finite element nodes

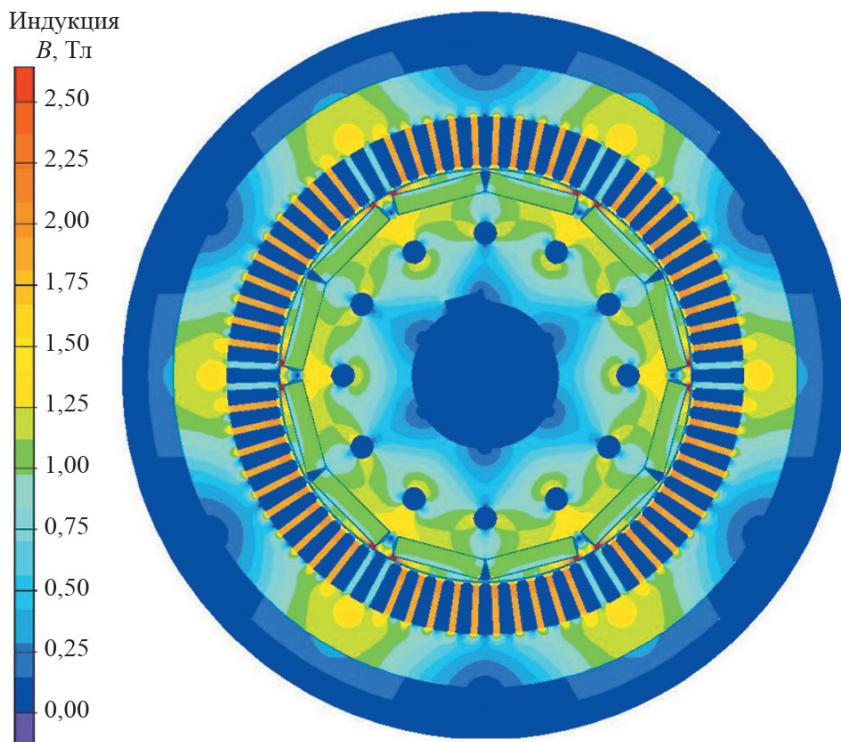


Рис. 6. Картина магнитного поля вентильного двигателя, постоянные самарий-кобальтовые магниты которого толщиной 14,2 мм находятся в закрытых каналах с прямоугольным поперечным сечением

Fig. 6. The magnetic field pattern of the valve motor, whose permanent samarium-cobalt magnets are 14.2 mm thick are located in closed channels with a rectangular cross-section

магнитных окон разной полярности. Эти мостики существенно ограничивают магнитную индукцию в двух зубцах статора, расположенных напротив указанных мостиков. Максимумы индукции в других зубцах имеют значения порядка 1,9 Тл. Кривая индукции в центре воздушного зазора (рис.7) содержит прямоугольные выбросы с высотой на уровне 0,95 Тл и провалы на максимальную глубину 0,35 Тл в середине полюсов.

Примерно такой же характер имеет аналогичная кривая индукции в воздушном зазоре, полученная на основе аналитического расчёта.

Из рис. 7 следует, что максимальная разница между значениями индукции в воздушном зазоре, полученными в результате аналитического расчета и моделирования в среде *ELCUT*, не превышает 10–12%. Для повышения аналитического расчета можно увеличить степень дискретизации расчетной области.

Выводы. Рассмотренный аналитический подход к расчёту магнитного поля магнитоэлектрического вентильного двигателя позволяет физически корректно рассчитать его нелинейную магнитную цепь, представленную совокупностью прямолинейных геометрически однородных листов, обращаясь к параметрам намагниченности их ферромагнитных участков, взятых из соответствующих кривых намагничивания.

Численная математическая модель рассматриваемого двигателя на основе математической программы *ELCUT* даёт подробное описание магнитной загрузки

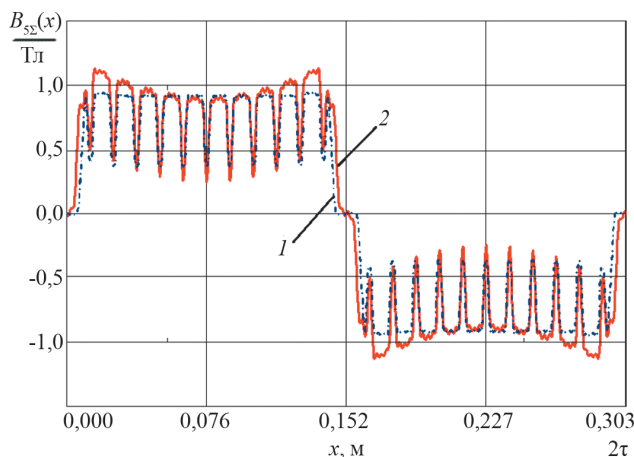


Рис. 7. Расчётные кривые распределения магнитной индукции в центре воздушного зазора на холостом ходу, полученные численным (1) и аналитическим (2) методами

Fig. 7. Calculated curves of the magnetic induction distribution in the center of the air gap at idle, obtained by numerical (1) and analytical (2) methods

женности всех элементов его активной области, в том числе характерные особенности магнитного поля в воздушном зазоре.

