

В. В. Гребеников, канд. тех. наук, Институт электродинамики НАН Украины, Киев

ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ ВЕТРОУСТАНОВОК И МИКРО-ГЭС

Приведены расчетные и экспериментальные данные электрогенераторов с постоянными магнитами применительно к ветроустановкам и микро-ГЭС.

Потребление энергии, а вместе с ним и ее стоимость увеличиваются, поэтому нетрадиционной энергетике последнее время уделяется пристальное внимание во всем мире. В связи с этим постоянно растет заинтересованность в использовании возобновляемых источников энергии - ветра, солнца, морского прилива и речной воды. Одним из перспективных направлений развития возобновляемой энергетике для энергоснабжения фермерских хозяйств и загородных домов является ветроэнергетика и малая гидроэнергетика. Например, для небольшого загородного дома достаточно мощности около 150 – 200 Вт для покрытия базовых потребностей в электроэнергии (связь, радио, освещение, другая маломощная нагрузка) и от 1 до 5 кВт для электроснабжения большинства электроприборов в типом загородном доме, включая стиральную машину, холодильник, компьютеры и т.п.

Использование энергии небольших водотоков с помощью микро-ГЭС (мощностью до 5 кВт) является одним из наиболее эффективных направлений развития возобновляемых источников энергии и в нашей стране. Современные гидроэнергетические установки для микро-ГЭС изготавливаются как в России, так и в Украине, в частности харьковским предприятием «Турбоатом» [1, 2].

«Малая» ветроэнергетика также успешно развивается в Украине. На сегодняшний день наиболее распространены ветроэнергетические установки (ВЭУ) с горизонтальной осью вращения. Применение таких ветроустановок в качестве малых ВЭУ для снабжения электроэнергией отдельных усадеб или хозяйств затруднено тем, что требуется устанавливать башню достаточной высоты и выделять под ВЭУ немалый участок территории и стоимость такой башни соизмерима со стоимостью ветроустановки. Кроме того, пропеллеры таких ВЭУ весьма шумны (особенно в низких частотах звука) и создают для окружающих существенный дискомфорт. ВЭУ небольшой мощности с вертикальной осью вращения (ВОВ) ветроротора (типа ротора Дарье) весьма компактны, малозумные и могут быть размещены на крышах зданий. Можно перечислить дополнительно преимущества таких ВЭУ: независимость функционирования от направления ветрового потока, возможность перехода от консольного крепления оси ветроротора к двухопорному, возможность размещения электрогенератора в основании ветроустановки (снижаются требования к высоте, прочности и жесткости опоры).

В Украине, например, ЧП «Отрада» (г. Никополь) предлагает ВЭУ с ВОВ мощностью от 0,5 до 32 кВт [3]. Фирма «Верано» из Овидиополя Одесской обл. (Дочернее предприятие фирмы Калверт Энтерпрайсиз, США) предлагает ВЭУ с ВОВ мощностью от 1 до 25 кВт [4]. Перспективная разработ-

ка ВЭУ с ВОВ выполнена в Институте Гидромеханики НАН Украины. В конструкции этой ВЭУ применен механизм управления положениями лопастей. Это позволяет установить лопасти относительно траверс так, что величина и направление действия аэродинамической силы на лопастях дают возможность осуществить самозапуск ветроротора даже при скоростях ветра 4-5 м/сек. При оптимальном законе управления лопастями на таком ветророторе было получено в 2 раза больше энергии, чем на аналогичном ему по размерам роторе с прямыми жестко фиксированными лопастями. Кроме того, например, при скорости ветра 13 м/сек на валу этого ветроротора была получена мощность около 0,95 кВт, т.е. с 1 м^2 было получено 300 Вт мощности. У подавляющего большинства известных на сегодняшний день ветроэнергетических установок с горизонтальной осью вращения малой мощности ($1 \div 5$ кВт) этот показатель меньше [5].

В настоящее время наблюдается тенденция повышения технических показателей электрогенераторов, используемых для ВЭУ, за счет использования постоянных магнитов (ПМ) на основе редкоземельных магнитов NdFeB, которые имеют рабочие температуры до 150 градусов и остаточную магнитную индукцию $B_r = 1.2 \div 1,45$ Тл. Поскольку частота вращения ветроротора у ВЭУ с ВОВ составляет $100 \div 150$ об/мин, то применяются тихоходные многополюсные электрогенераторы на постоянных магнитах, которые соединяются с ветроколесом непосредственно (без редуктора), что существенно упрощает конструкцию и обеспечивает длительный срок эксплуатации ВЭУ. У микро-ГЭС частота вращения вала турбины на порядок выше и составляет $1000 \div 1500$ об/мин, однако, по нашему мнению, для микро-ГЭС также перспективным является использование электрогенераторов с постоянными магнитами. Электрогенераторы с ПМ обладают рядом преимуществ:

