

В.В. ГРЕБЕНИКОВ, Р.В. ГАМАЛІЯ, В.С. ПОПКОВ

ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОР З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ І ОСЬОВИМ МАГНІТНИМ ПОТОКОМ ДЛЯ ВІТРОУСТАНОВОК

Наведено результати чисельних і експериментальних досліджень електрогенератора з постійними магнітами і осьовим магнітним потоком для вітроустановок малої потужності. Щоб вітроустановки могли успішно конкурувати з джерелами автономного електропостачання на основі сонячної енергії необхідно знижувати питому вартість електрогенераторів. Одним з можливих способів зниження вартості вітроустановки є заміна тихохідного багатополісного генератора на високошвидкісний, що працює в парі з магнітним редуктором. У цьому випадку електрогенератор може бути спроектований на частоту обертання $n = 1000 \div 3000$ об/хв. Саме для цього діапазону частоти обертання визначені оптимальна конфігурація і розміри магнітної системи досліджуваного електрогенератора, при яких досягається максимальне значення потужності. Проведено порівняння розрахункових і експериментальних характеристик генератора, гарний збіг яких підтверджує адекватність розроблених математичних моделей. Ці комп'ютерні моделі потім використовуються для дослідження залежності питомої потужності генератора від висоти пазів статора і перетину обмотувального дроту, виконаного з мідної стрічки. Показано, що при оптимальних геометричних параметрах магніторушійна сила обмотки статора повинна бути узгоджена з магніторушійною силою постійних магнітів. Тільки при певному діапазоні висоти пазів забезпечується максимум потужності при номінальному струмі. Розрахунок характеристик досліджуваних генераторів виконувався в програмному пакеті Simcenter MagNet.

Ключові слова: електрогенератор з осьовим магнітним потоком, постійні магніти, зубцовий момент, магнітний редуктор, вітроустановка

В.В. ГРЕБЕНИКОВ, Р.В. ГАМАЛЕЯ, В.С. ПОПКОВ

ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И ОСЕВЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ ДЛЯ ВЕТРОУСТАНОВОК

Приведены результаты численных и экспериментальных исследований электрогенератора с постоянными магнитами и осевым магнитным потоком для ветроустановок малой мощности. Чтобы ветроустановки могли успешно конкурировать с источниками автономного электропостачания на основе солнечной энергии необходимо снизить удельную стоимость электрогенераторов. Одним из возможных способов снижения стоимости ветроустановки является замена тихоходного многополюсного генератора на высокоскоростной, работающий в паре с повышающим магнитным редуктором. В этом случае электрогенератор может быть спроектирован на частоту вращения $n = 1000 \div 3000$ об/мин. Именно для этого диапазона частоты вращения определены оптимальная конфигурация и размеры магнитной системы электрогенератора, при которых достигается максимальное значение мощности. Проведены сравнения расчетных и экспериментальных характеристик генератора, хорошее совпадение которых подтверждает адекватность разработанных математических моделей. Эти компьютерные модели затем используются для исследования зависимости удельной мощности генератора от высоты пазов статора и сечения обмоточного провода, выполненного из медной ленты. Показано, что для оптимальных геометрических параметров магнитодвижущая сила обмотки статора должна быть согласована с магнитодвижущей силой постоянных магнитов. Только при определенном диапазоне высоты пазов обеспечивается максимум мощности при номинальном токе. Расчет характеристик исследуемых генераторов выполнялся в программном пакете Simcenter MagNet.

Ключевые слова: электрогенератор с осевым магнитным потоком, постоянные магниты, зубцовый момент, магнитный редуктор, ветроустановка

V.V. GREBENIKOV, R.V. GAMALIA, V.S. POPKOV

PERMANENT MAGNET GENERATOR WITH AXIAL MAGNETIC FLOW FOR WIND PLANTS

The results of numerical and experimental studies of an electric generator with permanent magnets and axial magnetic flux for low-power wind turbines are presented. In order for wind turbines to successfully compete with sources of autonomous power supply based on solar energy, it is necessary to reduce the specific cost of electric generators. One of the possible ways to reduce the cost of a wind turbine is to replace a quiet-running multipole generator with a high-speed one, which is paired with a magnetic step-up gear. In this case, the electric generator can be designed for rotation frequency $n = 1000 \div 3000$ rpm. It is for this range of rotational speed that the optimal configuration and dimensions of the magnetic system of the electric generator have been determined, at which the maximum power value is reached. Comparisons of the calculated and experimental characteristics of the generator are carried out, the good coincidence of which confirms the adequacy of the developed mathematical models. These computer models are then used to study the dependence of the specific power of the generator on the height of the stator slots and the section of the winding wire made of copper tape. It is shown that for optimal geometrical parameters the magnetomotive force of the stator winding must be matched with the magnetomotive force of permanent magnets. Only for a certain range of slot heights is the maximum power at the rated current ensured. The characteristics of the investigated generators were calculated using the Simcenter MagNet software package.