Проведенные исследования показали, что в воздушном зазоре, где происходит преобразование энергии, картины поля, рассчитанные аналитическим и численным методами, имеют сравнительно малое различие.

Максимальные отличия результатов расчета распределения индукции в воздушном зазоре не превышают 10–12%. Для повышения точности аналитического расчета следует увеличивать степень дискретизации расчетной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Поливанов К.М.** Теоретические основы электротехники, ч. 3. Теория электромагнитного поля. М.: Энергия, 1969, 352 с.
2. **Поливанов К.М.** Ферромагнетики. М.;Л.: ГЭИ, 1957, 256 с.
3. **Полянин А.Д.** Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физматлит, 2001, 576 с.
4. **Боголюбов А.Н., Кравцов В.В.** Задачи по математической физике: Учебное пос. М.: Изд-во МГУ, 1998, 350 с.
5. **Жуков В.П., Нестерин В.А.** Высокоскоростные вентильные электродвигатели серии 5ДВМ. – Электротехника, 2000, № 6, с. 19–21.
6. **Афанасьев А.А.** Математическое моделирование электро-механических систем. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020, 274 с.
7. **Афанасьев А.А.** Расчёт магнитоэлектрических вентильных двигателей методом разделения переменных Фурье. – Электротехника, 2021, № 2, с. 21–27.
8. **Афанасьев А.А.** Математические модели магнитоэлектрических вентильных двигателей. – Электричество, 2021, № 2, с. 66–70.
9. **ELCUT** Моделирование двумерных полей методом конечных элементов, версия 5.8: Руководство пользователя. С.-Пб.: ПК TOP, 2010, 345 с.
10. **Дергачёв П.А., Кирюхин В.П., Кулаев Ю.В., Курбатов П.А., Молоканов О.Н.** Анализ двухступенчатого магнитного мультипликатора. – Электротехника, 2012, № 5, с. 39–46.
11. **Воронкин В.А., Геча В.Я., Городецкий Э.А., Евланов В.В., и др.** Методы проектирования малошумных электрических машин. – Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2006, т. 103, с 6–171.
12. **Геча В.Я., Урядников В.В.** Анализ магнитных вибраций сердечника статора с учетом магнитоэлектрической стали. – Труды ВНИИЭМ, 1981, т. 68, с. 110–117.
13. **Molokanov O., Dergachev P., Kiruhin V., Kurbatov P.** Analyses and experimental validation of coaxial magnetic planetary gear. – Proceedings of 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), 2014, DOI:10.1109/SIELA.2014.6871876.
14. **Rasmussen P.O., Frandsen T.V., Jensen K.K., Jessen K.** Experimental evaluation of a motor integrated permanent magnet gear. – IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Phoenix, Arizona, 2011, DOI:10.1109/ECCE.2011.6064311.
15. **Atallah K., Howe D.** A novel high-performance magnetic gear. – IEEE Transactions on Magnetics, 2001, vol. 37, No. 4, pp. 2844–2846.
16. **Deng F.** An Improved Iron Loss Estimation for Permanent Magnet Brushless Machines. – IEEE Transaction on Energy Conversion, 2000, vol. 14, No. 4, pp. 1391–1394.

[27.04.2021]



А в т о р ы: **Афанасьев Александр Александрович** – доктор техн. наук, профессор кафедры автоматизации и управления в технических системах Чувашского государственного университета.



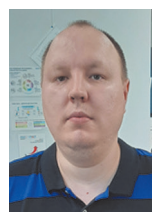
Генин Валерий Семёнович – доктор техн. наук, профессор кафедры автоматизации и управления в технических системах Чувашского государственного университета.



Ваткин Владимир Александрович – кандидат техн. наук, главный конструктор отдела электрических машин АО «Чебоксарский электроаппаратный завод».



Ефимов Вячеслав Валерьевич – кандидат техн. наук, главный специалист отдела электрических машин АО «Чебоксарский электроаппаратный завод».



Малинин Артём Игоревич – инженер-конструктор 2 кат. отдела электрических машин АО «Чебоксарский электроаппаратный завод».



Токмаков Дмитрий Анатольевич – директор по развитию АО «Чебоксарский электроаппаратный завод».

Analytical and Numerical Simulation of Magnetolectric Valve Motors

AFANASYEV Alexander A. (Chuvash State University, Cheboksary, Russia) – Professor of Management and Computer Science in Technical Systems Dept., Dr. Sci. (Eng.).

GENIN Valery S. (Chuvash State University, Cheboksary, Russia) – Professor of Management and Computer Science in Technical Systems Dept., Dr. Sci. (Eng.).

