

УДК 621.313.84

Сравнение конструкций синхронных машин со встроенным трансформатором момента для возобновляемой энергетики

Е. В. Конюшенко*, И. Рахманов, О. Н. Молоканов

*Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт",
г. Москва, Россия;

e-mail: Konyushenko.elizaveta@yandex.ru

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
08.09.2023;

получена
после доработки
23.10.2023;

принята
к публикации
02.11.2023

Ключевые слова:

синхронный генератор,
трансформатор момента,
постоянные магниты,
прямой привод,
низкоскоростные
машины,
магнитомягкие вставки

Повышение удельного момента электрических машин является актуальной проблемой для целого ряда силовых низкоскоростных электромеханических систем, одна из таких систем – ветроэнергетическая установка. Нахождение оптимальной конструкции синхронного генератора со встроенным трансформатором момента актуально для дальнейшего развития ветроэнергетики. Цель исследования состоит в определении оптимальной конструкции генератора со встроенным трансформатором момента для ветроэнергетических установок, что является решением проблемы создания низкоскоростных, высокомоментных и относительно компактных электрических генераторов и даст возможность отказаться от зубчатой передачи. В работе рассматриваются две конструкции синхронного генератора прямого привода со встроенным трансформатором момента с двумя и тремя воздушными зазорами. Расчет производится в программном комплексе Comsol Multiphysics, основанном на методе конечных элементов. Основные критерии для сравнения: выходная мощность генератора, максимальный момент тихоходного ротора, к которому подключается ветроколесо, максимальный момент на единицу объема генератора и максимальный момент на массу постоянных магнитов. По результатам расчета сделан вывод, что синхронный генератор с двумя воздушными зазорами имеет больший момент на единицу объема и момент на массу постоянных магнитов, т. е. при одинаковой мощности генераторов расходы на активные материалы будут меньше. При равных габаритных параметрах такой тип имеет большую выходную мощность по сравнению с синхронным генератором прямого привода и синхронным генератором с тремя воздушными зазорами.

Для цитирования

Конюшенко Е. В. и др. Сравнение конструкций синхронных машин со встроенным трансформатором момента для возобновляемой энергетики. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 441–448. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-441-448>.

Comparison of designs of synchronous machines with integrated torque transformer for renewable energy

Elizaveta V. Koniushenko*, Ilias Rahmanov, Oleg N. Molokanov

*National Research University "Moscow Power Energy Institute", Moscow, Russia;

e-mail: Konyushenko.elizaveta@yandex.ru

Article info

Received
08.09.2023;

received
in revised form
23.10.2023;

accepted
02.11.2023

Key words:

synchronous generator,
torque transformer,
permanent magnets,
direct drive,
low-speed machines,
soft magnetic inserts

Abstract

Increasing the specific torque of electric machines is an urgent problem for a number of low-speed power electromechanical systems, one of such systems is a wind power plant. Determining the optimal design of a synchronous generator with a built-in torque transformer is important for the further development of wind power. The purpose of the research is to determine the optimal design of a generator with a built-in torque transformer for wind power plants, which is a solution to the problem of creating low-speed, high-torque and relatively compact electric generators, and will make it possible to abandon the gear drive. The paper examines two designs of a direct drive synchronous generator with a built-in torque transformer with two and three air gaps. The calculation is performed using the Comsol Multiphysics software based on the finite element method. The main criteria for comparison are the generator's output power, the maximum torque of the low-speed rotor connected to the wind turbine, the maximum torque per unit volume of the generator, and the maximum torque per unit mass of the permanent magnets. Based on the calculation results, it has been concluded that a synchronous generator with two air gaps has a higher torque per unit volume and torque per mass of permanent magnets, i. e. with the same power, the expenses on active materials will be lower. This type of generator has a higher output power compared to both the direct-drive synchronous generator and the synchronous generator with three air gaps, with the same dimensional parameters.

For citation

Koniushenko, E. V. et al. 2023. Comparison of designs of synchronous machines with integrated torque transformer for renewable energy. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 441–448. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-441-448>.

Введение

Надежность ветроэнергетических установок (ВЭУ) напрямую связана с характеристиками механической части этих установок, эффективностью автоматизированных систем управления и выбором типа генератора. При проектировании электрогенераторов основной задачей является оптимальное отношение их стоимости и энергетической эффективности.

