

УДК 621.313.84

## Моделирование магнитного поля и совершенствование конструкции магнитной системы торцевого генератора с постоянными магнитами

Д.С. Корнилов, Ю.Б. Казаков, В.П. Шишкин  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: elmash@em.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В настоящее время распределение магнитного поля в активных частях торцевого генератора с постоянными магнитами остается неисследованным. Конструкция генератора не является оптимальной, отсутствуют рекомендации по выбору геометрии и соотношений размеров магнитопровода. В связи с этим необходима разработка моделей и методов, позволяющих определять рациональные конструкции торцевого генератора с постоянными магнитами и, как следствие, повысить эффективность их работы.

**Материалы и методы:** Моделирование магнитного поля в исследуемом генераторе реализовано с использованием метода конечных элементов, совершенствование конструкции выполнено методами параметрической оптимизации.

**Результаты:** Проведено моделирование стационарного и нестационарного магнитных полей в активных частях машины. Определены пути потоков рассеяния, наиболее насыщенные участки магнитопровода. Предложены технические решения по улучшению использования активного объема машины. Найдены оптимальные соотношения размеров магнитопровода для данного типоразмера генератора.

**Выводы:** Предложенные модели и методы позволяют исследовать магнитные поля и определять рациональные конструкции ТГПМ. Полученные результаты направлены на совершенствование конструкции и повышение эффективности работы ТГПМ.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, торцевой генератор, беспазовый сердечник, кольцевая обмотка якоря, постоянные магниты, моделирование магнитного поля.

## Magnetic Field Simulation and Design Improvement of Magnetic System of Axial-flux Permanent Magnets Generator

D.S. Kornilov, Yu.B. Kazakov, V.P. Shishkin  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: elmash@em.ispu.ru

### Abstract

**Background:** At the present time the magnetic field distribution in active parts of axial-flux permanent-magnet (AFPM) generator has not been investigated yet. The generator design is not optimum, there are no recommendations for geometry choice and ratio of the magnetic circuit sizes. Thus, it is important to develop models and methods which allow to define the rational constructions of axial-flux permanent-magnet generator and, as a result, to increase the operation efficiency.

**Materials and methods:** The magnetic field simulation in the generator is performed with using of the finite-element analysis; design improvement is executed by parametric optimization methods.

**Results:** The simulation of stationary and transient magnetic field in active parts of machine is carried out. Leakage flux paths and most saturation parts of magnetic circuit are defined. Technical decisions for improving the usage of active volume of machine are considered. The optimal aspect ratios of magnetic circuit for current typical size of generator are found.

**Conclusions:** The offered models and methods allow to investigate magnetic fields and to define rational designs of AFPM generators. The obtained results are intended to improve design and operate efficiency of AFPM generator.

**Key words:** wind-power station, axial-flux generator, slotless core, toroidal armature winding, permanent magnets, magnetic field simulation.

Торцевые генераторы небольшой мощности (до 10 кВт) с возбуждением от постоянных магнитов используются в составе малых ветроустановок [1, 2]. Ряд особенностей, а именно: безредукторное тихоходное исполнение с большим числом пар полюсов ( $p > 6$ ); двойной внешний дисковый ротор; кольцевая обмотка на поверхности статора; высококоэрцитивные магниты, – позволяют генератору

более эффективно работать на малых и неустойчивых ветрах. В силу перечисленных особенностей конструкции торцевой генератор с постоянными магнитами (ТГПМ) обладает малым моментом страгивания, малым индуктивным сопротивлением обмотки, жесткой внешней характеристикой, высоким КПД в широком диапазоне частот вращения. Кроме названных преимуществ, описанная конструкция облада-

ет и недостатками: тихоходные машины имеют большие габариты и массу, которые следует по возможности снижать за счет оптимального использования материалов; дорогостоящие высококоэрцитивные магниты должны быть использованы максимально эффективно [3, 4].

При проектировании ТГПМ возникают трудности при расчете распределения магнитного поля в активном объеме генератора, поскольку аналитическое решение для данной конструкции отсутствует, а метод магнитных цепей недостаточно достоверен ввиду сложности реального распределения поля. Разработана двумерная конечно-элементная модель на одно полюсное деление для расчета стационарного и нестационарного магнитных полей в сечении, проходящем по среднему диаметру генератора [5]. Задача решена в плоскопараллельной постановке. Методом параметрической оптимизации выполнен поиск оптимальных соотношений ширины и высоты магнита, зазора между магнитами и немагнитного (рабочего) зазора. В ходе поиска варьировалась ширина и высота магнита при неизменном его объеме, неизменном рабочем зазоре и зазоре между магнитами. Также определены проводимости потоков рассеяния, индуктивные сопротивления катушек обмотки статора.

