



УДК/UDC 621.313.8
DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-64-71
EDN: DEYXKD
Научная статья/Original article

ОПТИМИЗАЦИЯ РОТОРА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ПОЛЮСНЫМИ НАКОНЕЧНИКАМИ В ФОРМЕ ДУГИ ЭЛЛИПСА

В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, А. Ю. Милютин

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

В статье выполнена оптимизация ротора синхронной машины с тангенциально намагниченными магнитами, форма полюсных наконечников которого соответствует дуге эллипса. Моделирование магнитной цепи синхронной машины выполнено в программе *FEMM*. Решение оптимизационной задачи осуществлялось методом покоординатного спуска. По каждой координатной оси минимальное значение целевой функции определялось методом дихотомии. Допустимые диапазоны изменения варьируемых величин, которые задают размеры конструктивных элементов ротора, были учтены в виде границ отрезков в методе дихотомии по каждой координатной оси. Рассчитаны оптимальные значения размеров постоянных магнитов и полюсных наконечников на роторе, заданных по форме в виде дуги эллипса для четырехполюсной машины. Выполнено сравнение кривых нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней расточки сердечника статора синхронной машины с полюсными наконечниками в виде дуги окружности и в виде дуги эллипса. Изготовлен макетный образец четырехполюсной электрической машины с постоянными магнитами на роторе, получены кривые ЭДС обмотки статора на холостом ходу.

Ключевые слова: синхронная машина, постоянный магнит, магнитное поле, полюсный наконечник, оптимизация, метод покоординатного спуска, метод дихотомии.

Для цитирования: Харламов В. В., Москалев Ю. В., Милютин А. Ю. Оптимизация ротора магнитоэлектрической синхронной машины с полюсными наконечниками в форме дуги эллипса // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 64–71. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-64-71. EDN: DEYXKD.



© Харламов В. В., Москалев Ю. В., Милютин А. Ю., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

OPTIMIZATION OF THE ROTOR OF A MAGNETOELECTRIC SYNCHRONOUS MACHINE WITH POLE TIPS SHAPED AS ELLIPTICAL ARCS

V. V. Kharlamov, Yu. V. Moskalev, A. Yu. Milyutin

Omsk State Transport University, Omsk, Russia

The article optimizes the rotor of a synchronous machine with tangentially magnetized magnets. The rotor pole tips have a shape resembling an arc of an ellipse. The simulation of the magnetic circuit of a synchronous machine is performed using the FEMM program. The optimization problem is solved using the coordinate-by-coordinate descent method; for each coordinate axis, the minimum value of the objective function is determined by the dichotomy method. Permissible ranges of variation for the variable values, which define the dimensions of the rotor's structural elements, are considered as segment boundaries within the dichotomy method for each coordinate axis. The optimal size values of the permanent magnets and pole tips on the rotor, shaped as an elliptical arc for a four-pole machine, are calculated. The curves of the normal component of magnetic induction in the air gap of a synchronous machine with pole tips shaped as both a circular arc and an elliptical arc are compared. A mock-up of a four-pole electric machine with permanent magnets on the rotor is constructed, and the electromotive force curves of the stator winding at idle are obtained.

Keywords: synchronous machine, permanent magnet, magnetic field, pole tip, optimization, coordinate descent method, dichotomy method.

For citation: Kharlamov V. V., Moskalev Yu. V., Milyutin A. Yu. Optimization of the rotor of a magnetoelectric synchronous machine with pole tips shaped as elliptical arcs. *Omsk Scientific Bulletin.* 2025. No. 2 (194). P. 64–71. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-64-71. EDN: DEYXKD.



© Kharlamov V. V., Moskalev Yu. V., Milyutin A. Yu., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ) получают все большее распространение в различных отраслях промышленности и на транспорте [1–8]. Например, это сверхскоростные двигатели-генераторы газовых турбин, генераторы микрогидроэлектростанций, ветрогенераторы, исполнительные двигатели в системах автоматики и телемеханики, двигатели воздушных винтов летательных аппаратов, электромобилей, компрессоров, насосов для медицинского оборудования и т.д.

Такие электрические машины имеют высокие энергетические и массогабаритные показатели, более простую и надежную конструкцию возбудителя из-за отсутствия обмотки возбуждения, источника постоянного тока и элементов скользящего токосъема. Благодаря этому рабочие частоты вращения ротора СМПМ могут достигать 500 тысяч оборотов в минуту [8].

Повышение энергетических и массогабаритных показателей, показателей надежности СМПМ осуществляется при проектировании за счет оптимизации конструкции, применения современных материалов и совершенствования технологии изготовления. Для повышения прочности конструктивных элементов и снижения потерь находит применение углеродное волокно и аморфная сталь [8].

В настоящее время известно большое количество конструкций роторов с постоянными магнитами (ПМ) [1–10]. На практике часто находят применение следующие схемы размещения призматических магнитов, встроенных в ротор: с радиальным намагничиванием; с тангенциальным намагничиванием; с намагничиванием по схеме Хальбаха; V-образная схема размещения [3, 4, 7–11].