Особенностью электрогенераторов, которые используются в ВЭУ, является высокий коэффициент полезного действия (КПД) выработки электроэнергии на низкой скорости вращения ротора (Cooke *et al.*, 2017). Повышение удельного момента электрических машин является актуальной проблемой для целого ряда силовых низкоскоростных электромеханических систем (Qu *et al.*, 2013). Наиболее распространенный способ преобразования низкоскоростного вращения ветроколеса в электроэнергию – использование системы электрогенератора с промежуточным звеном, которым в основном является механический мультипликатор (Li *et al.*, 2019). При применении низкоскоростных машин с промежуточным звеном массогабаритные параметры ветроагрегата имеют большее значение относительно системы прямого привода (Wang *et al.*, 2018; Cheng *et al.*, 2020), также механический мультипликатор является основной причиной простоя оборудования ВЭУ в связи с низкой надежностью, а частота его отказов растет с увеличением мощности генератора (Li *et al.*, 2019).

В системе с прямым приводом с увеличением мощности ВЭУ увеличиваются массогабаритные показатели электрического генератора, что вызывает трудности с транспортировкой и монтажом (Liu *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2019).

В 2008 г. возникла идея объединения магнитных систем магнитного редуктора и электрической машины (Atallah *et al.*, 2008), так называемая электрическая машина псевдопрямого привода. При этом выделяют две группы подобных машин – с двумя и тремя воздушными зазорами, их исследованию посвящено мало работ и нет подробных данных о технико-экономических характеристиках относительно генераторов прямого привода. Соединение магнитным путем магнитного мультипликатора и синхронного генератора позволяет не применять зубчатую передачу и способно повысить КПД (Atallah *et al.*, 2008), а также увеличить надежность системы за счет отсутствия механического зацепления.

Обе группы устройств объединяет относительно высокая сложность магнитной системы – у них два ротора, один из которых не подсоединяется к валу и служит для бесконтактного преобразования момента, кроме этого, параметры магнитных систем находятся во взаимном влиянии и должны быть четко согласованы между собой. При этом для данных машин является нормой насыщение некоторых элементов конструкции, что делает неэффективными аналитические подходы к расчету магнитных систем. Исследования электрических машин с тремя воздушными зазорами в основном выполнены применительно к электротранспорту (Rasmussen *et al.*, 2009; 2013; Frandsen *et al.*, 2015a; б; Frandsen *et al.*, 2013), лишь недавно опубликована статья в области ветроэнергетики, рассматривающая генератор малой мощности – порядка 3 кВт (Kjaer *et al.*, 2020).

Часть исследований электрических машин с двумя воздушными зазорами изучает двигатели (Dragan *et al.*, 2019; Bouheraoua *et al.*, 2013; 2015). Авторы (Bouheraoua *et al.*, 2013) опубликовали работу, посвященную расчету аналитической модели, которая не учитывает насыщение стали, что критично для данного типа машин и, как следствие, такая модель обладает низкой точностью.

Проблема создания мощных и компактных электрических машин вызвана существующими принципиальными ограничениями тепловых и электромагнитных нагрузок в традиционных электрических машинах. При естественном способе охлаждения эти ограничения определяются предельными физическими свойствами традиционных электротехнических материалов. Поэтому для решения обозначенной проблемы многие исследователи рассматривают использование материалов, обладающих принципиально более высокими свойствами, например, объемных сверхпроводников и сверхпроводящих обмоток, что требует наличия дополнительных криогенных систем. По данным опубликованного отчета (Abrahamsen *et al.*, 2017) генератор со встроенным трансформатором момента оказался выгоднее по технико-экономическим показателям, чем сверхпроводящий генератор. В выводе по отчету отмечено, что это связано с высокой стоимостью сверхпроводящих обмоток и низкой критической плотностью тока (Abrahamsen *et al.*, 2017). В упомянутом отчете, как и в немногих статьях, мало информации о конкретных размерах, методиках проектирования магнитных систем, способах анализа и методиках расчета стоимости.

Наиболее перспективными для применения такого типа электрических машин являются регионы с экстремальными погодными условиями, в которых обозначенные проблемы мультипликаторов усиливаются многократно – из-за низкой температуры масло густеет и теряет свои свойства, металл зубчатых колес становится хрупким, что в сочетании с высокими динамическими нагрузками из-за порывов ветра увеличивает вероятность аварии.

Основная цель исследования состоит в решении проблемы создания низкоскоростных, высокомоментных и относительно компактных электрических генераторов, что позволит отказаться от зубчатой передачи без значительного увеличения массогабаритных показателей электрической машины и ее стоимости. Сравнительный анализ двух конструкций синхронного генератора прямого привода при одинаковых

массогабаритных параметрах дает возможность исследовать эффективность и надежность системы генерации электроэнергии в составе ветровой электростанции.

