



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ ВЕТРОУСТАНОВОК: НИЗКОСКОРОСТНОГО С ВНЕШНИМ РОТОРОМ; ВЫСОКОСКОРОСТНОГО С МАГНИТНЫМ РЕДУКТОРОМ

Приведены результаты численных исследований двух типов электрогенераторов на постоянных магнитах для ветроустановок: низкоскоростного с внешним ротором; высокоскоростного с магнитным редуктором. Определена конфигурация и размеры магнитной системы низкоскоростного и высокоскоростного генератора, а также редуктора, при которой достигается заданное значение мощности $P = 4$ кВт для заданного диапазона частоты вращения ветроротора $n = 100 \div 300$ об/мин. Определены зависимости напряжения и мощности двух типов генераторов при подключении их к трехфазной активной нагрузке. Показано, что при одинаковой мощности генератор с магнитным редуктором имеет примерно в 2 раза меньшую массу магнитов и в 1,7 раза меньшую массу активных материалов, чем многополюсный генератор с внешним ротором. Расчет характеристик исследуемых генераторов выполнен в программных пакетах Infolytica MotorSolv и Magnet.

К л ю ч е в ы е с л о в а: магнитный редуктор, электрогенератор, постоянные магниты, внешние характеристики

В настоящее время в связи с ростом цен на электроэнергию для электроснабжения потребителей достаточно часто применяются ветрогенераторы. При этом используются ветрогенераторы как с горизонтальной, так и с вертикальной осью вращения, частота вращения которых при средней скорости ветра $V = 5 \div 10$ м/с достаточно мала и составляет примерно $n = 100 \div 300$ об/мин. Тихоходный электрогенератор для ветроустановки с такой частотой вращения при непосредственном соединении вала ветроротора и электрогенератора имеет большое число полюсов и достаточно большие габариты. Поэтому часто применяются повышающие редукторы (мультиплексоры), которые позволяют повысить частоту вращения электрогенератора в несколько раз и, тем самым, уменьшить массу его активной части, т. к. электромагнитный крутящий момент пропорционален объему электрической машины. Однако механические редукторы являются источником дополнительного шума, требуют достаточно частого обслуживания, снижают долговечность работы ветроустановки.

В последнее время для ветроустановок все чаще используются магнитные редукторы с постоянными магнитами, которые в отличие от механических редукторов не создают дополнительного шума, не требуют смазки, долговечность работы у них выше, эксплуатационные затраты также существенно снижаются, при этом магнитный редуктор может быть интегрирован с элек-

трогенератором [1, 2], либо конструктивно разьединён [3–5]. Магнитные редукторы могут иметь цилиндрическую конфигурацию магнитной системы [6] либо аксиальную [5, 7].

Целью данной статьи являются численные исследования и сопоставительный анализ характеристик двух генераторов с постоянными магнитами номинальной мощностью 4 кВт для ветроустановок: низкоскоростного многополюсного с внешним ротором, вал которого непосредственно соединён с валом ветроустановки; высокоскоростного с внешним ротором соединенного с повышающим магнитным редуктором.

На Рис. 1 упрощенно показаны магнитные системы исследуемых генераторов с постоянными магнитами для ветроустановок. На Рис. 1, а представлен высокоскоростной генератора с внешним ротором ($G1$) соединенный с магнитным редуктором (MG). На Рис. 1, б представлен низкоскоростной генератор с внешним ротором ($G2$).