Различные варианты размещения ПМ на роторе представлены в виде блок-схемы, приведенной на рис. 1. Схемы размещения отличаются между собой расположением магнитомягких и немагнитных материалов (втулок, полюсных наконечников, секторов между ПМ и т.п.), направлением намагнченности магнитов. Оптимальные схемы конструкции роторов часто определяются в результате решения оптимизационных задач в зависимости от области применения электрической машины [6, 12–16]. При этом повышается эффективность использования энергии постоянных магнитов за счет уменьшения магнитных полей рассеивания, уменьшения сопротивления магнитной цепи СМПМ благодаря изменению формы магнитомягких и немагнитных материалов на роторе.

На практике распространение получили ПМ в виде прямой четырехугольной призмы. Сборные роторы с такими магнитами просты в изготовлении и позволяют изготавливать магнитоэлектрические машины с высокими массогабаритными показателями [3, 4]. Одной из перспективных является схема ротора с тангенциально намагнченными магнита-

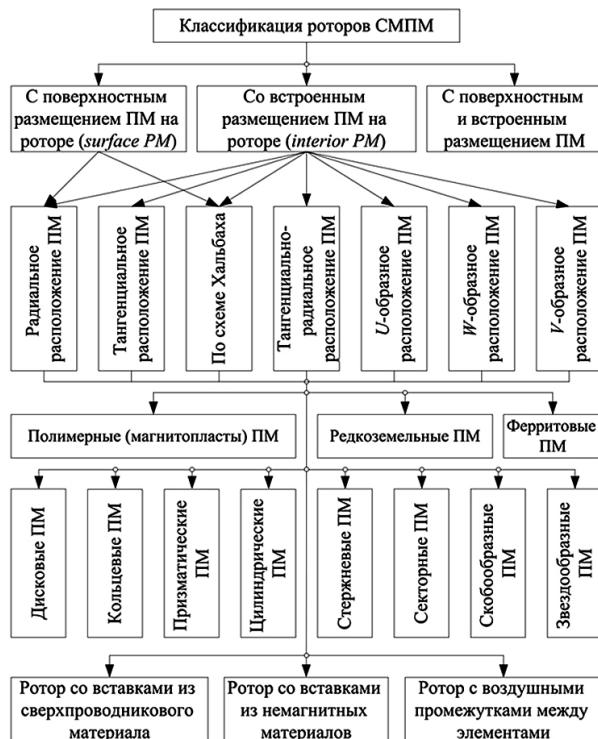


Рис. 1. Классификация схем размещения ПМ на роторе СМПМ

Fig. 1. Classification of schemes of PM arrangement on the PMSM rotor

ми, так как такая схема позволяет обеспечить максимальное использование энергии магнитов [3, 4].

Полюсные наконечники роторов с призматическими ПМ обычно изготавливаются в виде дуги окружности [3, 4]. Для увеличения нормальной составляющей магнитной индукции и уменьшения содержания в ней высших гармоник полюсные наконечники можно изготавливать в виде дуги эллипса, что позволит улучшить массогабаритные показатели, уменьшить потери мощности и пульсации момента СМПМ.

Выполним расчет оптимальных размеров конструктивных элементов ротора с призматическими тангенциально намагнченными магнитами и с полюсными наконечниками в форме дуги эллипса. Схема магнитной цепи четырехполюсной СМПМ для оптимизации ротора приведена на рис. 2.

При расчете принятые следующие допущения: для исключения зубцовых гармоник сердечник статора принят гладким; высококоэрцитивные магниты имеют одинаковые размеры и кривые размагничивания, отсутствует эксцентризитет ротора, не учитывается реакция якоря (СМПМ без нагрузки).

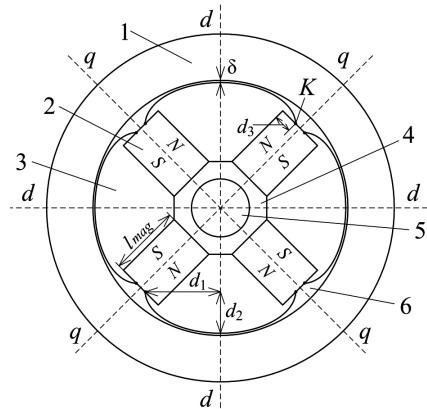


Рис. 2. Схема магнитной цепи СМПМ для оптимизации ротора с полюсными наконечниками в форме дуги эллипса:

- 1 — сердечник статора;
 - 2 — постоянный магнит;
 - 3 — сегмент из магнитомягкого материала;
 - 4 — втулка из немагнитного материала;
 - 5 — вал;
 - 6 — неравномерный воздушный зазор
- Fig. 2. Scheme of the PMSM magnetic circuit for rotor optimization with pole tips in the ellipse arc:
- 1 — stator core;
 - 2 — permanent magnet;
 - 3 — segment from magnetic soft material;
 - 4 — sleeve from non-magnetic material;
 - 5 — shaft;
 - 6 — non-standard air gap

Для оптимизации ротора составлена модель магнитной цепи электрической машины в программе *FEMM*; свойства постоянных магнитов и других материалов соответствуют материалам библиотеки этой программы [17].