Материалы и методы

Синхронный генератор с магнитным редуктором, изображенный на рис. 1, состоит из нескольких основных компонентов: статор, тихоходный и быстроходный ротор. Статор состоит из кольцевого магнитопровода с закрепленными на внутренней поверхности радиально намагниченными постоянными магнитами. Быстроходный ротор также является кольцевым магнитопроводом с закрепленными на внешней поверхности радиально намагниченными постоянными магнитами. Тихоходный ротор состоит из сегментов, выполненных из магнитомягкого материала.

В работе рассмотрены две конструкции генератора со встроенным трансформатором момента – с двумя воздушными зазорами (рис. 1, а) и с тремя воздушными зазорами (рис. 1, б).

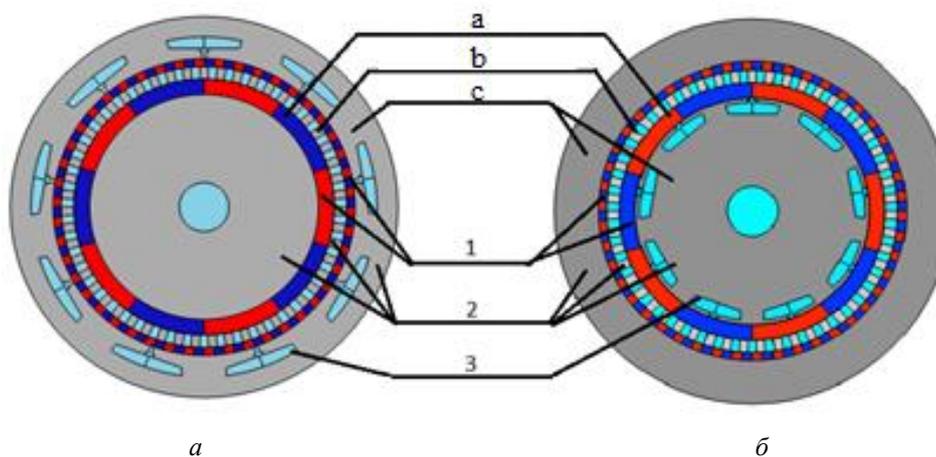


Рис. 1. Синхронный генератор со встроенным трансформатором момента:

а – конструкция синхронной машины с двумя воздушными зазорами,

б – конструкция синхронной машины с тремя воздушными зазорами:

1 – постоянные магниты, 2 – электротехническая сталь, 3 – обмотка,

а – быстроходный ротор, б – тихоходный ротор, с – статор

Fig. 1. Synchronous generator with an integrated torque transformer:

а – design of a synchronous machine with two air gaps,

б – design of a synchronous machine with three air gaps:

1 – permanent magnets, 2 – electrical steel, 3 – winding,

а – high-speed rotor, б – low-speed rotor, с – stator

Принцип работы синхронного генератора со встроенным трансформатором момента связан с модуляцией магнитного поля в воздушных зазорах между роторами и статором. Наличие магнитомягких вставок (модулятора) изменяет гармонический состав магнитного поля, вызываемого постоянными магнитами, что создает условия для устойчивого взаимодействия роторов. Магнитное колесо с меньшим количеством постоянных магнитов (ПМ) является быстроходным ротором, а колесо, модулирующее магнитное поле, является тихоходным ротором, к которому подключается ветроколесо. Неподвижная часть машины, на которой располагаются обмотки, называется статором.

Этот процесс взаимодействия делает генератор синхронным, и соотношение частот вращения магнитного поля статора и быстроходного ротора обратно пропорционально числу пар полюсов на них. Количество магнитомягких вставок тихоходного ротора определяется по формуле

$$n_r = p_s + p_r, \quad (1)$$

где p_s – число пар полюсов ПМ статора, p_r – число пар полюсов ПМ быстроходного ротора, n_r – количество сегментов тихоходного ротора.

Для сравнения конструкций генераторов были приняты одинаковые габаритные параметры магнитной системы: внешний диаметр электрических машин составляет 1 м, длина генератора – 1,5 м, ширина воздушных зазоров – 1 мм, количество пар полюсов ПМ быстроходного ротора – 5 и статора – 46, количество магнитомягких вставок тихоходного ротора составляет 51 сегмент, плотность тока в обмотке – 6 А/мм².