Магнитный редуктор цилиндрического типа состоит из внешнего низкоскоростного ротора 1, который соединяется с валом ветротурбины, неподвижных ферромагнитных сегментов 2 и внутреннего высокоскоростного ротора 3, постоянные магниты внутреннего и внешнего ротора закреплены на стальных замыкателях 4. Вал внутреннего высокоскоростного ротора соединяется с валом электрогенератора $G1$. При проектировании магнитного редуктора следует учитывать, что передаточное число редуктора не



должно быть целочисленным, т. к. в этом случае зубцовый (паразитный) момент имеет существенно большее значения, чем для случая, когда передаточное отношение редуктора является дробным [5–6]. При проектировании редуктора следует также учитывать, что чем больше передаточное отношение редуктора, тем меньше габариты генератора при неизменной массе магнитов редуктора. Однако, чем больше передаточное отношение редуктора, тем больше должно быть число ферромагнитных неподвижных элементов редуктора и магнитов низкоскоростного ротора [6], а значит ферромагнитные элементы могут насыщаться и будет утечка магнитного потока между магнитами низкоскоростного ротора. В предварительных расчетах редуктора варьировались внешний, внутренний диаметр редуктора и его аксиальная длина, толщина постоянных магнитов, толщина замыкателей магнитного потока на внешнем и внутреннем роторе и толщина неподвижных ферромагнитных элементов. В результате были определены основные размеры магнитной системы редуктора, при которой достигается заданное значение электромагнитного момента на внутреннем высокоскоростном роторе редуктора.

Магнитный редуктор имеет 6 магнитов на внутреннем высокоскоростном роторе и 52 магнита на внешнем низкоскоростном роторе. Толщина магнитов редуктора – 5 мм, коэффициент редукции – 8.67, диаметр высокоскоростного ротора – 232 мм, диаметр низкоскоростного ротора – 306 мм, внутренний диаметр редуктора – 188 мм, аксиальная длина редуктора – 30 мм. Геометрические параметры магнитного редуктора определялись из условия, что он должен передавать крутящий момент, соответствующий электромагнитному моменту на роторе высокоскоростного генератора при номинальной нагрузке.

При проектировании высокоскоростного генератора учитывалось, что его частота вращения составляет $n = 1000 \div 3000$ об/мин. При такой частоте вращения в постоянных магнитах могут наводиться существенные вихревые токи, что может привести к нагреву и потере магнитами своих свойств. Поэтому в модели высокоскоростного генератора использовались составные магниты (Рис. 2, б). Кроме того, для снижения пульсаций электромагнитного момента в этом генераторе был предусмотрен скос полюсов ротора на одно полюсное деление статора – 10° . В результате предварительных расчетов были определены основные размеры магнитной системы генератора, при которой достигается заданная мощность.

Статор генератора (G1) диаметром 129 мм

имеет 36 пазов, в которые уложена трехфазная однослойная обмотка. Каждая фаза содержит 6 катушек по 22 витка, соединенные последовательно. На роторе размещены 6 постоянных магнитов толщиной 5 мм. Внешний диаметр генератора – 152 мм, число пар полюсов – 3, аксиальная длина – 100 мм.

При проектировании низкоскоростного генератора учитывалось, что его частота вращения составляет $n = 100 \div 300$ об/мин, генератор на такую частоту вращения должен иметь многополюсную структуру. В предварительных расчетах варьировались внешний диаметр ротора генератора, его аксиальная длина и толщина постоянных магнитов. В результате предварительных расчетов были определены основные размеры магнитной системы генератора, при которой достигается заданная мощность.

Статор генератора G2 диаметром 263 мм имеет 48 пазов в которые уложена трехфазная двухслойная обмотка. Каждая фаза содержит 16 катушек по 25 витков, соединенные последовательно. На роторе размещены 46 постоянных магнитов толщиной 10 мм. Внешний диаметр генератора – 303 мм, число пар полюсов – 23, аксиальная длина – 100 мм. Геометрические размеры и параметры обмоток генераторов были выбраны так, чтобы номинальная мощность и фазные напряжения генераторов имели значения близкие к высокоскоростному генератору G1.

Численные исследования генераторов и магнитного редуктора выполнялись в программных пакетах Infolytica Magnet и Infolytica MotorSolve при таких условиях: тип постоянных магнитов – N42, элементы магнитопроводов и модулятор редуктора – электротехническая сталь 1010.