На рис. 2 показаны величины, которые изменяются в заданных допустимых диапазонах при оптимизации: δ — минимальное расстояние в воздушном зазоре между полюсным наконечником и сердечником статора; l_{mag} — длина постоянного магнита; d_1 — половина длины большой оси дуги эллипса полюсного наконечника; d_2 — половина длины малой оси дуги эллипса полюсного наконечника; d_3 — расстояние от угла постоянного магнита до точки K (см. рис. 2). Концы отрезка большой оси эллипса находятся на гранях постоянных магнитов, размещенных по обеим сторонам от полюсного наконечника (точка K на рис. 2).

Составление модели электрической машины и расчет в программе *FEMM* для различных вариантов входных данных выполняется с использованием языка программирования высокого уровня, при этом обеспечивается симметрия магнитной цепи СМПМ.

При решении оптимизационной задачи необходимо определить такие значения переменных модели δ , l_{mag} , d_1 , d_2 и d_3 , при которых изменение нормальной составляющей индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора будет синусоидальным:

$$B_{n_i} (l_i) = B_{cp} \sin \left(\frac{2}{R_1} l_i - \frac{\pi}{2} \right), \quad (1)$$

где R_1 — это радиус внутренней окружности сердечника статора, м; B_{cp} — среднее значение модуля

магнитной индукции вдоль окружности внутренней расточки статора:

$$B_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{B_{n_i}^2 + B_{t_i}^2}, \quad (2)$$

где N — количество точек по внутренней окружности статора ($i = 1 \dots N$), для которых определяются значения магнитной индукции; B_{n_i} и B_{t_i} — нормальная и тангенциальная составляющие вектора магнитной индукции i -й точке вдоль окружности сердечника статора l соответственно, Тл.

Оптимальные размеры элементов ротора определены при минимизации следующего критерия:

$$F = \sum_{i=1}^N (B_{n_i, \text{расч}}(l_i) - B_{n_i, \text{sin}}(l_i))^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $B_{n_i, \text{расч}}(l_i)$ — модуль вектора нормальной составляющей индукции в i -й точке внутренней окружности сердечника статора, рассчитанный в результате моделирования при заданных значениях независимых переменных, Тл.

На каждой итерации выполняется сравнение кривой распределения нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней расточки сердечника статора с синусоидой.

В качестве примера приняты следующие размеры при моделировании магнитной цепи СМПМ: наружный диаметр сердечника статора — 160 мм; внутренний диаметр сердечника статора — 102 мм; диаметр вала — 16 мм; длина окружности по внутренней расточке статора (l) равна 320 мм.

Все элементы магнитной цепи заданы материалами из библиотеки программы *FEMM* [17]: из магнитомягкого материала выполнены сердечник статора и секторы между магнитами (сталь марки М19), вал ротора стальной, неодимовые магниты *NdFeB* (37 MGoe с коэрцитивной силой 950 кА/м).

Решение оптимизационной задачи осуществлялось методом покоординатного спуска, по каждой координатной оси минимальное значение целевой функции (3) определялось методом дихотомии [18]. Допустимые диапазоны изменения варьируемых величин, которые задают размеры конструктивных элементов ротора, были учтены в виде границ отрезков в методе дихотомии по каждой координатной оси. Это необходимо для того, чтобы исключить недопустимые варианты входных переменных, при которых элементы конструкции ротора будут «пересекаться» между собой.

Допустимые диапазоны изменения переменных величин для заданных размеров магнитной цепи приняты равными: $1 \text{ мм} \leq \delta \leq 2 \text{ мм}$; $30 \text{ мм} \leq l_{mag} \leq 36 \text{ мм}$; $29 \text{ мм} \leq d_1 \leq 30 \text{ мм}$; $18 \text{ мм} \leq d_2 \leq 19 \text{ мм}$; $0 \text{ мм} \leq d_3 \leq 7,2 \text{ мм}$. Точка K может «смещаться» при оптимизации вдоль грани постоянного магнита, на которой она размещена (см. рис. 2), от точки, соответствующей углу магнита до средины грани.

Алгоритм определения оптимальных размеров конструктивных элементов ротора СМПМ с тангенциально намагниченными магнитами и полюсными наконечниками в форме дуги эллипса приведен на рис. 3.

Пояснить алгоритм оптимизации можно следующим образом: задаются допустимые диапазоны изменения варьируемых величин (блок 1); устанавливаются коэффициенты, необходимые для метода дихотомии (блок 2); вектору X задаются значения, соответствующие срединам интервалов допусти-