VATKIN Vladimir A. (JSC “Cheboksary Electrical Apparatus Plant”, Cheboksary, Russia) – Chief Designer of the Electric Machines Dept., Cand. Sci. (Eng.).

EFIMOV Vyacheslav V. (JSC “Cheboksary Electrical Apparatus Plant”, Cheboksary, Russia) – Chief Specialist of the Electric Machines Dept., Cand. Sci. (Eng.).

MALININ Artem I. (JSC “Cheboksary Electrical Apparatus Plant”, Cheboksary, Russia) – Design Engineer of the Electric Machines Dept.

TOKMAKOV Dmitry A. (JSC “Cheboksary Electrical Apparatus Plant”, Cheboksary, Russia) – Development Director.

An analytical method for calculating the magnetic field of a magnetolectric valve motor is proposed, based on the tearing of its active region into a set of geometrically homogeneous bands, at the boundaries of which the conditions for the conjugation of their magnetic fields are met: scalar magnetic potentials and normal components of magnetic induction do not undergo a jump (break). If the magnetic sheets of the windings, for calculation convenience, are located at the boundaries of the specified bands, then the magnetic potentials at the boundaries will have a jump by the value of the total current of the magnetic sheet. To increase the accuracy of the calculation, you should increase the number of bands (sampling) of the active region. When using the computational technology of Fourier variables separation, the conjugation conditions will be reduced to solving a system of linear equations to find the corresponding Fourier constants. As sources of the magnetic field of the motor, in addition to permanent magnets and stator winding currents, the magnetization of the ferromagnetic sections of its magnetic circuit is proposed. The results of magnetic field calculation by this analytical method are compared with the data of the numerical simulation of the considered machine based on the mathematical program ELCUT 6.3.

Key words: partition the computational domain, geometrically uniform bands, conditions for the coupling of the magnetic field, magnetization of ferromagnetic sections, induction in the air gap, EMF of the winding, electromagnetic moment, finite element method, ELCUT program

REFERENCES

1. Polivanov K.M. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki, ch. 3. Teoriya elektromagnitnogo polya* (Theoretical foundations of electrical engineering, part 3. Theory of the electromagnetic field). M.: Energiya, 1969, 352 p.
2. Polivanov K.M. *Ferromagnetiki* (Ferromagnets). M.;L.: GEI, 1957, 256 p.
3. Polyaniin A.D. *Spravochnik po lineynym uravneniyam matematicheskoy fiziki* (Handbook of linear Equations of Mathematical Physics). M.: Fizmatlit, 2001, 576 p.
4. Bogolyubov A.N., Kravtsov V.V. *Zadachi po matematicheskoy fizike: Uchebnoe pos.* (Problems in mathematical physics: A textbook). M.: Izd-vo MGU, 1998, 350 p.
5. Zhukov V.P., Nesterin V.A. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2000, No. 6, pp. 19–21.
6. Afanas'ev A.A. *Matematicheskoe modelirovanie elektromekhanicheskikh sistem* (Mathematical modeling of electromechanical systems). Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 2020, 274 p.
7. Afanas'ev A.A. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2021, № 2, c. 21–27.
8. Afanas'ev A.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 2, pp. 66–70.
9. ELCUT. *Modelirovanie dvumernykh poley metodom konechnykh elementov versiya 5.8: Rukovodstvo polzovatelya* (Finite element modeling of two-dimensional fields, version 5.8: User's Guide). S.-Pb.: PK “TOR”, 2010, 345 p.
10. Dergachyov P.A., Kiryuhin V.P., Kulaev Yu.V., Kurbatov P.A., Molokanov O.N. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2012, No. 5, pp. 39–46.
11. Voronkin V.A., Gecha V.Ya., Gorodetskiy E.A., Evlanov V.V., et al. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM – in Russ. (Questions of electromechanics. Proceedings of VNIEM)*, 2006, vol. 103, pp. 6–171.
12. Gecha V.Ya., Uryadnikov V.V. *Trudy VNIEM – in Russ. (Proceedings of VNIEM)*, 1981, vol. 68, pp. 110–117.
13. Molokanov O., Dergachev P., Kiruhin V., Kurbatov P. *Analyses and experimental validation of coaxial magnetic planetary gear. – Proceedings of 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, 2014, DOI:10.1109/SIELA.2014.6871876.
14. Rasmussen P.O., Frandsen T.V., Jensen K.K., Jessen K. *Experimental evaluation of a motor integrated permanent magnet gear. – IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Phoenix, Arizona, 2011, DOI:10.1109/ECCE.2011.6064311.
15. Atallah K., Howe D. *A novel high-performance magnetic gear. – IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, vol. 37, No. 4, pp. 2844–2846.
16. Deng F. *An Improved Iron Loss Estimation for Permanent Magnet Brushless Machines. – IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2000, vol. 14, No. 4, pp. 1391–1394.