Постоянные магниты статора и роторов намагничены радиально. Основные отличия синхронных генераторов заключаются в количестве воздушных зазоров и в расположении обмоток статора. Трансформатор момента создан на основе коаксиальной магнитной передачи.

Расчет производится на основе метода конечных элементов в программном комплексе Comsol Multiphysics. Моделирование магнитных систем выполнено с помощью метода конечных элементов в 2D в статическом режиме работы со следующими допущениями:

- не учитывались краевые эффекты;
- магнитные свойства электротехнической стали задавались при помощи нелинейной кривой намагничивания;
- не учитывались магнитные потери на гистерезис и индуцированные токи;
- свойства постоянных магнитов задавались через остаточную магнитную индукцию и магнитную проницаемость.

При моделировании генераторы разделяются на три характерные области и уравнения (2–4) конкретизируются для каждой из них (рис. 1): область 1 – ПМ чередующейся полярности ($J = 0$); область 2 – магнитопровод из электротехнической стали ($B_r = 0, J = 0$); область 3 – обмотка, выполненная из меди ($B_r = 0$).

Расчетные уравнения в общем виде записываются на основе уравнений Максвелла в дифференциальной форме

$$\nabla \cdot B = 0; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot H = J; \quad (3)$$

$$B = \mu_0 \mu_r (H)H + B_r, \quad (4)$$

где B – вектор магнитной индукции, Тл; J – вектор плотности тока, А/мм²; B_r – вектор остаточной магнитной индукции, Тл; H – вектор напряженности магнитного поля, А/м; μ_0 – магнитная постоянная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость, которая зависит от модуля вектора напряженности магнитного поля H .

Граничные условия в общем виде могут быть представлены формулами

$$n \cdot (B_1 - B_2) = 0; \quad (5)$$

$$n \cdot (H_1 - H_2) = J; \quad (6)$$

$$n \cdot (B_{\text{вн}}) = 0, \quad (7)$$

где $B_1, B_2, B_{\text{вн}}$ – векторы магнитной индукции на границе смежных областей и на внешней границе модели, Тл; H_1, H_2 – векторы напряженности магнитного поля на границе смежных областей, А/м.

Материал постоянных магнитов выбран марки N42. Упрощенная схема обмотки: ...AA|C'C'|BB|A'A'|CC|B'B'... (рис. 2).

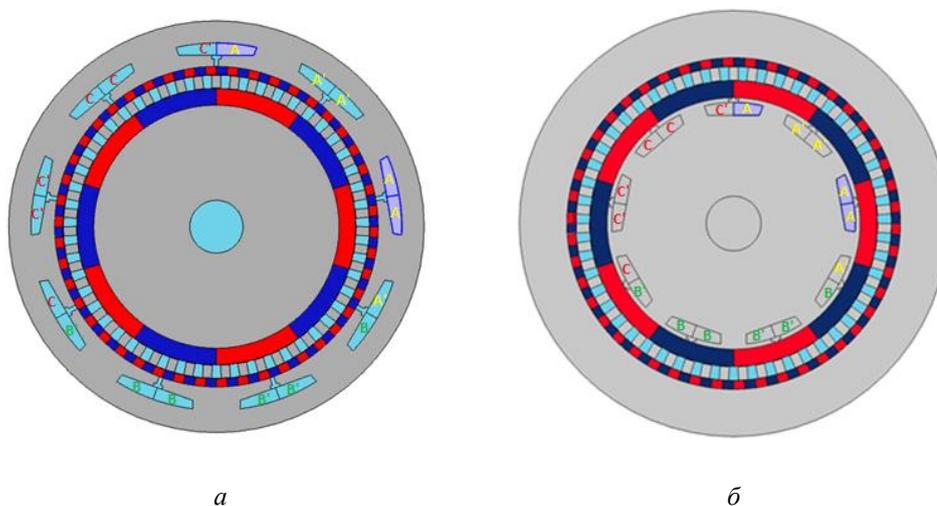


Рис. 2. Схема обмоток: *a* – конструкция синхронной машины с двумя воздушными зазорами, *б* – конструкция синхронной машины с тремя воздушными зазорами

Fig. 2. Winding diagram: *a* – design of a synchronous machine with two air gaps, *b* – design of a synchronous machine with three air gaps

Передаточное отношение трансформатора момента рассчитывается по формуле (8) и составляет 11,2

$$i = \frac{p_s}{p_r} + 1, \quad (8)$$

где p_s – число пар полюсов ПМ статора, p_r – число пар полюсов ПМ быстрого ротора, i – передаточное отношение.