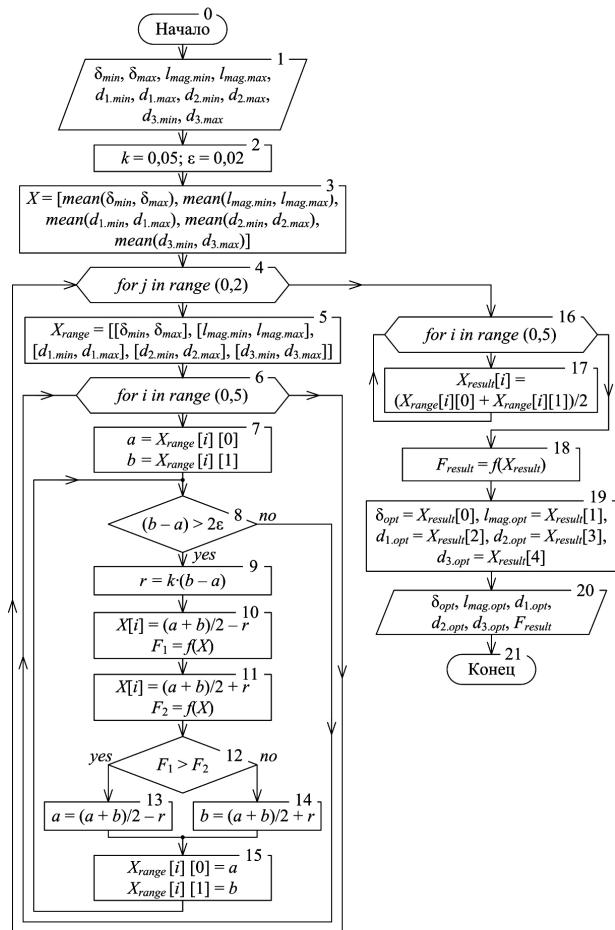


Рис. 3. Алгоритм для определения оптимальных размеров конструктивных элементов ротора СМПМ с тангенциально намагниченными магнитами и полюсными наконечниками в форме дуги эллипса

Fig. 3. Algorithm for determining the optimal dimensions of the structural elements of the PMSM rotor with tangentially magnetised magnets and pole tips in the ellipse arc

мых диапазонов изменения варьируемых величин (блок 3). Устанавливается необходимое количество повторений (*j*) метода покоординатного спуска при различных начальных значениях входных величин (блок 4); в массиве X_{range} задаются допустимые диапазоны изменения варьируемых величин (блок 5); переменная (*i*) устанавливается поочередно одну из пяти координат, для которой определяется минимальное значение целевой функции $f(X)$ (блок 6). При оптимизации методом дихотомии использованы две вспомогательные переменные (*a*, *b*), которые содержат информацию об изменении границ интервалов каждой варьируемой величины, начиная с допустимых диапазонов, заданных в начале оптимизации (блок 7).

Далее поочередно по каждой переменной методом дихотомии определяется значение величины, при которой значение целевой функции будет минимально. Пока допустимый диапазон между значениями (*a*, *b*) больше заданной величины 2ϵ выполняется поиск минимума (блок 8); рассчитывается значение вспомогательной переменной *r* (блок 9). Определяются координаты двух точек на расстоянии *r* от середины диапазона на каждой итерации $(a + b)/2 \pm r$ и значения целевой функции в этих точках F_1 и F_2 . Выполняется сравнение значений целевой функции в точках F_1 и F_2 . Если $F_1 > F_2$, то принимается новое минимальное значение допустимого диапазона $(a + b)/2 - r$, иначе принимается новое максимальное значение допустимого диапазона $(a + b)/2 + r$ (блоки 10 и 11). Обновляется значение допустимого диапазона по рассматриваемой координате в массиве X_{range} (блок 15).

При решении оптимизационной задачи метод покоординатного спуска используется два раза с различными начальными значениями вектора X . На первой итерации вектор X содержит начальные значения пяти переменных, которые равны средним значениям допустимых интервалов варьируемых величин (блок 3). При повторном исполь-