На Рис. 2, а показан общий вид и картина распределения магнитной индукции для магнитного редуктора (MG), а на Рис. 2, б – для высокоскоростного генератора (G1) при номинальной плотности тока в обмотках 5 А/мм^2 . Результаты моделирования электромагнитного поля показывают, что магнитная индукция в спинке статора не превышает значений в 2.0 Тл, а в зубцах – 1.7 Тл. Индукция в замыкателях магнитного потока роторов магнитного редуктора не превышает значений в 2 Тл. Таким образом геометрические параметры магнитопроводов рассматриваемых устройств обеспечивают эффективное преобразование электромеханической энергии при номинальной нагрузке.

На Рис. 3 показан общий вид и картина распределения магнитной индукции для низкоскоростного генератора (G2) при номинальной плотности тока в обмотках 5 А/мм^2 . Магнитная ин-

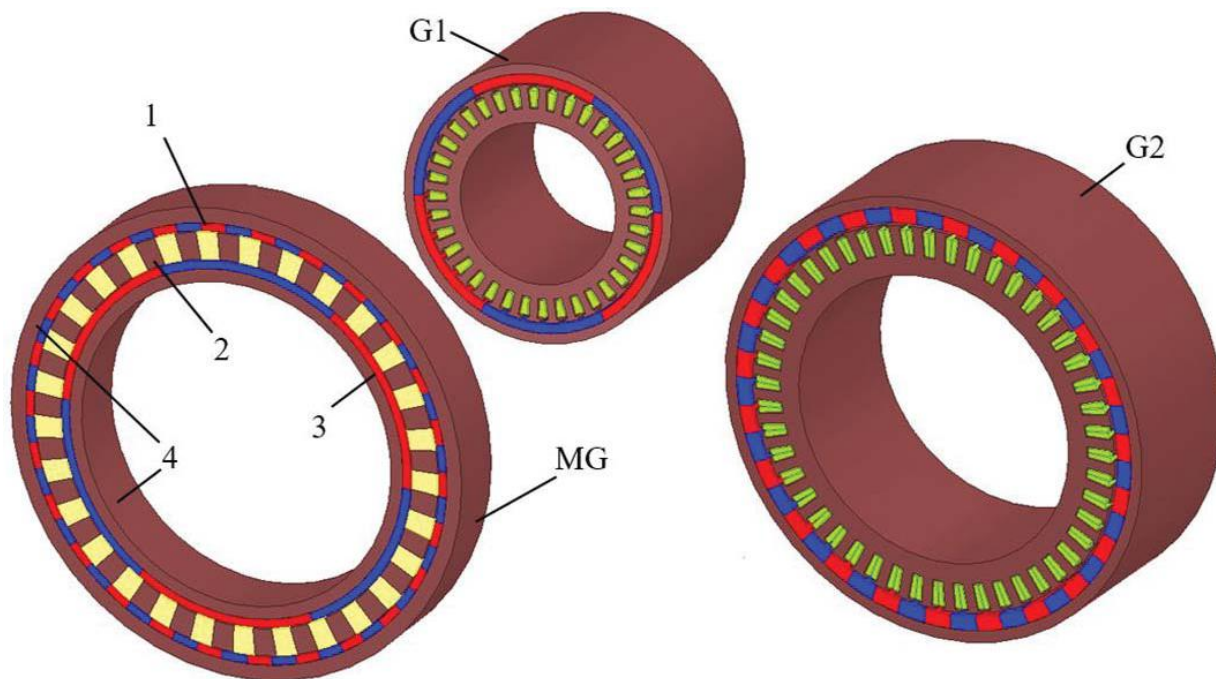


Рис. 1. Магнитная система высокоскоростного электрогенератора G1 с магнитным редуктором (MG) (а) и низкоскоростного электрогенератора G2 с внешним ротором (б).