Keywords: electric generator with axial magnetic flux, permanent magnets, cogging torque, magnetic gear, wind turbine

Введение. В настоящее время ветрогенераторы малой мощности (1-5 кВт) применяются, как в качестве резервных источников питания, так и в случае электроснабжения автономных потребителей. При этом, для того чтобы ветроустановки могли успешно конкурировать с источниками автономного электроснабжения на основе солнечной энергии необходимо снизить удельную стоимость электрогенераторов. Для

ветрогенераторов как с горизонтальной так и вертикальной осью вращения частота вращения ветрогенератора при средней скорости ветра $V = 5 \div 10$ м/с достаточно мала и составляет примерно $n = 100 \div 300$ об/мин. Электрогенераторы на такую малую частоту вращения имеют много полюсов, достаточно большие размеры, а значит вес и стоимость. Одним из возможных способов снижения стоимости

© В.В. Гребеников, Р.В. Гамалія, В.С. Попков, 2021

ветроустановки является замена тихоходного многополюсного генератора на высокоскоростной, работающий в паре с повышающим магнитным редуктором (мультипликатором) [1-4]. В этом случае при использовании магнитного редуктора с коэффициентом редукции, например, $G_r = 9 \div 9.6$ частота вращения вала электрогенератора будет равной $n = 1000 \div 3000$ об/мин, а его размеры и масса будут примерно на порядок меньше по сравнению со случаем непосредственного соединения вала ветроротора и низкоскоростного генератора. Общая масса магнитного редуктора и высокоскоростного генератора может составлять примерно 50% от общей массы низкоскоростного генератора [5]. В последнее время для ветроустановок применяют электрогенераторы с постоянными магнитами, которые имеют цилиндрическую конфигурацию магнитной системы [6, 7] либо аксиальную [8, 9]. В данном разделе приведены исследования электрогенератора с постоянными магнитами и аксиальным магнитным потоком.

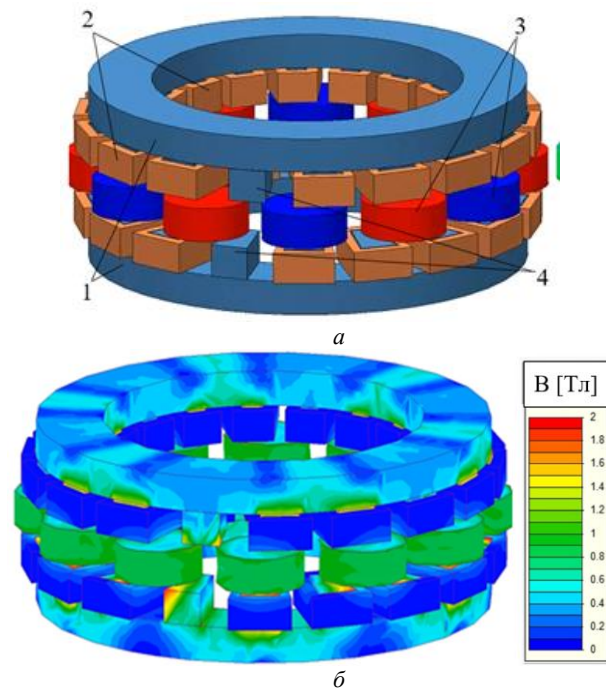
Цель работы – численные исследования электрогенератора с постоянными магнитами и аксиальным магнитным потоком и определение оптимальной конфигурации и размеров магнитной системы, при которой достигается максимальное значение мощности в заданном диапазоне частоты вращения, а также сравнение расчетных и экспериментальных значений характеристик генератора.

Экспериментальные исследования. На рис.1,а представлен общий вид магнитной системы исследуемого генератора. Статор состоит из двух симметрично расположенных частей и охватывает ротор с двух сторон. Каждая часть статора содержит магнитопровод 1, выполненный путем намотки тора из рулонной электротехнической стали, в котором затем фрезеруются открытые пазы для укладки обмоток 2. Обмотка на каждой части статора состоит из 18 катушек (6 катушек на одну фазу). Ротор состоит из двадцати цилиндрических постоянных магнитов 3, закрепленных на немагнитном основании, которое на рис. 1, а не показано. Магнитопровод статора имеет зубцы 4, чтобы были видны зубцы статора две катушки на рис. 1,а не показаны. Размеры поперечного сечения зубцов таковы, что постоянные магниты диаметром $D_{pm} = 25$ мм полностью их перекрывают. В предыдущих исследованиях [10] было показано, что применение магнитов цилиндрической формы в электрических машинах с аксиальным магнитным потоком предпочтительнее перед магнитами трапецеидальной формы, поскольку стоимость магнитов цилиндрической формы ниже стоимости магнитов трапецеидальной формы, а изготовление ротора с магнитами трапецеидальной формы требует большего количества металлообрабатывающих операций.