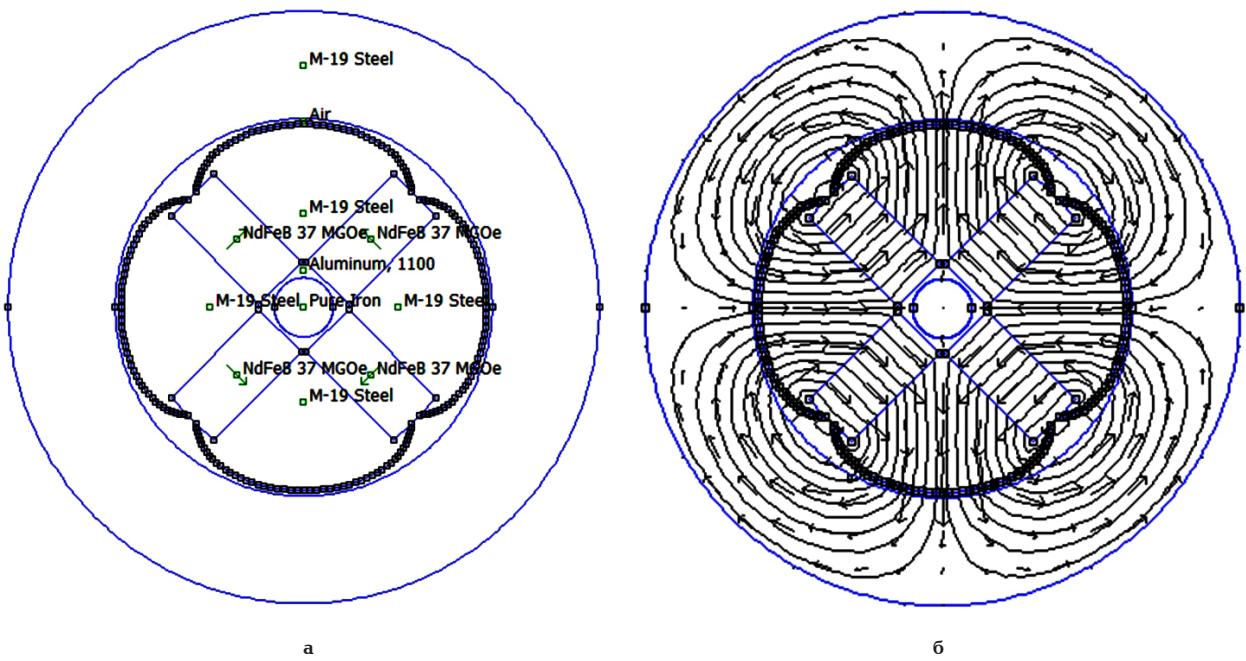


Рис. 4. Схема магнитной цепи СМПМ с оптимальными размерами элементов ротора с полюсными наконечниками в виде дуги эллипса: а — модель в программе FEMM; б — картина магнитного поля

Fig. 4. Scheme of the PMSM magnetic circuit with optimal dimensions of the rotor elements with pole tips in the ellipse arc: а — model in FEMM programme; б — magnetic field view

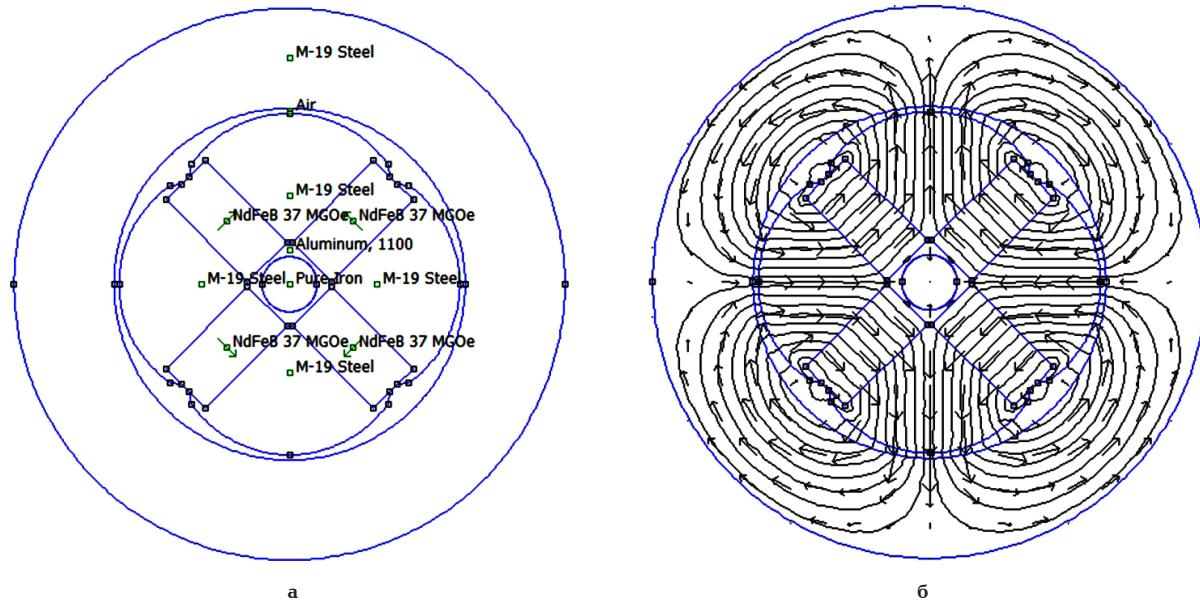


Рис. 5. Схема магнитной цепи СМПМ с полюсными наконечниками на роторе в виде дуги окружности:
а — модель в программе *FEMM*; б — картина магнитного поля

Fig. 5. Scheme of the PMSM magnetic circuit with rotor pole tips shaped as circular arcs:
а — *FEMM* program model; б — magnetic field distribution

зовании метода покоординатного спуска вектор X содержит начальные значения варьируемых параметров, определенные при расчете этим методом первый раз.

При выполнении расчета дважды с различными начальными значениями вектора X были получены одинаковые значения диапазонов варьируемых переменных в массиве X_{range} , с использованием которых определен вектор с оптимальными значениями переменных X_{result} (блоки 16 и 17). Далее рассчитано минимальное значение целевой функции (блок 18), присвоены значения из вектора каждой из пяти переменных (блок 19) и выполнен вывод оптимальных значений размеров элементов ротора (блок 20).

Необходимо отметить, что целевая функция $f(X)$ возвращает значение, рассчитанное по выражению (3) для разных значений переменных величин из допустимых диапазонов.

При решении задачи определены оптимальные значения независимых переменных: $d_{min} = 1,49$ мм; $l_{mag} = 33,7$ мм; $d_1 = 29,1$ мм; $d_2 = 18,2$ мм; $d_3 = 6,9$ мм.