Материал магнитопровода статора и роторов задается в соответствии с характеристикой намагничивания стали 2411. Расчет проводится в программном обеспечении Comsol Multiphysics с помощью встроенной физики Rotating Machinery, Magnetic.

В разделе Rotating Machinery, Magnetic задаются подразделы Ampère's Law, Force calculation, Continuity и Coil.

Подраздел Ampère's Law задается для каждого материала отдельно и в нем выбираются соответствующие элементы конструкции.

В подразделе Ampère's Law выбираются постоянные магниты: в одном подразделе выбираются постоянные магниты одной полярности, а в другом подразделе – противоположной полярности соответственно. В данном случае в подпункте Constitutive Relation B-H выбирается Remanent Flux Density, в строке r задается "1" для магнитов одной полярности и "-1" для магнитов противоположной полярности.

В разделе Force Calculation задаются вращающиеся части генератора и присваиваются названия сил в каждом разделе для дальнейшего расчета.

Плотность тока в фазах обмотки задается следующим образом:

$$\text{в фазе } A: J_z = J \text{ A/мм}^2,$$

$$A': J_z = -J \text{ A/мм}^2,$$

$$B: J_z = -J/2 \text{ A/мм}^2,$$

$$B': J_z = J/2 \text{ A/мм}^2,$$

$$C: J_z = -J/2 \text{ A/мм}^2,$$

$$C': J_z = J \text{ A/мм}^2.$$

Для задания токов в обмотке статоре добавляются разделы Coil для каждой фазы. В каждом из разделов необходимо задать ток фаз A, A', B, B', C, C' соответственно. Фазы выбираются согласно приведенной выше последовательности чередования фаз в обмотке статора.

В разделе Definitions добавляем подраздел Moving Mesh для области, которая вращается в процессе расчета. Для этого в Moving Mesh добавляем Rotating Domain, а затем в Domain Selection выбираются все элементы вращающейся части электрической машины. В Rotating Angle задается значение угла, на который будет происходить вращение.

Результаты и обсуждение

В таблице представлены результаты расчета амплитудного момента тихоходного ротора (M_{\max}), удельного момента на массу постоянных магнитов (M_m), рассчитанного по формуле (9), а также удельного момента на единицу объема, занимаемого машиной (M_v), рассчитанного по формуле (10) для двух конструкций синхронного генератора со встроенным трансформатором момента

$$M_m = \frac{M}{m_{\text{ПМ}}}; \quad (9)$$

$$M_v = \frac{M}{V}, \quad (10)$$

где M_v – момент на единицу объема, кН·м/м³; M_m – момент на массу ПМ, Н·м/кг; M – момент на тихоходном роторе, Н·м; i – передаточное отношение; V – объем машины, м³; $m_{\text{ПМ}}$ – масса ПМ, кг.

Таблица. Сравнение конструкций синхронного генератора со встроенным трансформатором момента
Table. Comparison of designs of a synchronous generator with a built-in torque transformer

С двумя воздушными зазорами			С тремя воздушными зазорами		
M_{\max} , кН·м	M_m , Н·м/кг	M_v , кН·м/м ³	M_{\max} , кН·м	M_m , Н·м/кг	M_v , кН·м/м ³
3,55	2,50	4,38	2,57	1,81	3,18

На рис. 3–4 представлены картины распределения линий магнитного потока в синхронных генераторах.

Из рис. 3–4 видно, что в системе с двумя воздушными зазорами линии магнитного поля расположены гуще и, соответственно, магнитное поле в данном исполнении сильнее. Также если обратить внимание на насыщение электротехнической стали, можно заметить, что в системе с тремя зазорами сталь менее насыщена и материал недоиспользуется, следовательно, срок окупаемости машины увеличивается.

Для сравнения конструкций генераторов рассчитаем по формуле (11) выходную мощность. Так как расчет проводился в 2D и краевые эффекты не были учтены, то возьмем запас момента 30 %. Типичная номинальная частота вращения ветрового колеса ветроагрегата мощностью 100 кВт – 50 об/мин (*Chen et al., 2005*)

$$P = \frac{M_{\max} \cdot \omega}{1,3}, \quad (11)$$

где P – выходная мощность генератора, Вт; M_{\max} – амплитудный момент тихоходного ротора, Н·м; ω – номинальная частота вращения, об/мин.

По полученным данным видно, что выходная мощность при одинаковых массогабаритных показателях больше у генератора с двумя воздушными зазорами и составляет 136,54 кВт, у генератора с тремя воздушными зазорами она составляет 98,85 кВт.

