Tatevosyan A.A.

Tatevosyan A.A.

*кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электрическая техника», Омский государственный
технический университет,
г. Омск, Российская Федерация*

УДК 621.313.17

DOI:

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТИХОХОДНЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Статья посвящена исследованию магнитной системы синхронного генератора с постоянными магнитами (СГПМ). Разработанная магнитная система включает в свой состав неподвижный якорь из восьми отдельных П-образных магнитопроводов электромагнитов, на каждом из которых расположено по две катушки и вращающийся индуктор с размещенными с чередующейся полярностью в два ряда шестью постоянными магнитами. Исследование магнитной системы проводилось на разработанной трехмерной модели в программном комплексе Ansys Maxwell 16.0. Для проверки соответствия имитационной модели реальным физическим процессам выполнена техническая реализация макетного образца СГПМ, а также разработан лабораторный стенд для испытания генератора. Известно, что уменьшение высоты постоянных магнитов, а также увеличение воздушного зазора между якорем и индуктором ухудшают энергетические показатели магнитоэлектрических машин. Однако также известно, что при увеличении воздушного зазора уменьшается размагничивающий поток (реакция якоря), а уменьшение высоты постоянного магнита приводит к уменьшению массогабаритных показателей магнитной системы. С целью определения количественных пределов допустимости изменения величины воздушного зазора и высоты постоянных магнитов, проведено исследование внешней характеристики, а также выходной мощности СГПМ.

Научная новизна работы заключается:

- 1) в разработке магнитной системы СГПМ, обладающей низким пусковым моментом (моментом страгивания);
- 2) разработке имитационной модели СГПМ, которая может быть использована для исследования энергетических характеристик при варьировании параметров магнитной системы;
- 3) технической реализации СГПМ, а также лабораторного стенда для его испытания.

Практическая значимость работы заключается:

- 1) в выводах-рекомендациях, полученных в результате исследования;
- 2) возможности использовать разработанную конструкцию СГПМ в составе ветроэнергетической установки мощностью до 10 кВА.

Ключевые слова: магнитоэлектрический генератор, магнитная система, электромагнитное поле, оптимизация, постоянные магниты.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF SYNCHRONOUS GENERATORS WITH PERMANENT MAGNETS AS A PART OF ELECTRICAL COMPLEXES ON THEIR ENERGY CHARACTERISTICS

The study conducted in the article is devoted to the study of the magnetic system of a synchronous generator with permanent magnets (SGPM). The developed magnetic system includes a fixed anchor consisting of eight separate U-shaped magnetic circuits of electromagnets, each of which has two coils, and a rotating inductor with two alternating polarities placed in two rows of six permanent magnets. The study of the magnetic system was carried out on the developed three-dimensional model in the Ansys Maxwell 16.0 software package. To verify the compliance of the simulation model with real physical processes, the technical implementation of the SGPM prototype was made, and a laboratory test bench was developed for testing the generator. It is known, that a decrease in the height of the permanent magnets, as well as an increase in the air gap between the anchor and the inductor, worsen the energy performance of magnetoelectric machines. However, with an increase in the air gap, the demagnetizing flow decreases (anchor reaction), and a decrease in the height of the permanent magnet leads to a decrease in the mass and geometrics parameters of the magnetic system. In order to determine the quantitative limits of the permissibility of changes in the size of the air gap and the height of the permanent magnets, an external characteristic was studied, as well as the output power of the SGPM.

The scientific novelty of the work lies in:

- 1) the development of a magnetic system SGPM with a low starting torque (the moment of moving);
- 2) the development of a simulation model of SGPM, which can be used to study the energy characteristics when varying the parameters of the magnetic system;
- 3) technical implementation of SGPM, and also a laboratory stand for its testing.

The practical significance of the work lies in:

- 1) conclusions-recommendations from the study;
- 2) the ability to use the developed SGPM design as part of a wind power installation with a capacity of up to 10 kVA.

Key words: magnetoelectric generator, magnetic system, electromagnetic field, optimization, permanent magnets.

Разработка и практическое использование высокотехнологичных электротехнических комплексов в различных сферах производственной деятельности является отличительной особенностью современного уровня развития техники и технологии, они связаны с повышением качества продукции, увеличением спектра услуг при общем уменьшении стоимости и временных затрат. Это одно из направлений в развитии общества, определяющих законы спроса и предложения, основой которых является востребованность и конкурентоспособность на рынке товаров и услуг.