- возможность получения высоких значений продольной компоненты магнитной индукции в области электромеханического преобразования энергии (в рабочем зазоре);
- безконтактность и отсутствие узлов, требующих трудоемкого обслуживания. Отсутствие скользящих электрических контактов существенно повышает их ресурс и надежность по сравнению с электрическими генераторами постоянного тока или синхронными генераторами с явно выраженной обмоткой на роторе;
- высокий КПД преобразования механической энергии в электрическую;
- высокие удельные показатели по развиваемой мощности на единицу активной массы и на единицу активного объема;
- большая перегрузочная способность по моменту (кратковременно кратность максимального момента равна 5 и более).

Исходя из вышеуказанного, можно сделать вывод о целесообразности применения электрогенераторов с постоянными магнитами. Вместе с тем, следует отметить, что массогабаритные характеристики генераторов существенным образом зависят от его конструкции. Неправильно спроектированный генератор может иметь существенный вес и габариты, даже не смотря на применение современных постоянных магнитов.

Цель данной работы – численного моделирования в программном комплексе ELCUT 5.6 магнитного поля и определение тормозного электромагнитного момента M , действующего при нагрузке на ротор электрогенератора. В работе исследуются три модели электрогенераторов разной мощности, также для одной из моделей приводятся результаты экспериментальных исследований.

На рис. 1 приведены три модели электрогенераторов с ПМ. При этом в модели ЭГ-1 (рис. 1а) статор по размерам идентичен со статором асинхронного двигателя АИР90L8 имеющим внешний диаметр статора $D_c = 158$ мм с числом пазов, равным $Z_1 = 48$, высота пазов – $h_n = 14,2$ мм. Ротор в модели ЭГ-1 выполнен в виде 8-ми полюсной магнитной систем с тангенциально расположенными высокоэнергетическими постоянными магнитами, намагниченными в направлении, перпендикулярном к плоскостям постоянных магнитов. Величина технологического зазора между расточкой статора, выполненного из шихтованной стали Ст2110 и ротора равна $\delta_0 = 1$ мм. В роторе магниты располагаются по радиусу и примыкают торцами к ферромагнитным вставкам, содержащим участки из конструкционной стали Ст20 и образующими структуру переменного полюсности. Такая конструкция особенно рациональна при использовании высококоэрцитивных магнитов на основе редкоземельных материалов типа NdFeB, которые могут быть слабо чувствительны к величине немагнитного зазора в магнитной цепи. Важной особенностью конструкции с тангенциальным намагничиванием является возможность получения индукций в зазоре B_δ , иногда даже превышающих остаточную магнитную индукцию B_r постоянных магнитов. Это связано с тем, что благодаря непрерывности линий магнитного поля поток, входящий в сектор через боковые торцы двух смежных магнитов приблизительно равен потоку, выходящему из сектора через его границу, площадь которой может быть существенно меньше удвоенной площади бокового торца магнита. Для уменьшения пульсаций электромагнитного момента концентраторы магнитного поля в роторе имеют округления равные $r = 33$ мм. Для уменьшения пульсаций электромагнитного момента можно выполнять скос полюсов на роторе [6]. Аксиальная длина статора и ротора для модели ЭГ-1 равна $l_a = 100$ мм.

На рис. 1б показана модель ЭГ-2, в которой статор имеет внешний диаметр равный $D_c = 194$ мм и содержит вдвое меньшее число пазов, равное $Z_1 = 24$, высота пазов – $h_n = 32,2$ мм. Ротор в модели ЭГ-2 так же выполнен в виде 8-ми полюсной магнитной систем и имеет такие же размеры, что и в модели ЭГ-1. Аксиальная длина статора и ротора для модели ЭГ-2 равна $l_a = 100$ мм. В модели ЭГ-3 (рис 1в) исследовалась конфигурация магнитной системы, в которой ротор имеет такие же размер и конфигурацию как в модели ЭГ-1 и ЭГ-2, а статор имеет больший диаметр равный $D_c = 220$ мм, число пазов статора равно $Z_1 = 24$, высота пазов – $h_n = 45$ мм. Аксиальная длина статора и ротора для модели ЭГ-3 также равна $l_a = 100$ мм.