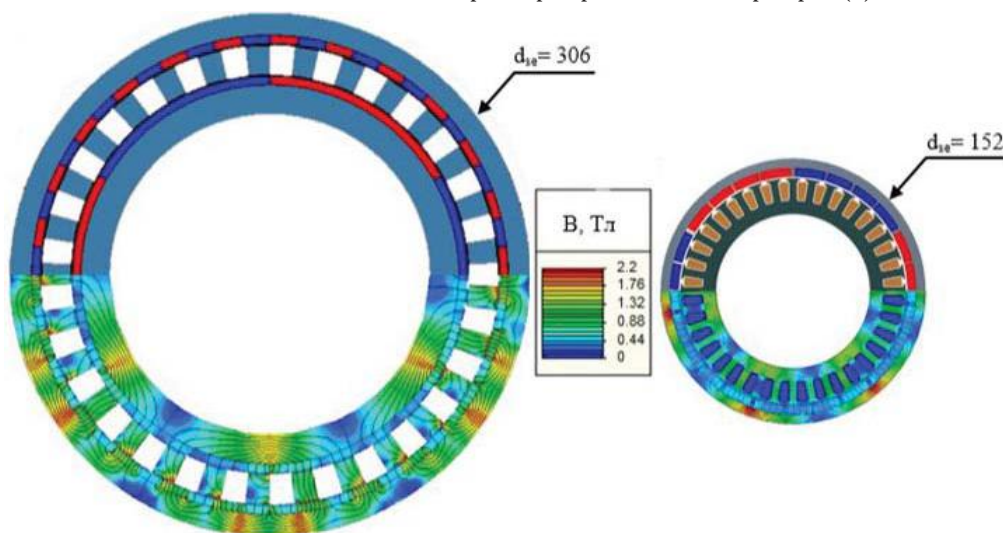


Рис. 2. Общий вид и картина распределения магнитной индукции: а – магнитный редуктор; б – высокоскоростной генератор (G1);

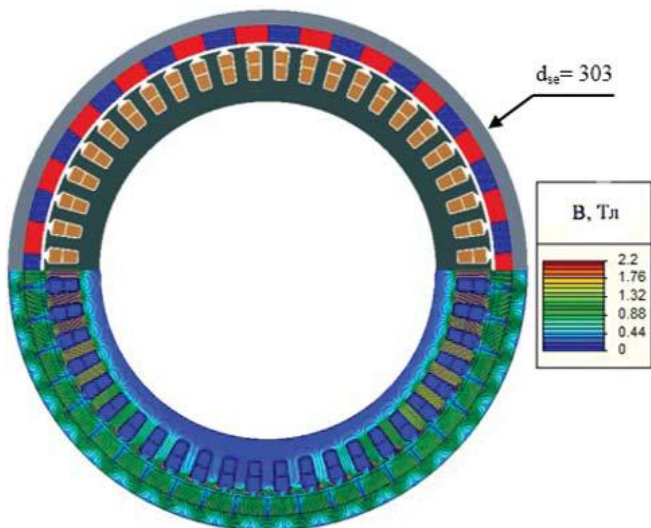


Рис. 3. . Общий вид и картина распределения магнитной индукции низкоскоростного многополюсного генератора (G2).

дукция в спинке статора не превышает 1.8 Тл, в зубцах – 1.6 Тл, в замыкателе магнитного потока ротора – 1.6 Тл.

На Рис. 4 приведены статические характеристики магнитного редуктора (MG) и зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора для двух типов генераторов. Статические характеристики магнитного редуктора определялись следующим образом: внутренний ротор (IR) был в расчетах не подвижным, задавалось смещение внешнего ротора (OR) через 0.5° и определялся электромагнитный момент, действующий на внешний и внутренний ротор. Для получения зависимостей электромагнитных моментов, действующих на роторы исследуемых генераторов, задавались следующие значения плотности тока в фазах генератора: $J_a = 5 \text{ A/mm}^2$, $J_b = 2.5 \text{ A/mm}^2$ и $J_c = 2.5 \text{ A/mm}^2$, при этом направление тока в фазе А – условно положительное, в фазе В и С – условно отрицательное. Смещение роторов с шагом в 0.5° задавались в диапазоне $0 \div 60^\circ$ для генератора G1 и в диапазоне $0 \div 8^\circ$ для генератора G2. Результаты моделирования показали, что максимальный электромагнитный момент генератора G1 с учетом скоса пазов на превышает 12 Нм.