Современные высокотехнологичные электротехнические комплексы (ВЭТК) характеризуются качеством, надежностью и эконо-

мичностью. Их структуру можно графически представить в виде рисунка 1.

Среди различных ВТЭК особое место по актуальности решения проблем в жизни общества занимают вопросы генерации электрической мощности, являющиеся предметом исследований в России и за рубежом.

Использование тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами (СГПМ) в составе ВЭТК, предназначенных для автономного электроснабжения потребителей, является воплощением идеи развития малой энергетики. Ветроэнергетические комплексы с тихоходными СГПМ не требуют сложных монтажных и пусковых работ, экономичны в обслуживании, обладают

высокой надежностью работы. При этом их область применения накладывает серьезные требования по напряжению источника питания, которое должно удовлетворять нормируемым показателям качества электрической

энергии при непостоянстве скорости ветра и отсутствии передаточных и преобразовательных механизмов ветродвигателя [1-5].

Рисунок 1. Характеристики и составляющие ВЭТК

С точки зрения процесса энергопреобразования, тихоходный ВЭТК, использующий электромеханический преобразователь в генераторном режиме, представляет собой сложную электромеханическую систему. Отсутствие общего решения, касающегося параметров электромеханического преобразователя, определяет большое многообразие форм конструктивного исполнения генератора и остро ставит задачу разработки общих принципов построения ВЭТК.

Структурная схема энергетической установки вращательного движения (рис. 2) содержит движитель (Д), обеспечивающий вращающий момент, электромеханический преобразователь (ЭМП), присоединенный к движителю напрямую или посредством передаточного механизма, электрический преобразователь (Пр), управляющее устройство (УУ) и электрическую нагрузку (ЭН).

Рисунок 2. Структурная схема ВЭТК с ЭМП

В настоящем исследовании в качестве электротехнического комплекса рассматривается маломощная ветроэнергетическая установка со следующими выходными параметрами: $S_{\text{ном}} = 250 \text{ ВА}$, $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, $n = 400 \text{ об/мин}$. Для рассматриваемого ВЭТК разработана магнитная система СГПМ, включающая

в свой состав изолированные магнитопроводы.

На рисунке 3 представлена трехмерная модель магнитной системы СГПМ, выполненная в программном комплексе Ansoft Maxwell 16.0 [6].

Рисунок 3. Имитационная модель СГПМ в программном обеспечении Ansoft Maxwell:
а – внешний вид модели; б) размещение постоянных магнитов

Магнитная система СГПМ включает в свой состав индуктор (вращающаяся часть СГПМ с постоянными магнитами) и якорь (неподвижная часть СГПМ с катушками) [7]. Исследуемая СГПМ имеет три пары полюсов и представлена шестью постоянными магнитами, размещенными с чередующейся полярностью в два ряда на индукторе и шестнадцатью катушками, размещенными на якоре. На индукторе в специальных алюминиевых стаканах 1, закрытых алюминиевыми крышками 2, расположены постоянные магниты 4. Для создания замкнутой магнитной цепи постоянные магниты 4 шунтированы стальной пластиной 3. Якорь представляет собой восемь шихтованных П-образных магнитопроводов 5, расположенных по окружности и сдвинутых друг относительно друга на угол 45° .

В конструкции СГПМ используются высококоэрцитивные постоянные магниты NdFeB марки N50 ($B_r = 1.05 \text{ Тл}$, $H_c = 750 \text{ кА/м}$) с осевым направлением намагниченности.

Геометрические параметры магнитной системы приведены в таблице 1.

Катушки СГПМ соединены последовательно и таким образом образуют общую обмотку СГПМ. Соединение двух катушек

каждого электромагнита выполнено встречно для того, чтобы на выходе получить максимальное индуктированное напряжение.