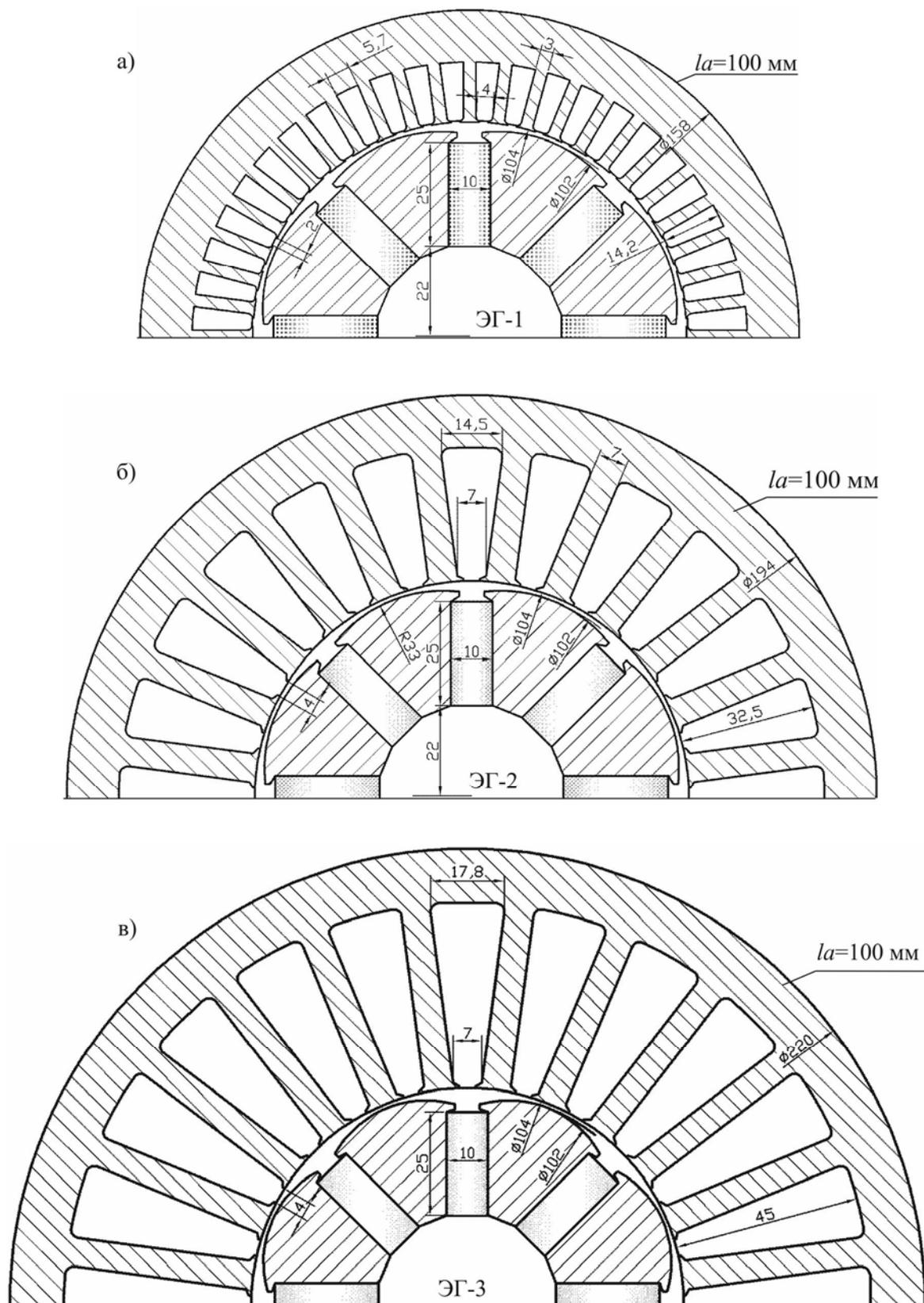


Рис. 1. Основные размеры электрогенераторов с постоянными магнитами.

а – электрогенератор ЭГ-1; б – электрогенератор ЭГ-2; в – электрогенератор ЭГ-3

Таким образом, в работе исследуются три модели электрогенераторов с ПМ: модель ЭГ-1 имеет конфигурацию статора идентичную асинхронному двигателю АИР90L8, в модели ЭГ-2 ротор идентичен ротору модели ЭГ-1, внешний диаметр статора в 1,23 раза больше по сравнению с моделью ЭГ-1, а количество пазов вдвое меньше, а в модели ЭГ-3 ротор идентичен ротору модели ЭГ-1 и ЭГ-2, но статор имеет внешний диаметр в 1,39 раза больший по сравнению с моделью ЭГ-1.

На рис. 2 представлены картины распределения магнитного поля в поперечном сечении исследуемых моделей. Моделирование магнитостатики осуществлялось в программном комплексе ELCUT 5.6 при следующих исходных данных:

- магнитопровод статора – сталь СТ2211 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали);

- ферромагнитные концентраторы – конструкционная сталь СТ20 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали);

- ПМ на основе NdFeB – коэрцитивная сила магнита $H_c = 1000$ кА/м, остаточная индукция $B_r = 1,32$ Тл, магнитная проницаемость магнитов принята равной - $\mu_{ПМ} = 1,03$ (направление намагниченности ПМ показаны стрелками);

- вал ротора выполнен из немагнитного материала с магнитной проницаемостью - $\mu_0 = 1$.