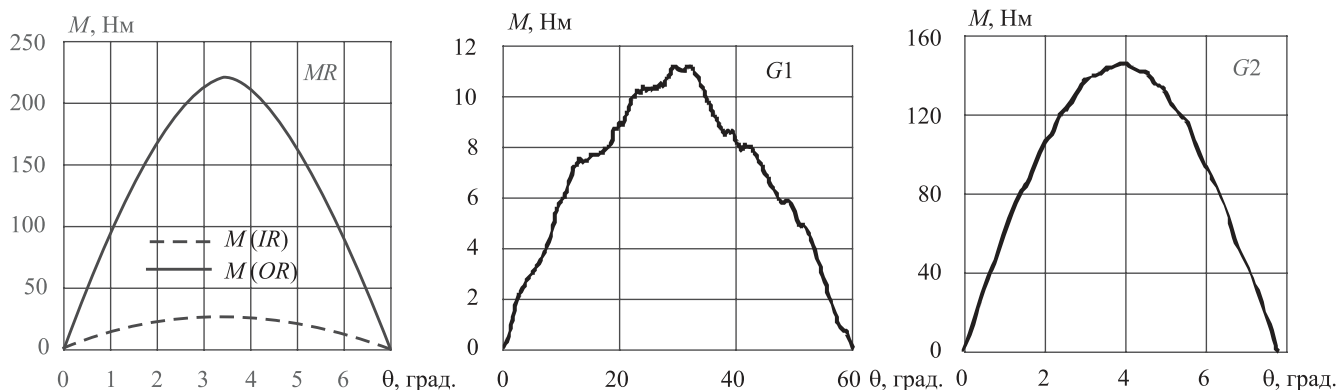


Рис. 4. Статические характеристики магнитного редуктора и электрогенераторов с внешним ротором: зависимость момента на внешнем (OR) и внутреннем (IR) роторе от угла поворота внешнего ротора (а); зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора для генератора G1(б) и G2(в).