Имитационная модель в Ansoft Maxwell 16.0 обладает следующими допущениями и особенностями:

- типом решения (Solution Type) в Ansoft Maxwell 16.0 выбран переходный процесс (Transient). Этот тип решения используется при расчете динамических характеристик модели;
- расчетная область ограничена объемом, значение векторного магнитного потенциала на границе которого принято равным нулю;
- электромагнитное поле нестационарное и не обладает симметрией;
- в виду отсутствия симметрии в расчетной области представлена полная трехмерная твердотельная модель СГПМ (инкапсулирована из программного продукта SolidWorks 2017);
- обмотки с током представлены в виде параллелепипедов со скругленными боковыми ребрами и имеющими вырез для закрепления на П-образном магнитопроводе;
- относительная магнитная проницаемость шихтованных из электротехнической стали П-образных магнитопроводов опреде-

Таблица 1. Геометрические параметры магнитной системы

Элемент магнитной системы	Геометрические параметры, мм	Магнитные свойства материалов
Индуктор		<p>Постоянный магниты $\varnothing 55 \times 25$ мм Нм30Ди6Р</p>
Якорь		<p>Магнитопровод П-образный $140 \times 105 \times 40$ мм. Обмотка выполнена медным проводом марки ПЭТВ, диаметр жилы 1,8 мм, активное сопротивление каждой катушки $R = 1$ Ом</p>

ляется в соответствии с кривой намагничивания (программно для материала Steel_1008);

- рассматривается установившийся режим вращения индуктора с постоянной угловой скоростью;
- объемная намагниченность постоянных магнитов одинаковая;
- для задания граничных условий трехмерная модель СГПМ помещена в параллелепипед (Region), размер которого по осям x , y , z превышает размер модели в 2 раза;
- на внешней поверхности моделируемой области модели Region принято граничное условие – тангенциальная составляющая функции магнитного потока Φ_τ равна нулю.

В основе выбранного типа решения Transient в общем виде используется система уравнений

$$\begin{cases} \nabla \vec{H} = \sigma(E) \\ \nabla E = \frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla B = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где H – напряженность магнитного поля, кА/м; E – напряженность электрического поля В/м; B – индукция магнитного поля, Тл; σ – относительная магнитная проницаемость материала.

Уравнение механической системы используется в виде

$$J\beta + \lambda\omega = M_{\text{эм}} - M_{\text{нагр}}, \quad (2)$$

где J – момент инерции, кг м²; $M_{\text{эм}}$ – электромагнитный момент, Н м; $M_{\text{нагр}}$ – внешний момент нагрузки; ω – угловая скорость вра-

щения, рад/с; β – угловое ускорение, рад/с²; λ – коэффициент демпфирования, Н м с.

Основные параметры СГПМ приведены в таблице 2.

Таблица 2. Общие параметры СГПМ

Наименование, параметры/эскиз модели	Значение
Полная мощность, ВА	300
Выходное напряжение, В	220
Частота вращения индуктора, Гц	20
Число пар полюсов машины	3
Число электромагнитов	8
Число катушек на электромагнитах	2
Линейная токовая нагрузка, А/м	20 000
Среднее значение магнитной индукции в зазоре, Тл	0.4
Рабочий зазор, мм	10
Плотность тока в проводнике, А/м ²	2 10 ⁶

Для сопоставления результатов моделирования выполнена техническая реализация СГПМ (рис. 4, а), а также разработан лабора-

торный стенд для исследования режимов работы СГПМ (рис. 4, б).

а)

б)

Рисунок 4. Низкооборотный синхронный генератор с постоянными магнитами (а), функциональная схема лабораторного стенда (б)

Обеспечение заданной скорости вращения индуктора СГПМ осуществляется ведущим асинхронным двигателем при помощи преобразователя частоты. Скорость вращения во всех режимах испытаний СГПМ поддерживалась 400 об/мин.

Эксперимент и моделирование проводились при различных режимах работы СГПМ: холостого хода при подключенной к выходу СГПМ нагрузочного реостата ($R_{\text{нагр}}=300$ Ом, $R_{\text{нагр}}=200$ Ом, $R_{\text{нагр}}=100$ Ом) и короткого замыкания.

В программном обеспечении Ansoft Maxwell 16.0 моделирование выполнялось в тех же режимах. Схема соединения катушек и присоединение электрической нагрузки СГПМ производилось в программном обеспечении Ansoft Maxwell Circuit Editor.

Осциллограммы, полученные в ходе экспериментального исследования и имитационного моделирования, приведены на рисунке 5.