Поле реакции якоря представлено как образованное токами трех фаз для момента времени, когда ток в фазе **A** максимальный $i = I_m$ и условно положительный, а в фазах **B** и **C** - $i = 0,5 I_m$ и условно отрицательный (рис.2). Плотность тока задана равной $J_r = 5,0$ А/мм², а коэффициент заполнения паза медью принят равным $k_3 = 0,5$.

По результатам моделирования распределения магнитного поля для трех моделей электрогенераторов с ПМ можно выделить следующее. Спинка статора и зубцы для всех трех моделей не насыщаются, существенных потоков пазового рассеивания не наблюдается. Объясняется это тем, что магнитодвижущая сила ПМ существенно превышает магнитодвижущую силу статорных обмоток. На рис. 2 для всех трех моделей показано распределение магнитного поля при ориентации ротора по оси d . В этом положение поле, создаваемое ПМ в полюсах ротора направлено согласно с полем, создаваемым включенными фазами статора.

На рис. 3 показан график распределения нормальной (радиальной) B_n магнитной индукции посередине рабочего зазора ($R = 51,5$ мм). Графики индукции приведены для момента времени, когда ток в фазе **A** максимальный и условно положительный, а в фазах **B** и **C** ток вдвое меньше и условно отрицательный. Расчеты выполнены для значений плотности тока в фазе **A** - $J_{Cu} = 2,5$ А/мм², а в фазах **B** и **C** соответственно - $J_{Cu} = 1,25$ А/мм². С учетом того, что коэффициент заполнения паза принят равным $k_3 = 0,5$, то плотности тока равной $J_{Cu} = 2,5$ А/мм² будет соответствовать реальная плотность тока в фазе **A** равная $J_r = 5,0$ А/мм², а в фазе **B** и **C** соответственно - $J_r = 2,5$ А/мм². Графики индукции приведены в пределах одного полюсного деления τ .