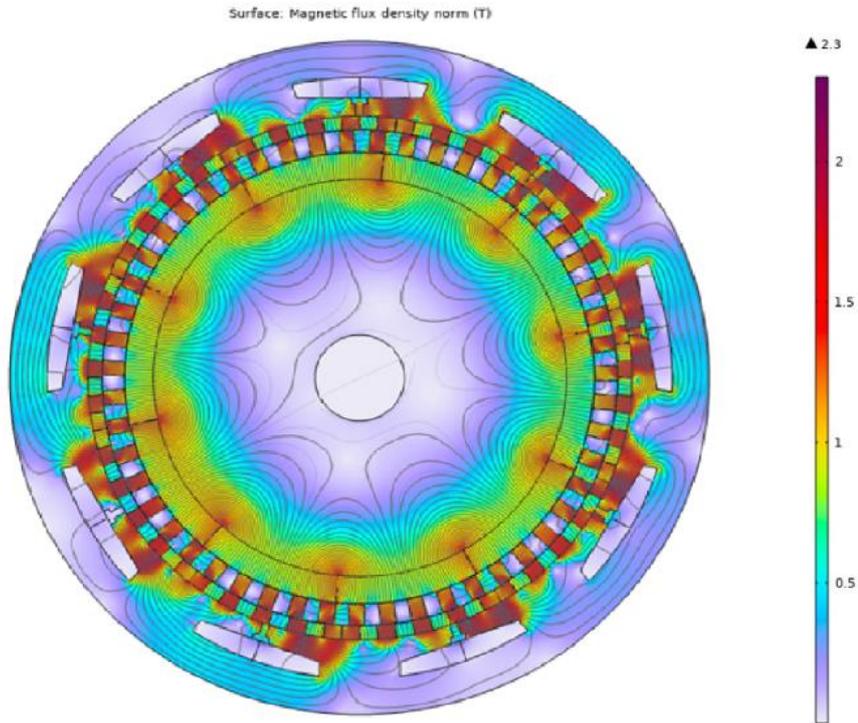


Рис. 3. Распределение линий магнитного потока для конструкции синхронной машины с двумя воздушными зазорами
Fig. 3. Distribution of magnetic flux lines for the design of a synchronous machine with two air gaps

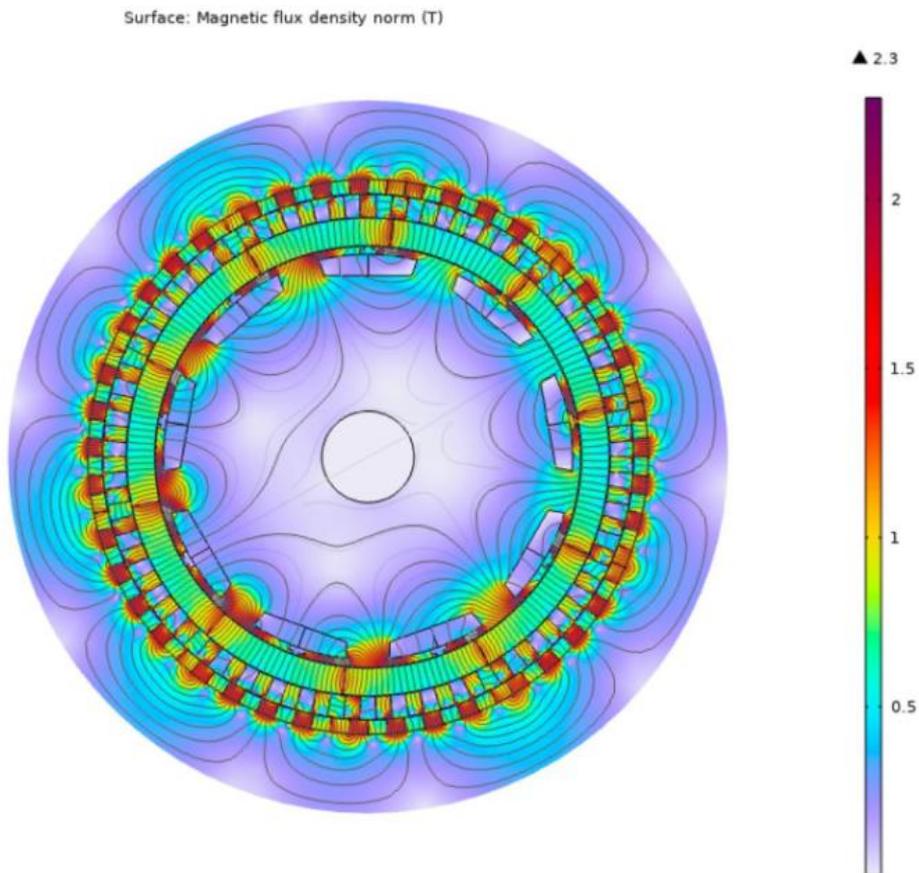


Рис. 4. Распределение линий магнитного потока для конструкции синхронной машины с тремя воздушными зазорами
Fig. 4. Distribution of magnetic flux lines for the design of a synchronous machine with three air gaps