Рисунок 5. Осциллограммы, полученные в результате экспериментальных испытаний и имитационного моделирования СГПМ: а – холостой ход, б – $R_{\text{нагр}}=300$ Ом; в – $R_{\text{нагр}}=200$ Ом; г – $R_{\text{нагр}}=100$ Ом; д – короткое замыкание

Коэффициент делителя напряжения в эксперименте для сигнала напряжения U равен 40.23.

Графики нагрузочной характеристики, полученные в результате имитационного моделирования и экспериментального исследования, приведены на рисунке 6.

Рисунок 6. Исследование СГПМ: 1 – результаты моделирования; 2 – результаты эксперимента

Расхождение результатов моделирования и эксперимента находится в пределах допустимой погрешности (среднеквадратичное отклонение в относительных единицах составляет менее пяти процентов). Указанное обстоятельство делает возможным проведение дальнейших исследований по влиянию конструктивных особенностей СГПМ на энергетические характеристики электротехнического комплекса в программном обеспе-

чении Anspft Maxwell 16.0 на имитационной модели.

Выполним расчет энергетических параметров СГПМ при изменении величины зазора δ между индуктором и якорем. Величина зазора изменяется в диапазоне от 10 до 20 мм с шагом 5 мм. На рисунке 7 представлена имитационная модель СГПМ с указанием изменяющегося параметра магнитной системы.

Рисунок 7. Воздушный зазор между якорем и индуктором

На рисунке 8 представлена нагрузочная характеристика СГПМ при различных значениях воздушного зазора.

Выходная мощность электротехнического комплекса приведена на рисунке 9.

Анализ полученных результатов моделирования указывает, что величина воздушного зазора существенно влияет на энергетические характеристики комплекса в целом. Так, увеличение воздушного зазора более чем в

два раза приводит к уменьшению жесткости нагрузочной характеристики генератора, снижению напряжения на выходе СГПМ и мощности более чем на 60 %. Необходимо отметить, что уменьшение воздушного зазора приведет к увеличению индукции в зазоре, однако вместе с тем возрастет реакция якоря, а также начнут более остро проявляться вибрации, связанные с различной объемной намагниченностью постоянных магнитов.

Таким образом, уменьшение воздушного зазора не является очевидным решением оптимизации магнитной системы СГПМ, что делает задачу поиска соотношения величины

воздушного к высоте постоянного магнита во многом исследовательской, связанной с определением максимальной энергии, отдаваемой постоянным магнитом.

Рисунок 8. Внешняя характеристика СГПМ при различной величине воздушного зазора: 1-10 мм; 2-15 мм; 3-20 мм

Рисунок 9. Выходная мощность в зависимости от величины воздушного зазора: 1-10 мм; 2-15 мм; 3-20 мм

Выполним исследование высоты постоянного магнита на энергетические характеристики электротехнического комплекса. На

рисунке 10 представлен изменяемый параметр магнитной системы СГПМ.

Рисунок 10. Высота постоянного магнита

Изменение высоты постоянного магнита проведем в имитационной модели для следующих значений высоты постоянного магнита h_m : 25 мм, 20 мм, 15 мм, 10 мм, 5 мм.

Исследование влияния высоты постоянного магнита на нагрузочную характеристику СГПМ приведено на рисунке 11.

Рисунок 11. Нагрузочная характеристика СГПМ при различной высоте постоянного магнита: 1-25 мм; 2-20 мм; 3-15 мм; 4-10 мм; 5-5 мм

Выходная мощность электротехнического комплекса при различной высоте постоян-

ного магнита приведена на рисунке 12.

Рисунок 12. Выходная мощность СГПМ в зависимости от высоты постоянного магнита: 1-25 мм; 2-20 мм; 3-15 мм; 4-10 мм; 5-5 мм

Результаты моделирования магнитной системы СГПМ с различной высотой магнита указывают на значительные ухудшения энергетических параметров при уменьшении высоты постоянного магнита более чем на 10 мм, при этом уменьшение высоты магнита до указанного значения приводит к незначительному снижению выходных характеристик СГПМ и может быть скомпенсировано за счет других факторов, например, увеличения ампер-витков катушек или уменьшения воздушного зазора.