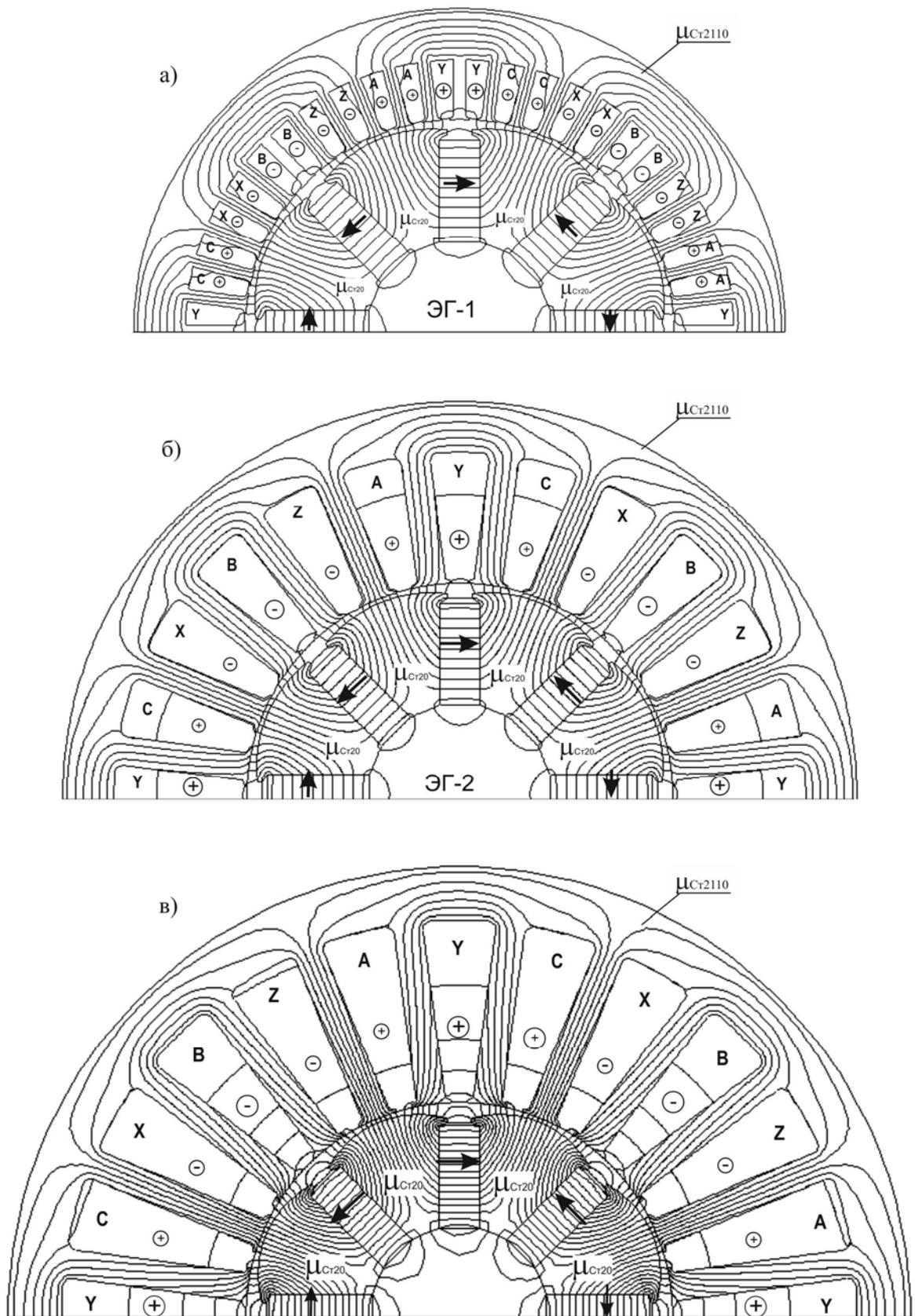


Рис. 2 - Картины магнитного поля электрогенераторов для заданного момента времени.
 а – электрогенератор ЭГ-1; б – электрогенератор ЭГ-2; в – электрогенератор ЭГ-3

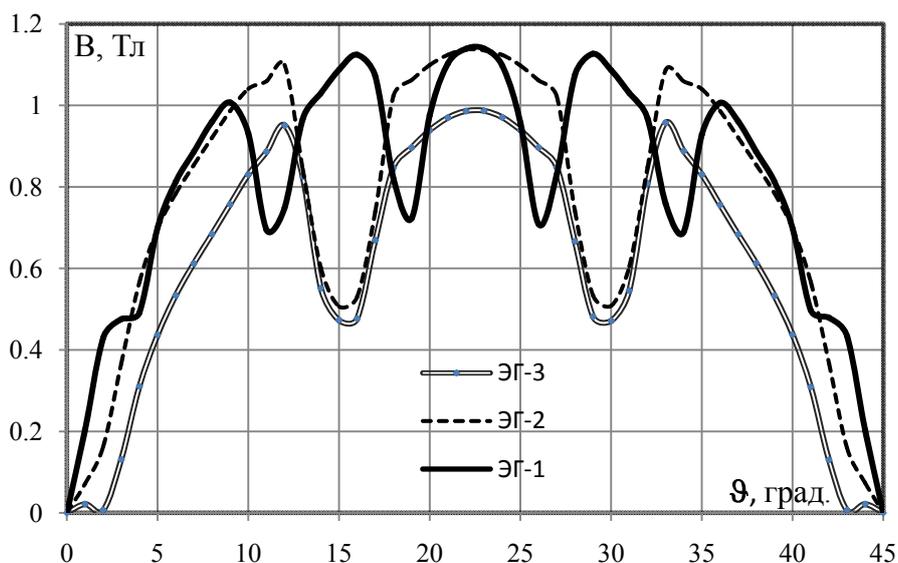


Рис. 3. Распределение продольной компоненты магнитной индукции посередине рабочего зазора в моделях ЭГ-1, ЭГ-2, ЭГ-3 в области одного полюса.

Анализируя графики радиальной компоненты магнитной индукции, следует отметить, что максимальная индукция в воздушном зазоре для модели ЭГ-1 составляет $B_{mЭГ-1} = 1,14$ Тл, для модели ЭГ-2 – $B_{mЭГ-2} = 1,14$ Тл, для модели ЭГ-3 – $B_{mЭГ-3} = 0,97$ Тл. В графике индукции для модели ЭГ-1 наблюдается пять максимумов индукции, а в моделях ЭГ-2 и ЭГ-3 соответственно три максимума (по числу зубцов статора на полюсном делении).

Зависимость тормозного электромагнитного, действующего при нагрузке на ротор, от угла поворота ротора для исследуемых моделей вычислялась в диапазоне от оси d (поле соответствующих полюсов ротора направлено согласно с полем, создаваемым включенными фазами статора) до оси q (поле соответствующих полюсов ротора направлено встречно к полю, создаваемому включенными фазами статора). Для исследуемых моделей этот диапазон равен 45° . Для удобства анализа зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора на рис. 4 приведена в среднем диапазоне угла от $\theta=15^\circ$ до $\theta=30^\circ$, т.е. величина среднего диапазона равна $\tau_{cp} = 15^\circ$. Средний электромагнитный момент, действующий при нагрузке на ротор электрогенератора, в пределах среднего диапазона определяется выражением:

$$M_{cp} = \frac{1}{\tau_{cp}} \cdot \int_{-\tau_{cp}/2}^{+\tau_{cp}/2} M(x) dx,$$

где: x – продольная координата; τ_{cp} – величина среднего диапазона.