По результатам расчета при уменьшенных массогабаритных показателях удалось получить большую выходную мощность (136,54 кВт) и высокий удельный момент на единицу объема генератора относительно системы прямого привода, в которых генератор, рассчитанный на мощность 100 кВт, имеет внешний диаметр статора 1,2 м и удельный момент на единицу объема генератора $30 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$ (Grauers, 1996). Расчет момента показал, что в ВЭУ наиболее выгодно применять генераторы со встроенным трансформатором момента с двумя воздушными зазорами.

Заключение

Повышение удельного момента электрических машин является насущной проблемой для целого ряда силовых низкоскоростных электромеханических систем. ВЭУ – одна из таких систем и определение оптимальной конструкции синхронного генератора со встроенным трансформатором момента является актуальным исследованием для дальнейшего развития ветроэнергетики. Для получения выводов по оптимальной конструкции синхронного генератора со встроенным трансформатором момента массогабаритные параметры двух рассматриваемых конструкций были приняты одинаковыми.

В работе рассматривались и сравнивались две конструкции синхронной машины со встроенным трансформатором момента, магнитный поток в которых создается постоянными магнитами, намагниченными радиально.

В генераторе с тремя воздушными зазорами наличие дополнительного воздушного зазора требует внесения в конструкцию генератора узла крепления ПМ, что осложняет процесс изготовления электрической машины, а также требует обеспечения более высокой точности центрирования тихоходного ротора.

Генератор с двумя воздушными зазорами имеет больший момент на единицу объема и момент на массу ПМ, т. е. при равных мощностях расходы на активные материалы будут меньше, что положительно скажется на сроке окупаемости ветроагрегата, при этом в таком генераторе обмотки статора располагаются на внешней части машины, что удобнее для их обслуживания и создает более благоприятные условия для охлаждения машины.

Аналитическое исследование конструкции электрической машины показало, что магнитное поле в системе с двумя воздушными зазорами имеет более высокую напряженность по сравнению с системой с тремя воздушными зазорами и использование электротехнической стали в конструкции с двумя воздушными зазорами более эффективно.

По результатам исследования можно сделать вывод, что генератор с двумя воздушными зазорами обладает более перспективной конструкцией по сравнению с генератором с тремя воздушными зазорами.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта "Синхронный генератор со встроенным трансформатором момента для ветроагрегата арктического исполнения" при поддержке гранта Национального исследовательского университета "Московский энергетический институт" (НИУ "МЭИ") на реализацию программы научных исследований "Приоритет 2030: Технологии будущего" в 2022–2024 гг.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

- Abrahamsen, A. B., Henk, D. L. 2017. Final assessment of superconducting (SC) and Pseudo Direct Drive (PDD) generator performance indicators (PI's) : Report. [S. l.] : [S. n.], 51 p.
- Atallah, K., Calverley, S., Clark, R., Rens, J. et al. 2008. A new PM machine topology for low-speed, high-torque drives. 18th International Conference on Electrical Machines. Vilamoura, Portugal, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/icelmach.2008.4799909>.
- Bouheraoua, M., Wang, J., Atallah, K. 2013. Design and implementation of an observer-based state feedback controller for a pseudo direct drive. *IET Electric Power Applications*, 7(8), pp. 627–663. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2013.0088>.
- Bouheraoua, M., Wang, J., Atallah, K. 2015. Slip recovery and prevention in pseudo direct drive permanent-magnet machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(3), pp. 2291–2299. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2014.2375387>.
- Chen, Y., Pillay, P., Khan, A. 2005. PM wind generator topologies. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(6), pp. 1619–1626. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2005.858261>.
- Cheng, Y., Qu, R., Gao, Y., Wang, S. et al. 2020. Comparison of electromagnetic performance of 10-MW HTS double-stator flux modulation wind generators with different topologies. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4), pp. 1–7. Article Number: 5202307. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2020.2975153>.
- Cooke, G., Atallah, K. 2017. "Pseudo" direct drive electrical machines with alternative winding configurations. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(11), pp. 1–8. Article Number: 8111608. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmag.2017.2703662>.