В статье проведен параметрический анализ влияния конструктивных параметров СГПМ на энергетические характеристики ветроэнергетической установки. По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Разработанная имитационная модель в программном обеспечении Ansoft Maxwell 16.0 может использоваться для анализа энергетических характеристик ВЭТК.

2. Оптимизация конструкции магнитной системы СГПМ, связанная с уменьшением

массы активных материалов при сохранении выходных параметров, возможна на пути определения оптимального соотношения величины воздушного зазора и высоты постоянных магнитов.

3. Для рассмотренной конструкции магнитной системы уменьшение высоты постоянных магнитов до 30 % не приводит к значительному ухудшению выходных параметров СГПМ.

Список литературы

1. Евдокимов А.А., Чарыков В.И., Саттаров Р.Р., Игнастьев С.Г., Городских А.А. Расчет магнитной системы магнитоэлектрических генераторов мощностью до 10 кВА для ветроэнергетических установок // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – Вып. № 1. – Т. 14. – 2018. – С. 27-34.
2. Кушнир В.Г., Кошкин И.В., Кошкина А.И., Кушнир А.С. Имитационное моделирование системы «ветронасос – гидротурбина» // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – Вып. № 4. – Т. 12. – 2016. – С. 28-33.
3. Roberto Lacal-Arantequi Globalization in the wind energy industry: contribution and economic impact of European companies. Renewable Energy, Volume 134, April 2019, p. 612-628.
4. Gugliani G.K., Sarkar A., Ley C., Mandal S. New methods to assess wind resources in terms of wind speed, load, power and direction. Renewable Energy, Volume 129, Part A, December 2018, p. 168-182.
5. Battisti L., Benini E., Brighenti A., Dell'Anna S., Raciti Castelli M. Small wind turbine effectiveness in the urban environment // Renewable Energy, Volume 129, Part A, December 2018, pp. 102-113.
6. Ansoft Maxwell 3D. User's Guide // Ansoft Corporation 225 West Station Square Drive Suite 2000, Pittsburg, PA 15219 USA.
7. Бесколлекторный синхронный генератор с постоянными магнитами / Татевосян А.А., Татевосян А.С. Пат. 2565775 Российская Федерация, МПК Н 02 К 21/14. 2014140005/07; заявитель и патентообладатель Омский государственный технический университет; заявл. 02.10.14; опубл. 20.10.2015, Бюл. № 29.

References

1. Evdokimov A.A., Charykov V.I., Sattarov R.R., Ignast'ev S.G., Gorodskih A.A. Raschet magnitnoj sistemy magnitoelektricheskikh generatorov moshhnost'ju do 10 kVA dlja vetroenergeticheskikh ustanovok // Elektrotehnicheskije i informacionnyje komplekсы i sistemy. – 2018. – Vyp. № 1. – Vol. 14. – 2018. – P. 27-34.
2. Kushnir V.G., Koshkin I.V., Koshkina A.I., Kushnir A.S. Imitacionnoje modelirovanije sistemy «vetronasos – gidroturbina» // Elektrotehnicheskije i informacionnyje komplekсы i sistemy. – 2018. – Vyp. - № 4. – Vol. 12. – 2016/ - P. 28-33.
3. Roberto Lacal-Arantequi Globalization in the wind energy industry: contribution and economic impact of European companies. Renewable Energy. – Vol. 134, April 2019. – p. 612-628.
4. Gugliani G.K., Sarkar A., Ley C., Mandal S. New methods to assess wind resources in terms of wind speed, load, power and direction. Renewable Energy, Volume 129, Part A, December 2018, p. 168-182.
5. Battisti L., Benini E., Brighenti A., Dell'Anna S., Raciti Castelli M. Small wind turbine effectiveness in the urban environment // Renewable Energy, Volume 129. – Part A. – December 2018. – p. 102-113
6. Ansoft Maxwell 3D. User's Guide //Ansoft Corporation 225West Station Square Drive Suite 2000, Pittsburg, PA 15219 USA/
7. Beskollektornyj sinhronnyj generator s postojannymi magnitami / Tatevosjan A.A., Tatevosjan A.S. Pat. 2565775 Rossijskaja Federacija, MPK H 02 K 21/14. 2014140005/07; zjavitel' i patentoobladatel' Omskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet; zjavl. 02.10.14; opubl. 20.10.2015, Bjul. № 29.