Схема магнитной цепи СМПМ и картина магнитного поля с оптимальными размерами элементов ротора приведены на рис. 4. Выполним сравнение распределения магнитной индукции для роторов с полюсными наконечниками в форме дуги эллипса и дуги окружности. Полюсные наконечники по форме в виде дуги окружности могут быть изготовлены с различным центральным углом для электрических машин с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением [1–4, 9].

На рис. 5 приведена схема магнитной цепи СМПМ (а) и картина магнитного поля (б) с полюсными наконечниками на роторе в виде дуги окружности. Размеры элементов магнитной цепи СМПМ для двух рассмотренных вариантов одинаковые, центральный угол дуги окружности выбран таким образом, чтобы обеспечить такое же расстояние в воздушном зазоре между полюсным наконечником и сердечником статора б (см. рис. 2).

Графики распределения нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности

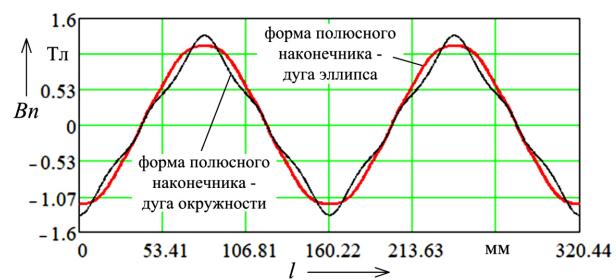


Рис. 6. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора

Fig. 6. Normal component distribution of magnetic induction along the inner circle of the stator core

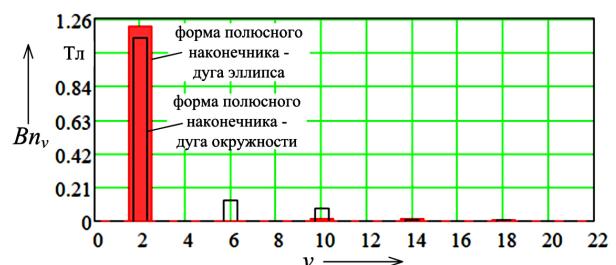


Рис. 7. Гармонический состав нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора СМПМ

Fig. 7. Harmonic structure of the normal component of magnetic induction along the inner circle of the PMSM stator core

сторона сердечника статора для роторов с полюсными наконечниками в виде дуги окружности и дуги эллипса показаны на рис. 6. Результат разложения в ряд Фурье нормальной составляющей распределения магнитной индукции для двух рассмотренных вариантов приведен на рис. 7.

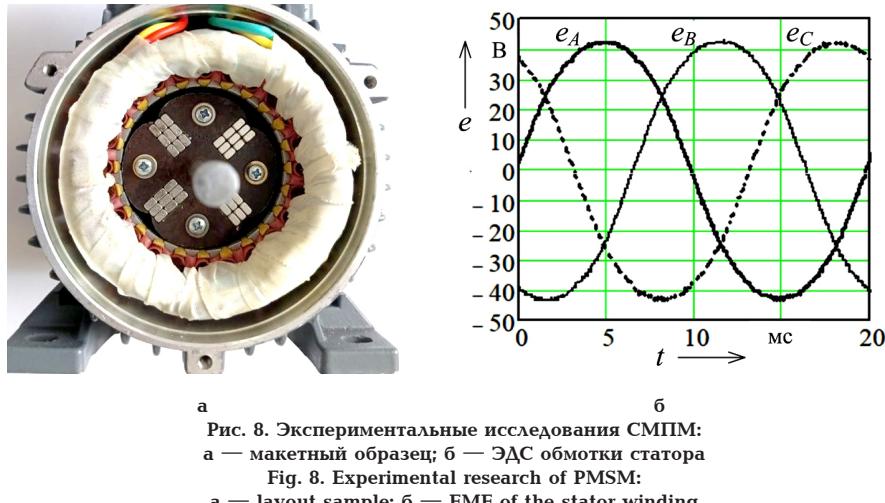


Рис. 8. Экспериментальные исследования СМПМ:
а — макетный образец; б — ЭДС обмотки статора
Fig. 8. Experimental research of PMSM:
a — layout sample; b — EMF of the stator winding

Амплитудные значения основной гармоники магнитной индукции равны 1,14 Тл и 1,21 Тл для роторов с полюсными наконечниками в виде дуги окружности и дуги эллипса соответственно.

Спектр нормальной составляющей магнитной индукции СМПМ содержит по три высшие гармоники: с полюсными наконечниками в виде дуги окружности — 6-я (0,127 Тл), 10-я (0,079 Тл) и 14-я (0,004 Тл); с полюсными наконечниками в виде дуги эллипса — 10-я (0,012 Тл), 14-я (0,012 Тл) и 18-я (0,007 Тл).

Наличие пазов сердечника статора с многофазной обмоткой приводит к появлению зубцовых гармоник в рабочем магнитном потоке; при изготовлении с полюсными наконечниками по форме в виде дуги эллипса можно уменьшить значения высших гармоник в нормальной составляющей магнитной индукции и увеличить значение основной гармоники, что позволит улучшить показатели работы СМПМ.