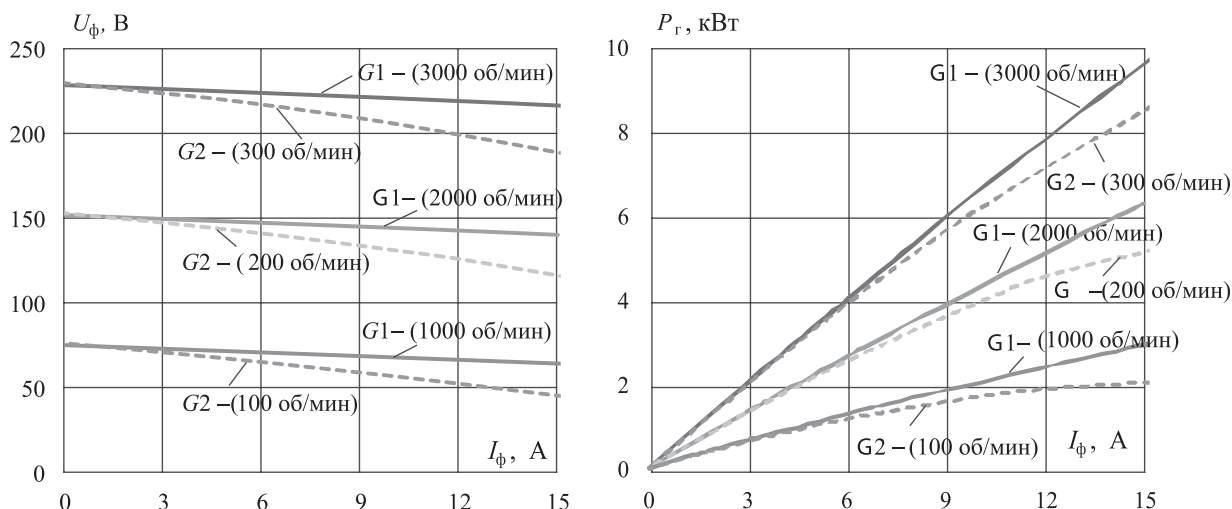


Рис. 5. Характеристики электрогенератора G1 и G2: зависимость фазного напряжения (а) и мощности на валу (б) от тока нагрузки.

Поэтому геометрические параметры магнитного редуктора (MG) выбирались с учетом того, чтобы статический электромагнитный момент редуктора на высокоскоростном роторе был больше электромагнитного момента на роторе генератора G1.

На Рис. 5 приведены результаты моделирования работы исследуемых генераторов под нагрузкой. При этом фазы генераторов соединены с трехфазной активной нагрузкой по схеме звезда. Исследования проводились для трех значе-

ний скорости вращения ротора генератора G1 (1000, 2000 и 3000 об/мин) и трех значений скорости вращения ротора генератора G2 (100, 200 и 300 об/мин). Номинальный ток при плотности тока $J = 5 \text{ А/мм}^2$ для генератора G1 составляет $I_{\text{ном}} = 6.04 \text{ А}$, для G2 – $I_{\text{ном}} = 6.37 \text{ А}$. Жесткость внешней характеристики $\Delta U_{\text{ном}} = (U_0 - U_{\text{ном}}) / U_{\text{ном}} \cdot 100\%$ для генератора G1 при $n = 3000 \text{ об/мин}$ равна $\Delta U_{\text{ном}} = 2\%$, для генератора G2 при 300 – $\Delta U_{\text{ном}} =$

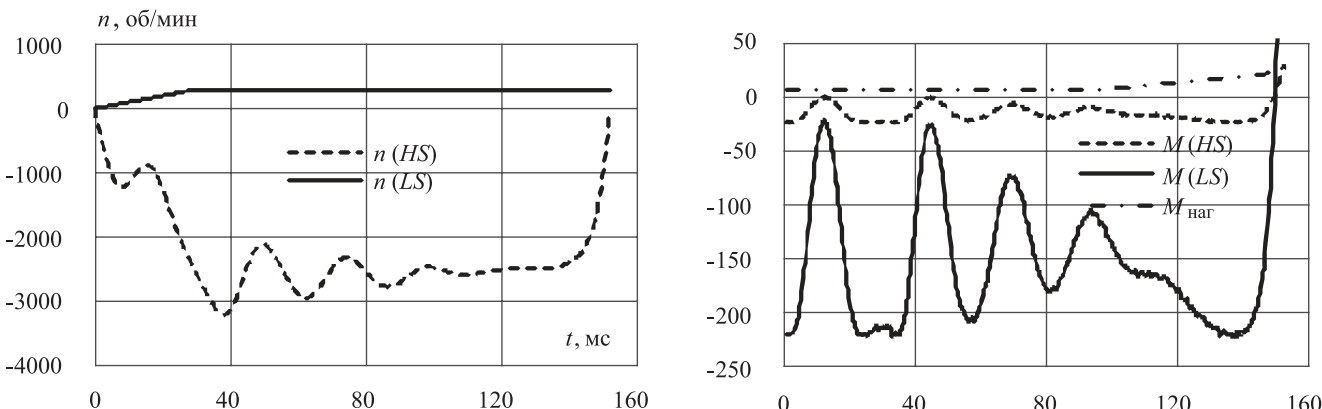


Рис. 6. Характеристики магнитного редуктора: зависимость скорости вращения низкоскоростного ротора n(LS) и высокоскоростного ротора n(HS) от времени (а) и зависимость электромагнитного момента на низкоскоростном роторе M(HS), высокоскоростном M(LS) и момента нагрузки M_{наг} от времени (б).