Для проверки корректности двумерной модели выполнено моделирование трехмерного магнитного поля активной зоны генератора на одном полюсном делении (рис. 1). Результаты двух- и трехмерного моделирования представлены в табл. 1, где  $\Phi_M$  – полный поток магнита,  $\Phi_A$  – поток якоря,  $\Phi_\sigma$  – поток рассеяния магнита,  $\sigma$  – коэффициент рассеяния. Сравнительный анализ результатов показывает, что при расчете потока якоря двумерная модель

дает малую погрешность, тогда как при расчете полного потока магнита и потока рассеяния магнита отличие от результатов трехмерного моделирования значительно. Следовательно, действительный полный поток в роторе будет выше по сравнению с рассчитанным в двумерной модели, что приведет к большему насыщению и уменьшению рабочего магнитного потока.

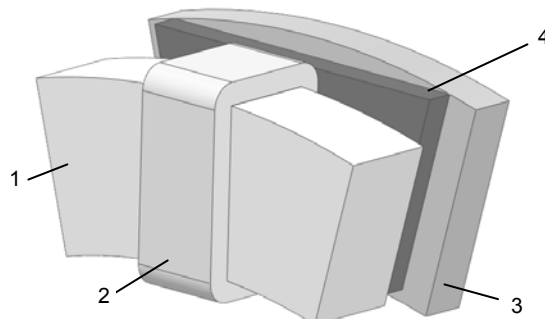


Рис. 1. Элемент твердотельной модели генератора для расчета трехмерного магнитного поля: 1 – магнитопровод статора; 2 – катушка фазы статора; 3 – магнитопровод ротора; 4 – магнит

Таблица 1. Результаты двухмерного и трехмерного моделирования

| Тип анализа    | $\Phi_M$ , мВб | $\Phi_A$ , мВб | $\Phi_\sigma$ , мВб | $\sigma$ , о.е. |
|----------------|----------------|----------------|---------------------|-----------------|
| Трехмерный     | 1,679          | 1,222          | 0,457               | 1,374           |
| Двухмерный     | 1,377          | 1,195          | 0,182               | 1,152           |
| Погрешность, % | 17,98          | 2,21           | 60,18               | 16,16           |

Произведены расчеты трехмерной модели при различной форме рабочей поверхности магнитов: сектора кольца, пятиугольника, трапеции и прямоугольника (рис. 2). Результаты расчетов представлены в табл. 2.

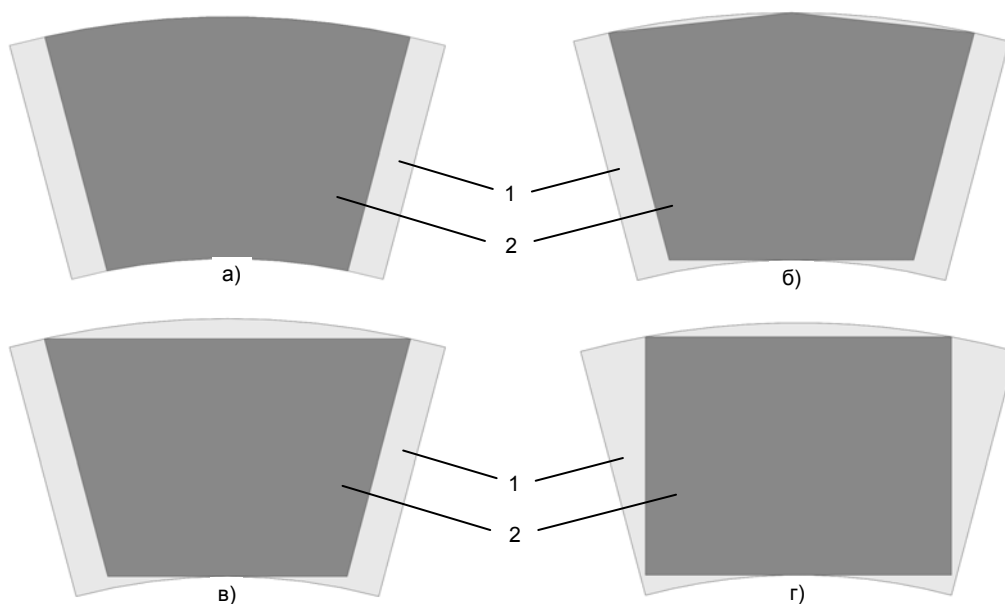


Рис. 2. Форма рабочей поверхности магнита в виде сектора кольца (а), пятиугольника (б), трапеции (в), прямоугольника (г): 1 – магнитопровод ротора; 2 – магнит