Для уменьшения зубцового момента обе части статора смещены друг относительно друга на определенный угол [10]. Зубцовый момент – это момент, действующий на ротор при отсутствии токов в обмотках, оказывающий отрицательное влияние на характеристики генератора (повышенные потери и вибра-

ции, дополнительный нагрев стали статора и пр.). В результате численных исследований для данного соотношения полюсов ротора и статора определен оптимальный угол смещения между двумя статорами, при котором значение зубцового момента (cogging torque) имеет минимальное значение. Оптимальное значение угла смещения равно $\theta_{skew} = 5^\circ$.

На рис. 1, б приведена картина магнитного поля исследуемого генератора. Анализируя картину магнитного поля, следует отметить, что спинки обеих частей статора не насыщены, индукция в них составляет $1.2 \div 1.4$ Тл. Наблюдается некоторое насыщение в углах зубцов статора, максимальная индукция – 1.8 Тл.



1 – магнитопровод генератора; 2 – обмотки генератора;
3 – постоянные магниты; 4 – зубцы статора; а – общий вид магнитной системы; б – картина магнитного поля
Рис. 1. Исследуемый генератор

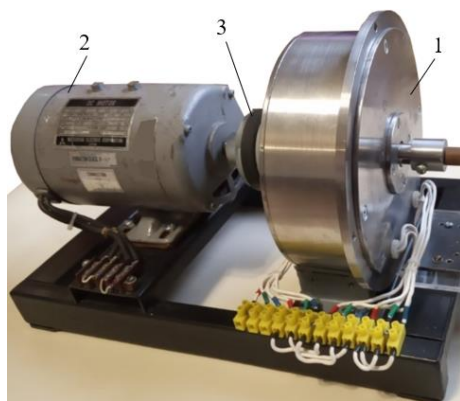
Расчет магнитной системы исследуемого генератора выполнялся в программном комплексе Simcentr Magnet при следующих условиях: материал статора магнитопровода – сталь электротехническая 2340; тип постоянных магнитов – N45SH; обмотки намотаны круглым проводом и соединены в «звезду», соединение обмоток каждой фазы – последовательное.

Основные параметры исследуемого генератора с аксиальным потоком приведены в табл. 1.

По результатам численного моделирования изготовлен экспериментальный образец исследуемого генератора, испытания которого проводились на экспериментальном стенде, показанном на рис. 2. На этом стенде экспериментальный образец генератора 1 с помощью приводного двигателя постоянного тока 2 приводится во вращение с заданной частотой. Вал приводного двигателя и испытуемого генератора соединены посредством муфты 3. Обмотки генератора соединяются в «звезду» и подключаются к выпрямительному мосту из шести диодов, который присоединяется к активному переменному резистору – R_{load} .

Таблица 1 – Основные параметры исследуемого генератора

Параметр	Значение
Наружный диаметр генератора D_a , мм	140
Внутренний диаметр генератора D_i , мм	82
Ширина паза B_{slot} , мм	4.5
Высота паза H_{slot} , мм	11
Число витков каждой обмотки W	9
Рабочий зазор δ , мм	2
Диаметр обмоточного провода без изоляции d_{ins} , мм	1.4
Площадь паза S_{slot} , мм ²	49.5
Площадь провода S_{wire} , мм ²	1.54
Площадь меди S_{cu} , мм ²	13.85
Коэффициент заполнения паза медью, k_{cu}	0.28
Номинальная плотность тока в обмотке J , А/мм ²	5
Номинальный ток в обмотке I_n , А	7.7



1 – исследуемый генератор; 2 – приводной двигатель;
3 – муфта
Рис. 2. Экспериментальный стенд

По результатам расчетов и измерений были получены и сравнены характеристика холостого хода, а также внешние характеристики исследуемого генератора.

На рис. 3 показано сравнение расчетной и экспериментальной зависимости напряжения в нагрузке U_{load} от частоты вращения ротора генератора n (характеристика холостого хода). Среднее отклонение между расчетными и экспериментальными значениями для характеристики холостого хода составляет 2%.

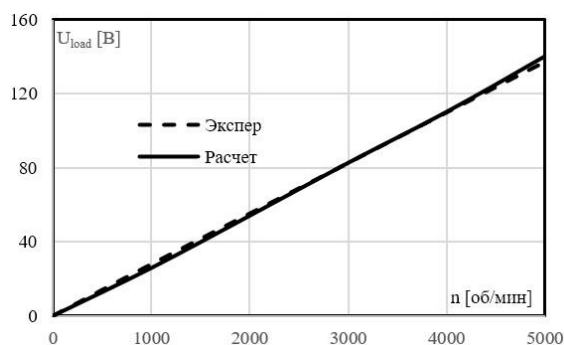


Рис. 3. Зависимость напряжения в нагрузке U_{load} от частоты вращения ротора генератора n

На рис. 4 показано сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей напряжения в нагрузке U_{load} от тока в нагрузке I_{load} . В процессе испытаний для нескольких значений активного сопротивления в нагрузке – R_{load} измеряется частота вращения ротора испытуемого генератора – n , фазное напряжение – U_{ph} , напряжение в нагрузке – U_{load} , ток в нагрузке – I_{load} . Среднее расхождение между расчетными и экспериментальными значениями составляет менее 4%.