Таблиця 1. Сравнение основных параметров генераторов

Параметр	Генератор G1	Генератор G2
Число пазов статора – Z	36	48
Число полюсов ротора – p	3	23
Номинальная частота вращения ротора – n, об/мин	3000	300
Диаметр статора наружный – d _{св} , мм	129	263
Диаметр статора внутренний – d _{св} , мм	88	196
Диаметр ротора наружный, – d _{рв} , мм	152	303
Диаметр ротора внутренний – d _{рв} , мм	131	267
Аксиальная длина – l _{Гс} , мм	100	100
Рабочий зазор – δ, мм	1	2
Тип постоянных магнитов	N42	N42
Толщина магнитов, мм	5	10
Количество магнитов	6	46
Число витков обмотки, W	22	25
Номинальная плотность тока, А/мм ²	5	5
Номинальный фазный ток, А	6	6.37
Номинальное фазное напряжение, В	220	220
Номинальная мощность, кВт	4,1	4,1

6,2 %. При n = 2000 об/мин для G1 – 3% и для G2 при n = 200 об/мин – 9,5%. При n = 1000 об/мин для G1 – 6,2%, для G2 при n = 100 об/мин – 18%. Таким образом результаты моделирования показывают, что система генератор и магнитный редуктор (G1 + MG) обладает более жесткими внешними характеристиками по сравнению с генератором G2 без редуктора.

На Рис. 6 показаны результаты моделирования работы магнитного редуктора в режиме разгона и при изменении нагрузки. На Рис. 6, а приведена зависимость вращения низкоскоростного (наружного) ротора от времени $n(LS) = f(t)$ и высокоскоростного (внутреннего) – $n(HS) = f(t)$. Высокоскоростной и низкоскоростной ротор всегда вращаются в противоположном направлении. В начале, при нагрузке $M_{наг} = 5$ Нм скорость вращения низкоскоростного ротора за время t = 30 мс возросла от 0 до 300 об/мин. На следующем этапе, вплоть до t = 100 мс при постоянной нагрузке $M_{наг} = 5$ Нм и постоянной скорости вращения низкоскоростного ротора n = 300 об/мин проходил переходный процесс разгона и стабилизации скорости вращения высокоскоростного

Таблиця 2. Сравнение массы активных материалов

	G1	G2	Магнитный редуктор
Масса стали ротора, кг	1,89	6,32	–
Масса магнитов, кг	1,46	6,48	1,77
Масса стали статора, кг	3,47	11,75	–
Масса обмоток, кг	1,65	4,34	–
Общая масса стали, кг	5,36	18,07	6,75
Общая масса активных материалов, кг	8,47	28,89	8,52

ротора. Как следует из результатов моделирования при t = 100 мс, в соответствии с коэффициентом редукции $G_r = 8,67$, скорость вращения высокоскоростного ротора становится близкой к $n_{LS} = 2600$ об/мин. Затем, после t = 100 мс нагрузка увеличивалась по линейному закону – $M_{наг} = 5 + 300(t - 0,1)$. На Рис. 6, б показаны результаты расчетов моментов, действующих на роторы редуктора и момент нагрузки на высокоскоростном роторе. Результаты моделирования показывают, что примерно после t = 120 мс момент нагрузки становится больше, электромагнитного момента на высокоскоростном роторе $M(HS) = 25$ Нм, что приводит к выходу высокоскоростного ротора редуктора из синхронизма и резкому уменьшению его скорости.

В Табл. 1 приведены основные параметры генераторов G1 и G2. Оба исследуемых генератора имеют номинальную мощность 4.1 кВт и рассчитаны на номинальное фазное напряжение 220 В. Аксиальная длина генераторов – 100 мм. Наружный диаметр генератора G1 составляет 152 мм, а генератора G2 – 303мм. Таким образом, при одинаковой номинальной мощности наружный диаметр низкоскоростного генератора G2 почти в 2 раза больше наружного диаметра генератора G1.