Для получения сопоставимых результатов площадь поверхности, обращенной к рабочему зазору, высота магнита, рабочий зазор, зазор между магнитами и средний диаметр кольца магнитопровода были приняты неизменными. Длина магнита и ширина кольца магнитопровода изменялись для сохранения постоянными площади рабочей поверхности магнита и зазора между магнитами. Для магнитов в форме сектора кольца, пятиугольника и трапеции данный зазор не изменяется в радиальном направлении, для прямоугольного магнита за зазор между магнитами принят зазор на среднем диаметре магнитопровода ротора. Анализ результатов показывает, что наиболее оптимальной с точки зрения создания рабочего магнитного потока является форма магнита в виде сектора кольца, по сравнению с ней прямоугольная форма магнита создает поток на 5,8 % меньше.

Таблица 2. Значения магнитных потоков и коэффициентов рассеяния при различной форме рабочей поверхности магнита

| Форма магнита | $\Phi_M$ , мВб | $\Phi_A$ , мВб | $\Phi_\sigma$ , мВб | $\sigma$ , о.е. |
|---------------|----------------|----------------|---------------------|-----------------|
| Сектор        | 1,679          | 1,222          | 0,457               | 1,374           |
| Пятиугольник  | 1,639          | 1,208          | 0,431               | 1,357           |
| Трапеция      | 1,578          | 1,161          | 0,417               | 1,359           |
| Прямоугольник | 1,581          | 1,151          | 0,430               | 1,374           |

Анализ распределения магнитного поля выявил наиболее насыщенные участки магнитопровода ротора в сечении между магнитами, где замыкаются рабочий поток и потоки рассеяния ротора. При этом имеются малонасыщенные участки под магнитом по его продольной оси, что говорит о нерациональном использовании стали магнитопровода. Предлагается частично заполнить данное пространство объемом магнита. Первый вариант предполагает использование пятиугольных в тангенциальном сечении магнитов, расположенных в треугольных радиальных пазах [6]. Второй вариант совершенствования конструкции – расположение под магнитом в прямоугольном пазу второго магнита – меньше по высоте и ширине, чем первый. Распределение магнитных силовых линий и кривая индукции в середине рабочего зазора для данных решений представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Анализ полученных результатов (рис. 3, 4 и табл. 3) показывает, что для пятиугольного магнита рабочий магнитный поток на 15 % больше по сравнению с потоком прямоугольного магнита, принятым за базовый, для набора из двух магнитов поток на 12,8 % больше.

Таблица 3. Значения магнитных потоков и коэффициентов рассеяния при различной форме поперечного сечения магнита

| Форма поперечного сечения магнита | $\Phi_M$ , мВб | $\Phi_A$ , мВб | $\Phi_\sigma$ , мВб | $\sigma$ , о.е. |
|-----------------------------------|----------------|----------------|---------------------|-----------------|
| Прямоугольная                     | 1,371          | 1,196          | 0,175               | 1,146           |
| Пятиугольная                      | 1,563          | 1,376          | 0,187               | 1,136           |
| Ступенчатая                       | 1,519          | 1,349          | 0,170               | 1,126           |