Следует также отметить, что внешняя характеристика генератора довольно жесткая – $\Delta U = (U_o - U_n)/U_n \times 100\% = 9\%$, где U_o – напряжение холостого хода, U_n – номинальное напряжение.

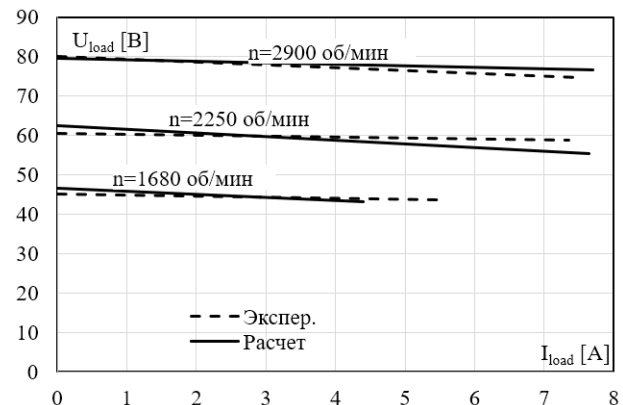


Рис. 4. Зависимость напряжения в нагрузке U_{load} от тока в нагрузке

На рис. 5 приведена зависимость мощности в нагрузке P_{load} от тока в нагрузке I_{load} для трех значений частоты вращения ротора. В данном опыте также достаточно хорошее совпадение между расчетными и экспериментальными зависимостями, расхождение не превышает 4%. Мощность в нагрузке соответствует выходной мощности генератора.

Сравнение характеристик, полученных при испытаниях экспериментального образца и характеристик, полученных в расчетной модели, показывает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей для нескольких значений частоты вращения ротора. Таким образом, расчетная модель адекватно описывает характеристики генератора данного типа и может быть использована в дальнейших исследованиях при вариации основных размеров магнитной системы.

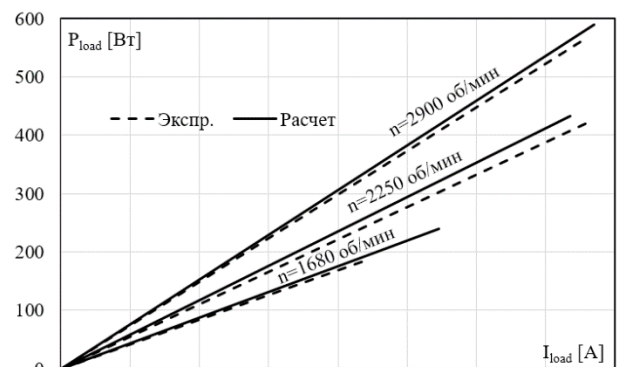


Рис. 5. Зависимость зависимостей мощности в нагрузке от тока в нагрузке

Численные исследования различных конфигураций магнитной системы электрогенератора. На втором этапе были выполнены численные исследования характеристик генератора с аксиальным потоком при вариации высоты пазов статора для обмоток, намотанных из медной ленты. Использование медной ленты для намотки обмоток генератора с осевым магнитным потоком позволяет повысить коэффициент заполнения паза медью примерно вдвое, а значит, при тех же габаритах мощность генератора может быть существенно увеличена. В табл. 2 приведены основные параметры исследуемых моделей для трех значений ширины медной ленты, из которой намотаны обмотки статора: $H_{\text{tape}} = 10$ мм; $H_{\text{tape}} = 20$ мм; $H_{\text{tape}} = 30$ мм. Наружный D_a и внутренний D_i диаметры магнитной системы для трех исследуемых моделей одинаковы и соответственно равны: $D_a = 140$ мм, $D_i = 82$ мм.

Таблица 2 – Основные параметры исследуемых моделей для трех значений ширины медной ленты

Номер варианта	1	2	3
Ширина (высота) медной ленты H_{tape} , мм	10	20	30
Наружный диаметр генератора D_a , мм	140	140	140
Внутренний диаметр генератора D_i , мм	82	82	82
Ширина паза B_{slot} , мм	4.5	4.5	4.5
Высота паза H_{slot} , мм	11	21	31
Рабочий зазор δ , мм	2	2	2
Число витков каждой обмотки W	14	13	13
Толщина медной ленты B_{tape} , мм	0.25	0.25	0.25
Толщина изоляции B_{ins} , мм	0.1	0.1	0.1
Площадь паза S_{slot} , мм ²	49.5	94.5	139.5
Площадь одного провода S_{wire} , мм ²	2.5	5	7.5
Площадь меди S_{cu} , мм ²	35	65	97.5
Коэффициент заполнения паза медью k_{cu}	0.71	0.7	0.69
Номинальная плотность тока в обмотке J , А/мм ²	5	5	5
Номинальный ток в обмотке I_n , А	12.5	25	37.5