Для проверки теоретических расчетов собран макетный образец СМПМ с использованием асинхронной машины стандартной серии, у которой короткозамкнутый ротор заменен на ротор с постоянными магнитами (рис. 8а). При испытании макетного образца на холостом ходу с использованием цифрового осциллографа «Rigol» при частоте вращения ротора 1500 об/мин получены кривые фазных ЭДС близкие по форме к синусоидальным (рис. 8б).

В результате проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

1) предложен подход для оптимизации ротора магнитоэлектрической синхронной машины с полюсными наконечниками в форме дуги эллипса. Изготовление полюсных наконечников ротора с тангенциально намагниченными призматическими магнитами по форме в виде дуги эллипса позволяет увеличить основную гармонику нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора и уменьшить содержание высших гармоник в сравнении с полюсными наконечниками, изготовленными в виде дуги окружности;

2) выполнен расчет оптимальных размеров элементов ротора с тангенциально намагниченными призматическими магнитами для четырехполюсной синхронной машины, моделирование магнитного поля выполнено в программе *FEMM*, для решения

оптимизационной задачи использован метод нулевого порядка;

3) для четырехполюсной СМПМ с полюсными наконечниками по форме в виде дуги окружности и дуги эллипса получены графики распределения нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора. При использовании полюсных наконечников по форме в виде дуги эллипса расчетное значение основной гармоники нормальной составляющей магнитной индукции больше на 6 % в сравнении с полюсными наконечниками, изготовленными в виде дуги окружности;

4) изготовлен макетный образец четырехполюсной электрической машины с постоянными магнитами на роторе. При испытании макетного образца на холостом ходу получены кривые фазных ЭДС, близкие по форме к синусоидальным.

Список источников / References

1. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 349 с. ISBN 978-5-469-01381-5. EDN: QMJUHP.
2. Vol'dek A. I., Popov V. V. Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo toka [Electric cars. AC machines]. Saint Petersburg, 2008. 349 p. ISBN 978-5-469-01381-5. EDN: QMJUHP. (In Russ.).
3. Hughes A., Drury B. Electric motors and drives: fundamentals, types and applications. Burlington: Newnes, 2013. 440 p. ISBN-13: 978-0-7506-4718-2, ISBN-10: 0-7506-4718-3.
4. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины. Москва: Высшая школа, 1990. 416 с. ISBN 5-06-000719-7.
5. But D. A. Beskontaktnyye elektricheskiye mashiny [Non-contact electric machines]. Moscow, 1990. 416 p. ISBN 5-06-000719-7. (In Russ.).
6. Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 280 с. ISBN 5-283-00556-9.
7. Balagurov V. A., Galteev F. F. Elektricheskiye generatory s postoyannymi magnitami [Electric generators with permanent magnets]. Moscow, 1988. 280 p. ISBN 5-283-00556-9. (In Russ.).
8. Кулешов Е. В., Сергеев В. Д. Быстроходный магнитоэлектрический синхронный ветрогенератор // Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных и других электромеханических преобразователей энергии: материалы 8-й Всерос. науч.-тех. конф., Омск, 28–31 октября 2003 г. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2003. С. 338–344. EDN: THTFUT.
9. Kuleshov E. V., Sergeyev V. D. Bystrokhodnyy magnitoelektricheskiy sinkhronnyy vetrogenerator [High-speed

magnetoelectric synchronous wind generator] // Sovremennyye Tendentii v Razvitiu i Konstruirovaniu Kollektornykh i Drugikh Elektromekhanicheskikh Preobrazovateley Energii. Omsk, 2003. P. 338 – 344. EDN: THTFUT. (In Russ.).

6. Татевосян А. А. Научные основы проектирования оптимальных конструкций тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). С. 32 – 38. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-32-38. EDN: OKNPKC.

Tatevosyan A. A. Nauchnyye osnovy proyektirovaniya optimal'nykh konstruktsiy tikhokhodnykh sinkhronnykh generatorov s postoyannymi magnitami dlya vetroenergeticheskikh ustanovok [Scientific basis for design low-speed synchronous permanent magnet generators for wind power plants]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 1 (175). P. 32 – 38. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-32-38. EDN: OKNPKC. (In Russ.).

7. Геча В. Я., Захаренко А. Б., Надкин А. К. Проектирование электромашины с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2020. Т. 177, № 4. С. 3 – 10. EDN: NKFWTH.

Gecha V. Ya., Zakharenko A. B., Nadkin A. K. Proyektirovaniye elektromashiny s postoyannymi magnitami, namagnichennymi po skheme Khal'bakha [Designing an electrical machine with permanent magnets magnetized according to halbach scheme]. Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM. *Electromechanical Matters. VNIIEM Studies*. 2020. Vol. 177, no. 4. P. 3 – 10. EDN: NKFWTH. (In Russ.).

8. Шумов Ю. Н., Сафонов А. С. Сверхскоростные и ультраскоростные синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов // Электричество. 2014. № 3. С. 35 – 42. EDN: RWHHDD.

Shumov Yu. N., Safonov A. S. Sverhskorostnye i ul'traskorostnye sinhronnye mashiny s vozbuzhdeniem ot postoyannyyh magnitov [Superhigh and ultrahighspeed synchronous machines excited from permanent magnets: state, design features, and development prospects]. *Elektrичество*. 2014. No. 3. P. 35 – 42. EDN: RWHHDD. (In Russ.).