В Табл. 2 приведено сравнение масс активных материалов двух типов электрогенераторов и магнитного редуктора.

Таким образом общая масса активных материалов генератора G1 и магнитного редуктора MG составляет $m_{G1+MG} = 16,99$ кг, масса активных материалов генератора G2 – $m_{G2} = 28,89$ кг. Масса постоянных магнитов высокоскоростного генератора и магнитного редуктора равна (G1+MG) равна – 3.23 кг, масса магнитов генератора (G2) – 6,48 кг, т.е. отношение масс магнитов равно – 2. Отношение номинальной мощности к массе активных частей для электрогенератора с внешним ротором (G2) равно $k_{P_{G2}} = 0.14$ кВт/кг, для электрогенератора (G1) соединенного с магнитным редуктором (MG) – $k_{P_{G1+MG}} = 0.24$ кВт/кг. Таким образом численные исследования показали, что при равной номинальной мощности высокоскоростной генератор, соединенный с магнитным редуктором, имеет в 1,7 раза меньшую массу активных материалов и в 2 раза меньшую массу постоянных магнитов по сравнению с многополюсным генератором, вал которого непосредственно соединён с валом ветроустановки



Выводы

1. Для заданной мощности генераторов (4 кВт) определены оптимальные размеры магнитной системы и толщина постоянных магнитов, при которых обеспечивается оптимальное соотношение между массой магнитов и мощностью генераторов.

2. Сопоставление характеристик генератор с постоянными магнитами для ветроустановок показало, что при равной мощности генератор с магнитным редуктором имеет в 2 раза меньшую массу магнитов и 1.7 раза массу активных материалов, чем низкоскоростной генератор, вал которого непосредственно соединён с валом ветроустановки.

3. Проведено численное моделирование совместной работы высокоскоростного генератора и магнитного редуктора и определены оптимальные размеры магнитной системы редуктора и генератора, при которой мощности исследуемых устройств согласованы.

ЛИТЕРАТУРА

1. L.N. Jian, K.T. Chau, D. Zhang, J.Z. Jiang and Z. Wang, "A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Machine for Wind Power Generation," 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting, New Orleans, LA, 2007, pp. 573-580. doi: 10.1109/07IAS.2007.

2. J. Li, K.T. Chau, J. Z. Jiang, C. Liu and W. Li, "A New Efficient Permanent-Magnet Vernier Machine for Wind Power Generation," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 6, pp. 1475-1478, June 2010. doi: 10.1109/TMAG.2010.2044636

3. N.W. Frank and H.A. Toliyat, "Gearing ratios of a magnetic gear for wind turbines," 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami, FL, 2009, pp. 1224-1230. doi: 10.1109/IEMDC.2009.5075359.

4. M. Desvaux, R.L.G. Latimier, B. Multon, H.B. Ahmed and S. Sire, "Design and optimization of magnetic gears with arrangement and mechanical constraints for wind turbine applications," 2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, 2016, pp. 1-8. doi: 10.1109/EVER.2016.7476341.

5. O. Dobzhanskyi, Eklas Hossain, E. Amiri, R. Gouws, V. Grebenikov, L. Mazurenko, M. Pryjmak, and R. Gamaliia, "Axial-Flux PM Disk Generator With Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting," in IEEE Access, vol. 7, pp. 44813-44822, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908348.

6. Гребеников В.В., Гамалея Р.В. Исследование влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики магнитного редуктора// Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. пр. Вип. 4 (2019). Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2019. – С. 68 – 74.

7. Wang, L. Brun, S. Gerber and P.M. Tlali, "Design and evaluation of a disc-type magnetically geared PM wind generator," 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, 2013, pp. 1259-1264. doi: 10.1109/PowerEng.2013.6635793.

© Гребеников В.В., Гамалея Р.В., 2019