Число витков обмоток статора для каждой из моделей выбиралось таким образом, чтобы коэффициент за-

полнения паза медью для всех вариантов был примерно одинаков. При равной плотности тока в обмотках статора равной $J = 5$ А/мм² номинальный ток в обмотках пропорционален ширине медной ленты. Напряжение, генерируемое электрогенератором, пропорционально числу витков в обмотках генератора и частоте вращения ротора. Поэтому, число витков обмоток генератора подбиралось таким образом, чтобы при частоте вращения $n = 1000 \div 3000$ об/мин напряжение после выпрямления было в диапазоне $U_{\text{load}} = 80 \div 150$ В. Применение электронного регулятора напряжения позволит получить на выходе однофазное переменное напряжение 220 В или трёхфазное – 380В.

Расчет характеристик каждой из моделей в программном пакете Simcentr Magnet производился следующим образом. Фазы генератора соединялись в «звезду» и подключалось через выпрямительный мост к активному сопротивлению. Определялись ток и напряжение в фазах и в нагрузке в зависимости от времени, по осциллограмме фазного тока и напряжения определялось действующее значение тока и напряжения, а также мощность в нагрузке. Эти параметры были определены для следующих значений активного сопротивления нагрузки $R_{\text{load}} = 1000$ Ом, 15 Ом, 10 Ом, 5 Ом, 3 Ом и 1 Ом.

Для уменьшения зубцового момента в каждой из моделей обе части статора смещены друг относительно друга на угол равный $\theta_{\text{skew}} = 5^\circ$, что позволило уменьшить максимальное значение зубцового момента в 2.7 ÷ 3 раза. Например, для модели с шириной медной ленты $H_{\text{tape}} = 20$ мм при отсутствии смещения $\theta_{\text{skew}} = 0^\circ$ максимальное расчетное значение зубцового момента составляет $M_{\text{cog}} = 0.33$ Нм, при смещении $\theta_{\text{skew}} = 5^\circ$ – максимальное значение зубцового момента соответственно равно $M_{\text{cog}} = 0.12$ Нм.

Внешний вид расчетных моделей и картины магнитного поля для генератора с шириной обмотки (медной ленты): $H_{\text{tape}} = 10$ мм; $H_{\text{tape}} = 20$ мм; $H_{\text{tape}} = 30$ мм приведены на рис. 6. Следует отметить, что насыщение магнитной системы не наблюдается, максимальная индукция в спинках статора – 1.2 Тл. Есть небольшое насыщение в зубцах статора, максимальное значение магнитной индукции при этом для модели с шириной магнитной ленты $H_{\text{tape}} = 30$ мм составляет – 1.8 Тл.

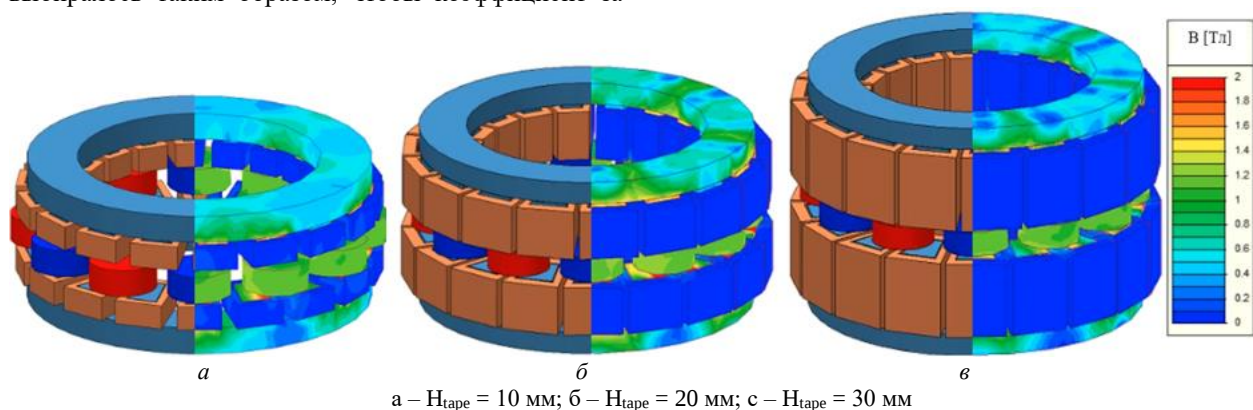
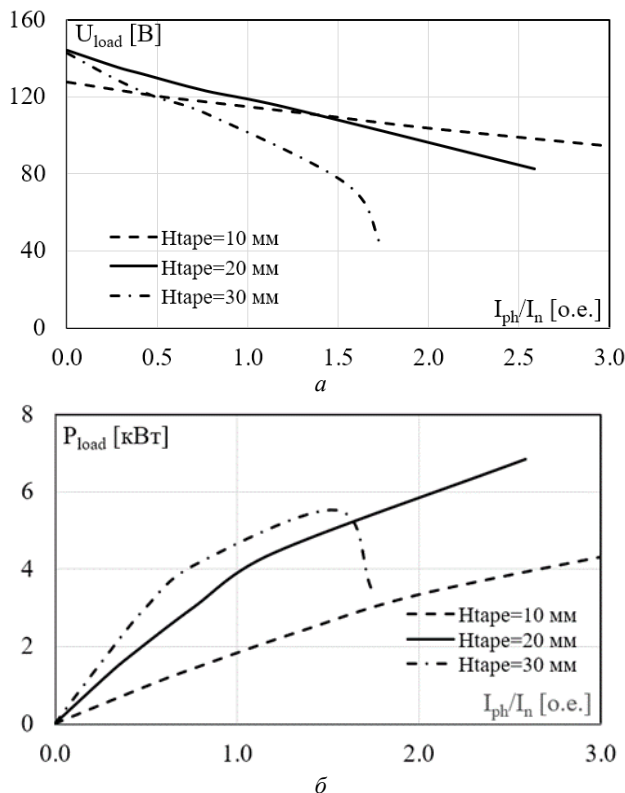