9. Yusuke Miyajima. Brushless motor with permanent magnet rotor with magnetic poles with flux blocking parts/through holes towards the shaft forming angles. US patent 10,284,037B2; filed April 28th, 2015; published May 7th, 2019.

10. Вавилов В. Е. Выбор магнитной системы ротора электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами // Вестник машиностроения. 2018. № 1. С. 26 – 29. EDN: YNLWIH.

Vavilov V. E. Vybor magnitnoy sistemy rotora elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii s vysokokoerzitivnymi postoyannymi magnitami [Selection of magnetic system of rotor of energy electromechanical converters with high-coercive permanent magnets]. *Vestnik mashinostroyeniya. Russian Engineering Research*. 2018. No. 1. P. 26 – 29. EDN: YNLWIH. (In Russ.).

11. Магин В. В. Особенности проектирования роторов малошумных синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2015. Т. 144, № 1. С. 3 – 15. EDN: UXLBTF.

Magin V. V. Osobennosti proyektirovaniya rotorov maloshchmnykh sinkhronnykh dvigateley s vozbuzhdeniem ot postoyannyykh magnitov [Design features of rotors of low-noise asynchronous motors with excitation from permanent magnets]. Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM. *Electromechanical Matters. VNIIEM Studies*. 2015. Vol. 144, no. 1. P. 3 – 15. EDN: UXLBTF. (In Russ.).

12. Sato T., Igarashi H., Takahashi S. [et al.] Shape optimization of rotor in interior permanent magnet motor based on topology. *IEEJ Transactions on Industry Applications*. 2015. Vol. 135, no. 3. P. 291 – 298. DOI: 10.1541/ieejias.135.291.

13. Ishikawa T., Watanabe T., Kurita N. Effect of cleaning level on topology optimization of permanent magnet synchronous

generator. *IEEJ Journal of Industry Applications*. 2017. Vol. 6, no. 6. P. 416 – 421. DOI: 10.1541/ieejia.6.416.

14. Karnavas Y., Chasiotis I., Peponakis E. Permanent magnet synchronous motor design using grey wolf optimizer algorithm. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2016. Vol. 6, no. 3. P. 1353 – 1362. DOI: 10.11591/ijece.v6i3.9771.

15. Харламов В. В., Москалев Ю. В., Милютин А. Ю. [и др.]. Оптимизация величины неравномерного воздушного зазора синхронной машины с постоянными магнитами на роторе // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 112 – 118. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-112-118. EDN: RAPVDG.

Kharlamov V. V., Moskalev Yu. V., Milyutin A. Yu. [et al.]. Optimizatsiya velichiny neravnomernogo vozduzhnogo zazora sinkhronnoy mashiny s postoyannymi magnitami na rotore [Uneven air gap optimization of synchronous machine with permanent rotor magnets]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 112 – 118. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-112-118. EDN: RAPVDG. (In Russ.).

16. Харламов В. В., Москалев Ю. В., Милютин А. Ю. Оптимизация полюсных наконечников ротора синхронной машины с постоянными магнитами // Известия Транссиба. 2023. № 4 (56). С. 113 – 120. EDN: AYREDN.

Kharlamov V. V., Moskalev Yu. V., Milyutin A. Yu. Optimizatsiya polusnykh nakonechnikov rotora sinkhronnoy mashiny s postoyannymi magnitami [Optimization of rotor pole tips synchronous machine with permanent magnets]. *Izvestiya Transsiba. Journal of Transsib Railway Studies*. 2023. No. 4 (56). P. 113 – 120. EDN: AYREDN. (In Russ.).

17. Finite element method magnetics. URL: <http://www.femm.info/> (accessed: 15.01.2025).

18. Borne P., Popescu D., Filip F. [et al.]. Optimization in engineering sciences: exact methods. London: Wiley, 2013. 307 p. ISBN 9781848214323. DOI: 10.1002/9781118577899.

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: emoe@omgups.ru

МОСКАЛЕВ Юрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 1422-1951

AuthorID (РИНЦ): 657144

ORCID: 0000-0002-0970-937X

AuthorID (SCOPUS): 57200088110

Адрес для переписки: yuriyvm@mail.ru

МИЛЮТИН Алексей Юрьевич, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 3677-7130

AuthorID (РИНЦ): 1150404

Адрес для переписки: emoe@omgups.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 24.01.2025; одобрена после рецензирования 27.02.2025; принята к публикации 06.05.2025.

KHARLAMOV Viktor Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.

SPIN-code: 5093-8463

AuthorID (RSCI): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Correspondence address: emoe@omgups.ru

MOSKALEV Yuriy Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 1422-1951

AuthorID (RSCI): 657144

ORCID: 0000-0002-0970-937X

AuthorID (SCOPUS): 57200088110

Correspondence address: yuriyvm@mail.ru

MILYUTIN Aleksey Yur'yevich, Postgraduate of the Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 3677-7130

AuthorID (RSCI): 1150404

Correspondence address: emoe@omgups.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 24.01.2025; approved after reviewing 27.02.2025; accepted for publication 06.05.2025.