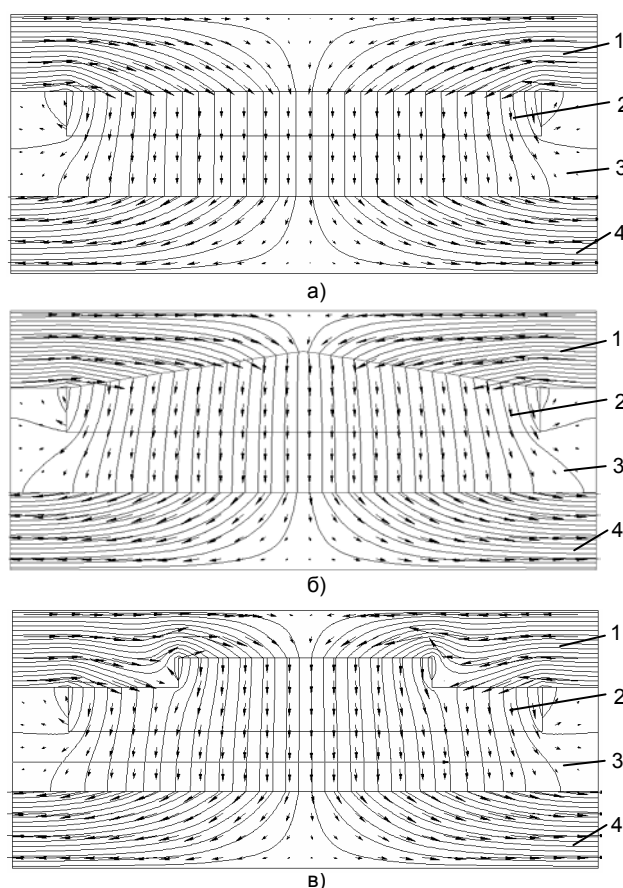


Рис. 3. Картина магнитного поля при прямоугольной (а), пятиугольной (б) и ступенчатой (в) форме поперечного сечения магнита: 1 – магнитопровод ротора; 2 – постоянный магнит; 3 – воздух; 4 – магнитопровод статора

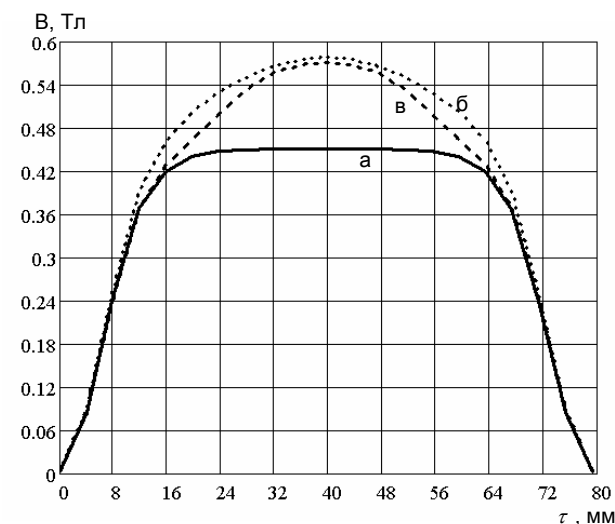


Рис. 4. Форма кривой магнитного потока в середине рабочего зазора при различной форме поперечного сечения магнита: а – прямоугольное сечение; б – пятиугольное; в – ступенчатое

Данные мероприятия позволяют эффективнее использовать объем машины, увеличить магнитный поток, улучшить форму поля в рабочем зазоре и приблизить форму ЭДС якоря к синусоидальной. Одновременно крепление пятиугольных магнитов в пазах более надежно с конструктивной точки зрения, поскольку препятствует их тангенциальному сдвигу.

Анализ результатов расчета описанной выше трехмерной модели электромагнитного поля в генераторе при вращении ротора с учетом наведенных вихревых токов в сердечнике статора, а также формы кривой индуцированной в обмотке якоря ЭДС (рис. 5), влияния поля реакции якоря на основное магнитное поле машины показывает, что амплитуда ЭДС холостого хода при пятиугольных магнитах несколько больше, а форма ЭДС ближе к синусоидальной по сравнению с ЭДС при прямоугольных магнитах.

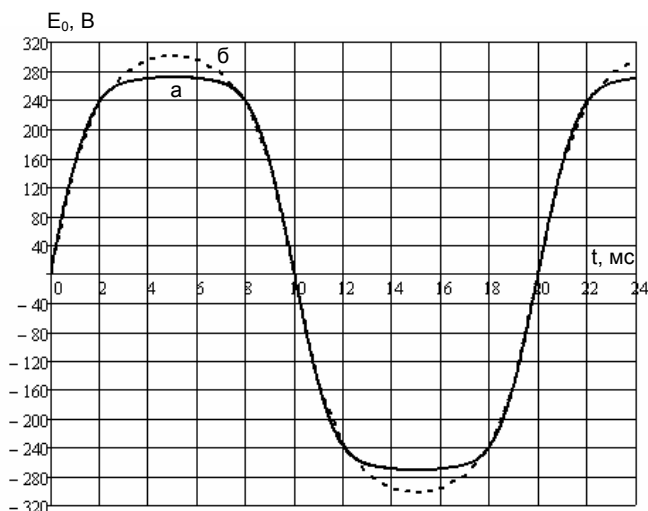


Рис. 5. Форма кривой ЭДС обмотки якоря при прямоугольной (а) и пятиугольной (б) форме поперечного сечения магнита