Рис. 6. Внешний вид и картины магнитного поля расчетных моделей генератора для трех значений ширины обмотки (медной ленты)

На рис. 7, а приведена зависимость напряжения в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному (I_{ph}/I_n) при частоте вращения ротора $n = 2900$ об/мин, а на рис. 7, б – зависимость мощности в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному.

Анализируя эти графики, следует отметить, что при ширине медной ленты $H_{tape}=30$ мм напряжение имеет резко падающий характер и при $I_{ph}/I_n = 1.7$ принимает нулевое значение, т. е. при нагрузке выше 1.7 от номинальной генератор неработоспособен. Для $H_{tape}=10$ мм жесткость характеристики равна $\Delta U = 10\%$, для $H_{tape}=20$ мм – $\Delta U = 21\%$.



а – зависимость напряжения в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному; б – зависимость мощности в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному
Рис. 7. Расчетные зависимости электрогенератора с обмотками из медной ленты

Если проанализировать зависимость мощности в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному, то следует отметить, что при $H_{tape}=30$ мм и при $I_{ph}/I_n = 1.7$ мощность имеет нулевое значение, т. е. при нагрузке выше 1.7 от номинальной генератор не в состоянии «взять» нагрузку. При номинальном токе и $H_{tape}=10$ мм мощность генератора равна $P_{load} = 1.9$ кВт, а при $H_{tape}=20$ мм мощность генератора практически вдвое больше и равна $P_{load} = 3.95$ кВт.

Приведенные выше характеристики позволяют сделать вывод, что увеличение поперечного сечения катушки не всегда означает увеличение его выходной мощности. Объясняется это следующим образом: обмотка с большим поперечным сечением имеет магнитодвижущую силу (МДС), сравнимую с МДС постоянных магнитов. Следовательно, увеличение поперечного сечения обмотки генератора возможно до

ограниченного значения, после чего характеристики генератора значительно ухудшаются.

На третьем этапе исследовалось влияние рабочего зазора на характеристики генератора. Для генератора с аксиальным магнитным потоком выполнить зазор менее 0.5 мм проблематично технологически, поскольку в результате взаимодействия магнитного поля магнитов с ферромагнитными частями статора на каждый из магнитов действуют осевые электромагнитные силы, которые, как показали результаты расчетов, имеют значение $P_{pm} = 8 \div 10$ Н, а значит осевое усилие, действующее на весь ротор – $P_r = 96 \div 120$ Н. Под действием этих осевых усилий ротор деформируется и при малом зазоре может соприкоснуться со статором, что может привести к разрушению магнитов. Были проведены расчеты основных характеристик исследуемого генератора для трех значений зазора между ротором и каждой из половин статора: $G_{ap} = 0.5$ мм; $G_{ap} = 1$ мм; $G_{ap} = 2$ мм. На рис. 8 приведены зависимости напряжения в нагрузке и мощности в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному при вариации величины рабочего зазора, а в табл.3 приведены основные характеристики исследуемого генератора в зависимости от величины рабочего зазора.

Таблица 3 – Основные характеристики исследуемого генератора в зависимости от величины рабочего зазора

G_{ap} , мм	U_o , В	U_n , В	ΔU , %	$P_{load(1)}$, кВт	$P_{load(2)}$, кВт
0.5	178.0	154	15.6	4.4	7.8
1	171.2	146	17.3	4.3	7.7
2	144.3	120	20.2	3.8	5.4

В этой таблице обозначено: U_o – напряжение холостого хода; U_n – номинальное напряжение; ΔU – жесткость внешней характеристики; $P_{load(1)}$ – мощность в нагрузке при $I_{ph}/I_n=1$; $P_{load(2)}$ – мощность в нагрузке при $I_{ph}/I_n=2$.