Анализируя зависимость тормозного момента от положения ротора исследуемых моделей, следует отметить, что в исследуемом диапазоне средний электромагнитный момент для модели ЭГ-1 равен $M_{cpЭГ-1} = 21$ Нм, для модели ЭГ-2 – $M_{cpЭГ-2} = 56$ Нм и соответственно для модели ЭГ-3 – $M_{cpЭГ-3} = 84$ Нм. Масса магнитов для исследуемых моделей равна $m_{ПМ} = 1,5$ кг.

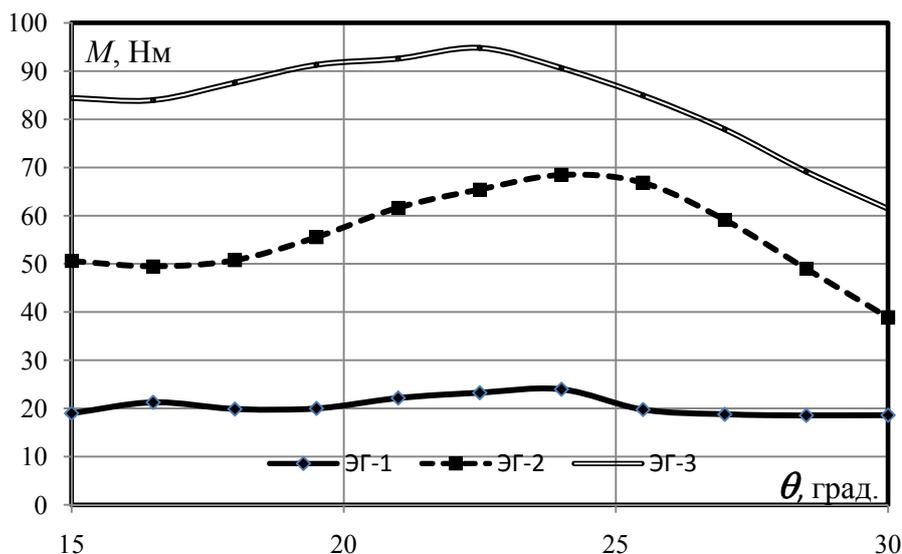


Рис. 4. Зависимость электромагнитного момента при различных значениях угла поворота ротора для моделей ЭГ-1, ЭГ-2, ЭГ-3.

Сравнивая модель ЭГ-1 и модель ЭГ-2, следует отметить, что увеличение высоты паза для модели ЭГ-2 в 2,2 раза по сравнению с моделью ЭГ-1 позволило увеличить значение среднего момента в 2,7 раза. Т. е. при одинаковых размерах ротора за счет изменения конфигурации магнитной системы статора можно увеличить электромагнитный момент. Если сравнивать электромагнитный момент для модели ЭГ-2 и модели ЭГ-3, то увеличение высоты паза в 1,38 раза позволило увеличить средний электромагнитный момент в 1,5 раза. Объясняется это тем, что за счет значительной коэрцитивной силы ПМ магнитное поле «вытягивается» вдоль зубцов, высота которых существенна, а увеличенная площадь пазов позволяет обеспечить высокую линейную токовую нагрузку, а значит, получит существенное увеличение электромагнитного момента.

Приведенные результаты расчетов магнитного поля и моментов для трех моделей электрогенераторов с ПМ свидетельствуют о том, что конфигурация магнитной системы существенным образом влияет на моментные характеристики. При одинаковой конфигурации и размерах ротора с ПМ можно существенным образом увеличить электромагнитный момент генератора.

В таблице приведены основные характеристики исследуемых моделей электрогенераторов. Масса магнитов исследуемых моделей одинакова, поскольку конфигурация и размеры ротора для трех исследуемых моделей идентичны. Масса активной части приведена без учета массы вала, подшипниковых щитов, подшипников и станины. Расчетное значение мощности приведено для случая применения исследуемых электрогенераторов в ВЭУ с ВОВ, когда средняя частота вращения ротора равна 120 об/мин и для применения электрогенераторов для микро-ГЭС, когда средняя частота вращения равна 1000 об/мин.