- Dragan, R. S., Clark, R. E., Hussain, E. K., Atallah, K. et al. 2019. Magnetically geared pseudo direct drive for safety critical applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(2), pp. 1239–1249. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2018.2873511>.
- Frandsen, T. V. et al. 2013. Motor integrated permanent magnet gear in a battery electrical vehicle. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, CO, USA, pp. 2170–2177. DOI: <https://doi.org/10.1109/iecee.2013.6646975>.
- Frandsen, T. V. et al. 2015a. Motor integrated permanent magnet gear in a battery electrical vehicle. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(2), pp. 1516–1525. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2014.2360016>.
- Frandsen, T. V., Rasmussen, P. O. 2015b. Slip torque investigation and magnetic redesign of motor integrated permanent magnet gear. 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Pattaya, Thailand, pp. 929–935. DOI: <https://doi.org/10.1109/icems.2015.7385168>.
- Grauers, A. 1996. Design of direct-driven permanent-magnet generators for wind turbines. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology (Technical Report No. 292).
- Kjaer, A. B., Korsgaard, S., Nielsen, S. S., Demsa, L. et al. 2020. Design, fabrication, test, and benchmark of a magnetically geared permanent magnet generator for wind power generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(1), pp. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.1109/tec.2019.2951998>.
- Li, K., Modaresahmadi, S., Williams, W. B., Bird, J. Z. et al. 2019. Electromagnetic analysis and experimental testing of a flux focusing wind turbine magnetic gearbox. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(3), pp. 1512–1521. DOI: <https://doi.org/10.1109/tec.2019.2911966>.
- Liu, D., Polinder, H., Abrahamsen, A. B., Ferreira, J. A. 2017. Potential of partially superconducting generators for large direct-drive wind turbines. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 27(5), pp. 1–11. Article Number: 5203711. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2017.2707661>.
- Qu, R., Liu, Y., Wang, J. 2013. Review of superconducting generator topologies for direct-drive wind turbines. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23(3). Article Number: 5201108. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2013.2241387>.
- Rasmussen, P. O., Frandsen, T. V., Jensen, K. K., Jessen, K. 2013. Experimental evaluation of a motor-integrated permanent-magnet gear. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(2), pp. 850–859. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2013.2242423>.
- Rasmussen, P. O., Mortensen, H. H., Matzen, T. N., Jahns, T. M. et al. 2009. Motor integrated permanent magnet gear with a wide torque-speed range. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose, CA, USA, pp. 1510–1518. DOI: <https://doi.org/10.1109/iecee.2009.5316280>.
- Wang, Q., Qin, X., Pfister, P.-D. 2018. A Vernier pseudo-direct-drive permanent-magnet machine. XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). Alexandroupoli, Greece, pp. 2023–2029. DOI: <https://doi.org/10.1109/icelmach.2018.8507174>.
- Zhu, X., Cheng, M. 2019. Design and analysis of 10 MW Class HTS exciting double stator direct-drive wind generator with stationary seal. *IEEE Access*, 7, pp. 51129–51139. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2911298>.

Сведения об авторах

Конюшенко Елизавета Владимировна – ул. Красноказарменная, 14, стр. 1, г. Москва, Россия, 111250; Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", аспирант; e-mail: Konyushenko.elizaveta@yandex.ru

Elizaveta V. Koniushenko – 14(1) Krasnokazarmennaya Str., Moscow, Russia, 111250; National Research University "Moscow Power Energy Institute", PhD Student; e-mail: Konyushenko.elizaveta@yandex.ru

Рахманов Ильяс – ул. Красноказарменная, 14, стр. 1, г. Москва, Россия, 111250; Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", аспирант; e-mail: RakhmanovI@mpei.ru

Ilias Rahmanov – 14(1) Krasnokazarmennaya Str., Moscow, Russia, 111250; National Research University "Moscow Power Energy Institute", PhD Student; e-mail: RakhmanovI@mpei.ru

Молоканов Олег Николаевич – ул. Красноказарменная, 14, стр. 1, г. Москва, Россия, 111250; Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", канд. техн. наук; e-mail: Molokanovon@gmail.com

Oleg N. Molokanov – 14(1) Krasnokazarmennaya Str., Moscow, Russia, 111250; National Research University "Moscow Power Energy Institute", Cand. Sci. (Engineering); e-mail: Molokanovon@gmail.com