Анализируя данные табл. 3 и рис. 8 следует отметить, что напряжение холостого хода и мощность при номинальном токе для зазора $G_{ap}=0.5$ мм и $G_{ap}=1$ мм отличаются примерно на 3%, для зазора $G_{ap}=0.5$ мм и $G_{ap}=2$ мм это различие более существенно и составляет 23% для напряжения холостого хода и 14.4% для мощности при номинальном токе и 31% – для мощности при токе вдвое больше номинального.

Таким образом, следует принять значение рабочего зазора равное $G_{ap}=1$ мм оптимальным поскольку характеристики для зазора 0.5 мм и 1 мм отличаются не существенно, но при изготовлении генератора зазор $G_{ap}=1$ мм выполнить технологически существенно проще. Удельные характеристики оптимального варианта генератора, следующие: для номинального тока – $P_m = 0.41$ кВт/кг; $P_v = 0.0017$ кВт/см³, для тока вдвое больше номинального (режим перегрузки) – $P_m = 0.69$ кВт/кг; $P_v = 0.0029$ кВт/см³

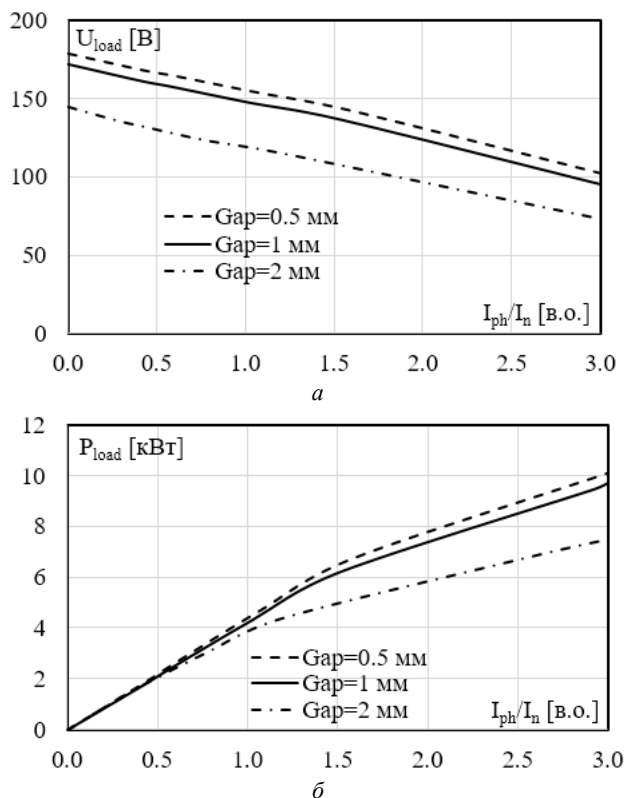


Рис. 8. Расчетные зависимости при вариации величины рабочего зазора: а – зависимость напряжение в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному; б – зависимость мощности в нагрузке от отношения фазного тока к номинальному

Выводы.

- для повышения удельных характеристик электрогенераторов с постоянными магнитами и аксиальным магнитным потоком разработаны параметрические модели с возможностью исследования рабочих характеристик электрогенератора при вариации основных размеров магнитной системы;

- проведены численные и экспериментальные исследования характеристик электрогенератора с постоянными магнитами и аксиальным магнитным потоком и получены хорошие совпадения расчетных и экспериментальных зависимостей для нескольких значений частоты вращения ротора. Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями не превышает 4%. Таким образом, расчетная модель адекватно описывает характеристики генератора данного типа и может быть использована в дальнейших исследованиях при вариации основных размеров магнитной системы;

- в результате численных исследований электрогенератора установлено, что для обеспечения максимальных удельных показателей высота пазов и сечение обмоточного провода, то есть магнитодвижущая сила обмоток должна быть согласованы с магнитодвижущей силой постоянных магнитов. Только при определенном диапазоне высоты пазов обеспечивается максимум мощности при номинальном токе.