Модель электрогенератора	Масса магнитов, кг	Масса активной части, кг	Средний электромагнитный момент, Нм	Расчетное значение мощности для ветроустановки ($n=120$ об/мин), кВт	Расчетное значение мощности для микро-ГЭС ($n=1000$ об/мин), кВт
ЭГ-1	1,5	14,7	21	0,25	2,1
ЭГ-2	1,5	24,4	56	0,67	5,6
ЭГ-3	1,5	32,9	83	1,0	8,3

Таким образом, применением численных методов и соответствующих программных комплексов позволяет выполнять расчет электромагнитного поля и моментов с учётом магнитных свойств материалов и параметров модели. При этом для достижения поставленной цели, например, максимум момента в заданном объеме необходимо производить серию оптимизационных расчетов. Современные программные комплексы, например, ELCUT 5.6 или COMSOL 3.5 (FEMLAB) позволяют автоматизировать этот процесс и дают возможность получить оптимальную конфигурацию магнитной системы за приемлемое время.

С целью определения характеристик электрогенератора была изготовлена модель ЭГ-1. За основу был взят статор асинхронного двигателя АИР90LA8, обмотки статора не перематывались. Масса изготовленного электрогенератора $m_{ЭГ-1} = 17,7$ кг. При испытаниях электрогенератора в качестве приводного двигателя использовался двигатель постоянного тока. Испытуемый генератор через шкивы с ременной передачей приводился во вращение с помощью двигателя постоянного тока. Частота вращения приводного двигателя постоянного тока регулировалась с помощью латра. Обмотки испытуемого электрогенератора ЭГ-1 соединены в «звезду». Выводы обмоток подключены к трехфазному выпрямителю (схема Ларионова). Для схемы Ларионова известны следующие соотношения: $U_n = 2,34U_\phi$, $I_n = 1,22I_\phi$. В качестве нагрузки (R_n) использовался реостат с переменным сопротивлением. Схема электрическая принципиальная для испытаний электрогенератора представлена на рис. 5.

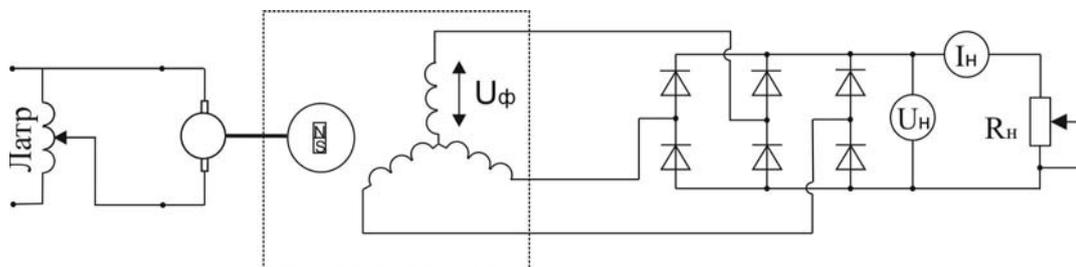


Рис. 5. Схема электрическая принципиальная для испытаний электрогенератора.

По результатам измерений при различных значениях сопротивления нагрузки рассчитано и построено ряд зависимостей, характеризующих работу электрогенератора ЭГ-1. На рис. 6 приведена зависимость момента на валу электрогенератора от частоты вращения ротора при различных значе-

ниях сопротивления нагрузки. Анализируя графики, приведенные на рис. 6, следует отметить, что момент на валу при малом значении сопротивления нагрузки, равном $R_H = 7 \text{ Ом}$ весьма значителен и достигает значения $104,4 \text{ Нм}$.

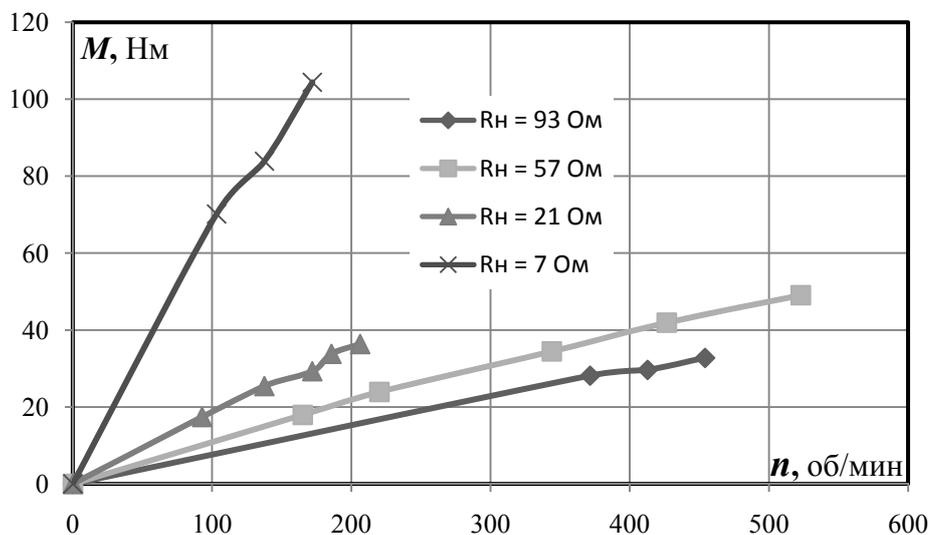


Рис. 6. Зависимость момента на валу электрогенератора (ЭГ-1) от частоты вращения ротора.