### Заключение

На основании выполненных моделей магнитного поля ТГПМ выявлено, что двумерная модель дает заниженные значения магнитных потоков (полного потока и потока рассеяния) по сравнению с трехмерной моделью.

В результате трехмерного конечно-элементного моделирования магнитного поля генератора выявлено, что наилучшая форма поверхности магнита – сектор.

Применение пятиугольных в поперечном сечении магнитов или набора из двух магнитов разной ширины позволяет получить больший поток в рабочем зазоре и лучшую форму ЭДС по сравнению с одним прямоугольным магнитом, при этом активный объем машины используется более эффективно.

*Корнилов Дмитрий Сергеевич*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры электромеханики,  
телефон (4932) 26-97-05.

*Казаков Юрий Борисович*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики,  
телефон (4932) 26-97-06.

*Шишкин Валерий Павлович*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, профессор кафедры электромеханики,  
телефон (4932) 26-97-47.

В результате решения нестационарной задачи получена форма кривой ЭДС фазы статора с учетом вихревых токов в массивном магнитопроводе ротора, вызванных высшими пространственными гармоническими полями обмотки якоря.

### Список литературы

1. **Шишкин В.П.** Автоматизированное проектирование торцевых магнитоэлектрических генераторов переменного тока: учеб. пособие / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2006. – 68 с.
2. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ «Автоматизированный комплекс электромагнитных и тепловых расчетов торцевых генераторов с постоянными магнитами для ветроустановок» № 2012613802 от 23 апреля 2012 года / Д.С. Корнилов.
3. **Паластин Л.М.** Синхронные машины автономных источников питания. – М.: Энергия, 1980. – 384 с.
4. **Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф.** Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
5. **Сидоров О.Ю., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф.** Методы конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 331 с.
6. **Патент на полезную модель 124519** Российская Федерация МПК Н 02 К 1/27, Н 02 К 21/24, Н 02 К 15/03. Система возбуждения торцевой магнитоэлектрической машины / Ю.Б. Казаков, Д.С. Корнилов; опубл. 27.01.2013. Бюл. №3.

### References

1. Shishkin, V.P. *Avtomatizirovannoe proektirovanie tortsevykh magnitoelektricheskikh generatorov peremennogo toka* [Computer-aided Design of Axial-flux Magnetolectric Alternating Current Generators]. Ivanovo, 2006. 68 p.
2. Kornilov, D.S. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM «Avtomatizirovannyi kompleks elektromagnitnykh i teplovykh raschetov tortsevykh generatorov s postoyannymi magnitami dlya vetroustanovok» № 2012613802 ot 23 aprelya 2012 goda* [State Registration Certificate for «Automated Complex of Electromagnetic and Heat Calculations of Axial-flux Permanent-magnet Generators for Wind-power Stations» software program № 2012613802, April 23, 2012].
3. Palastin, L.M. *Sinkhronnye mashiny avtonomnykh istochnikov pitaniya* [Synchronous Machines of Independent Supply Sources]. Moscow, Energiya, 1980. 384 p.
4. Balagurov, V.A., Galteev, F.F. *Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami* [Permanent-magnet Electric Generators]. Moscow, Energoatomizdat, 1988. 280 p.
5. Sidorov, O.Yu., Sarapulov, F.N., Sarapulov, S.F. *Metody konechnykh elementov i konechnykh raznostey v elektromekhanike i elektrotekhnologii* [Finite-element and Finite-difference Methods in Electromechanics and Electrotechnologies]. Moscow, Energoatomizdat, 2010. 331 p.
6. Kazakov, Yu.B., Kornilov, D.S. *Sistema vzbuzhdeniya tortsevoy magnitoelektricheskoy mashiny* [Excitation System of Axial-flux Magnetolectric Machine]. Patent RF, no. 124519, 2013.