Список літератури

1. Frank N. W., Toliyat H. A. Gearing ratios of a magnetic gear for

- wind turbines // IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – 2009. – Pp. 1224-1230. doi:10.1109/iemdc.2009.5075359.
2. Bao G.Q., Mao K.F. A Wind Energy Conversion System with Field Modulated Magnetic Gear // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. – 2011. – Pp. 1-4. doi: 10.1109/APPEEC.2011.5748902.
3. Li K., Modaresahmadi S., Williams W. B., Bird J. Z., Wright J. D. Barnett D. Electromagnetic Analysis and Experimental Testing of a Flux Focusing Wind Turbine Magnetic Gearbox // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2019. – vol. 34, no. 3, Pp. 1512-1521. doi: 10.1109/TEC.2019.2911966.
4. Udalov S. N., Achitaev A. A., Pristup A. G. Investigations of a magnetic gear for application in wind turbines // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). – 2016. – Pp. 166-171, doi: 10.1109/IFOST.2016.7884219.
5. Гребеников В.В., Гамалия Р.В. Сравнительный анализ двух генераторов с постоянными магнитами для ветроустановок: низкоскоростного с внешним ротором; высокоскоростного с магнитным редуктором // Гідроенергетика України. – 2019. – №1-2, С. 66-71. https://uhe.gov.ua/media_tsentr/zhurnal_hidroenerhetyka_ukrayiny/gidroenergetika-ukraini-2019-no1-2.
6. Kumar R. R., Santosh K. Singh, Srivastava R. K. et al. Modeling of Airgap Fluxes and Performance Analysis of Five Phase Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Power Application // IEEE Access. – 2020. – vol. 8, Pp. 195472-195486. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3034268.
7. He C., Wu T. Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. – 2019. – vol. 3, no. 1, pp. 94-100. doi: 10.30941/CESTEMS.2019.00013.
8. Wang X., Pang W., Gao P., Zhao X. Electromagnetic Design and Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Generator With Unequal-Width PCB Winding // IEEE Access. – 2019. – vol. 7, Pp. 164696-164707. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2952893.
9. Sriram S. Laxminarayan, Manik Singh, Abid H. Saifee, Arvind Mitta. Design, modeling and simulation of variable speed Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2017. – vol. 19, Pp. 114-124. doi.org/10.1016/j.seta.2017.01.004
10. Dobzhanskyi O., Eklas Hossain, Ebrahim Amiri, Gouws R., Grebenikov V., Mazurenko L., Prymak M., Gamaliia R. Axial-Flux PM Disk Generator With Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting // IEEE Access. – 2019. – vol. 7, P. 44813-44822. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908348.

References (transliterated)

1. Frank N.W., Toliyat H.A. Gearing ratios of a magnetic gear for wind turbines // IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – 2009. – Pp. 1224-1230. doi:10.1109/iemdc.2009.5075359.
2. Bao G. Q., Mao K. F. A Wind Energy Conversion System with Field Modulated Magnetic Gear // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. – 2011. – Pp. 1-4. doi: 10.1109/APPEEC.2011.5748902.
3. Li K., Modaresahmadi S., Williams W. B., Bird J. Z., Wright J. D. Barnett D. Electromagnetic Analysis and Experimental Testing of a Flux Focusing Wind Turbine Magnetic Gearbox // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2019. – vol. 34, no. 3, Pp. 1512-1521. doi: 10.1109/TEC.2019.2911966.
4. Udalov S. N., Achitaev A. A., Pristup A. G. Investigations of a magnetic gear for application in wind turbines // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). – 2016. – Pp. 166-171, doi: 10.1109/IFOST.2016.7884219.
5. Grebenikov B.B., Gamaliia R.V. Sravnitel'nyi analiz dvuh generatorov s postoyannymi magnitami dlya vetroustanovok: nizkoskorostnogo s vneshnim rotorom; visokoskorostnogo s magnitnim reduktorom // Hidroenergetika Ukraini. – 2019. – no.1-2, Pp. 66-71. https://uhe.gov.ua/media_tsentr/zhurnal_hidroenerhetyka_ukrayiny/gidroenergetika-ukraini-2019-no1-2.
6. Kumar R. R., Santosh K. Singh, Srivastava R. K. et al. Modeling of Airgap Fluxes and Performance Analysis of Five Phase Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Power Application // IEEE Access. – 2020. – vol. 8, Pp. 195472-195486. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3034268.
7. He C., Wu T. Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator // CES Transactions on Electrical

- Machines and Systems. – 2019. – vol. 3, no. 1, pp. 94-100. doi: 10.30941/CESTEMS.2019.00013.
8. Wang X., Pang W., Gao P., Zhao X. Electromagnetic Design and Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Generator With Unequal-Width PCB Winding // IEEE Access. – 2019. – vol. 7, Pp. 164696-164707. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2952893.
 9. Sriram S. Laxminarayan, Manik Singh, Abid H. Saifee, Arvind Mita. Design, modeling and simulation of variable speed Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2017. – vol. 19, Pp. 114-124. doi.org/10.1016/j.seta.2017.01.004
 10. Dobzhanskyi O., Eklas Hossain, Ebrahim Amiri, Gouws R., Grebenikov V., Mazurenko L., Pryjmak M., Gamaliia R. Axial-Flux PM Disk Generator With Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting // IEEE Access. – 2019. – vol. 7, P. 44813-44822. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908348.

Поступила (received) 30.04.21

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гребеніков Віктор Володимирович (Гребеников Виктор Владимирович, Grebenikov Viktor Vladimirovich) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, провідний науковий співробітник, тел. (067) 441-73-72; e-mail: elm1153@gmail.com.

Гамалія Ростислав Віталійович (Гамалей Ростислав Витальевич, Gamaliia Rostyslav Vitaliyovich) – кандидат фізико-математичних наук, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, старший науковий співробітник, тел: (067) 763-18-54; e-mail: rgamaleya@gmail.com.

Попков Володимир Сергійович (Попков Владимир Сергеевич, Popkov Vladimir Sergeevich) – Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ, інженер, тел: (067) 440-13-05; e-mail: popkov2018@ukr.net.