На рис. 7 приведена зависимость момента на валу электрогенератора от тока нагрузки. Следует отметить, что номинальный ток двигателя АИР90LА8 при соединении в «звезду» составляет – $I_H = 2,2 \text{ А}$. Анализируя кривые на рис. 7, отметим, что при номинальном токе практически во всем диапазоне нагрузок тормозной момент на валу электрогенератора ЭГ-1 составляет $M = 19\text{-}25 \text{ Нм}$. Также следует отметить, что расчетное значение момента при номинальном токе составляет $M_{\text{рас}} = 21 \text{ Нм}$.

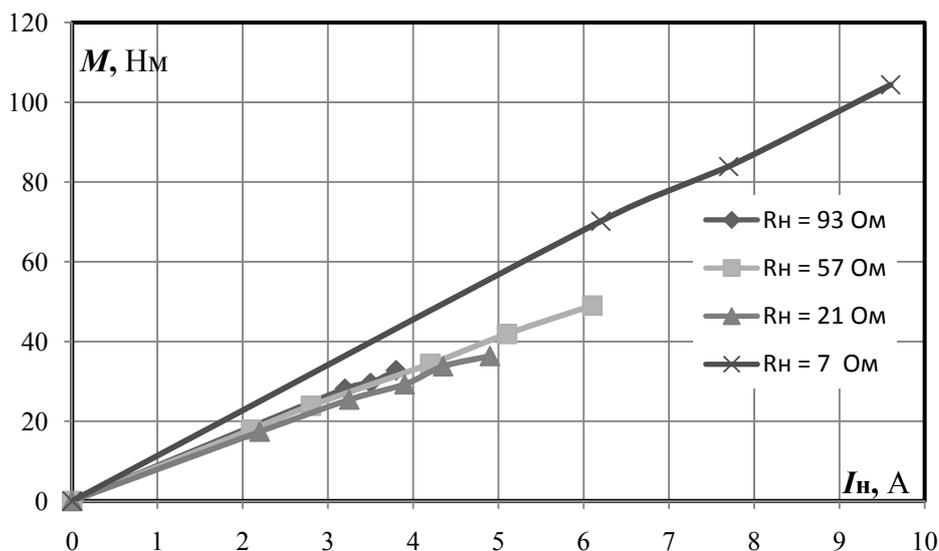


Рис. 7. Зависимость момента на валу электрогенератора (ЭГ-1) от тока нагрузки.

Таким образом, величина тормозного электромагнитного момента, рассчитанная по программе ELCUT 5.6, довольно хорошо совпадает с экспериментальными данными. Также следует

отметить, что момент на валу электрогенератора практически линейно зависит от тока нагрузки для всех значений сопротивления нагрузки.

Выводы.

1. Конфигурация и размеры магнитной системы электрогенератора с ПМ существенным образом влияет на его характеристики, поэтому на стадии предварительного проектирования применение современных программных пакетов, например, ELCUT 5.6 позволяет оптимизировать геометрию магнитной системы и получить требуемые характеристики электрогенератора.

2. Расчетное значение тормозного момента модели электрогенератора ЭГ-1 достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными. Опираясь на данные, полученные экспериментальным путем, также следует отметить, что электрогенератор обладает высокой перегрузочной способностью, что значительно расширяет область применения данного типа электрогенератора.

3. Для модели электрогенератора ЭГ-1 расчетное значение мощности при частоте вращения, равной 120 об/мин (применительно к ветроустановкам) составляет 0,25 кВт, а при частоте вращения, равной 1000 об/мин (применительно к микро-ГЭС) составляет 2,1 кВт. При увеличении диаметре статора расчетное значение мощности для модели электрогенератора ЭГ-2 соответственно составляет 0,67 кВт и 5,6 кВт и для модели электрогенератора ЭГ-3 соответственно – 1,0 кВт и 8,3 кВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев А. И. Концепция создания чистого загородного дома, обеспеченного возобновляемыми источниками энергии. // Гидроэнергетика Украины. – 2008. - №4. – С. 42-47.
2. <http://www.turboatom.com.ua>
3. <http://otrada.uaprom.net/>
4. <http://www.dpverano.com.ua/>
5. Гринченко В. Т., Каян В. П., Кочин В. А. Исследование и оптимизация рабочих характеристик ветроротора с вертикальной осью вращения с механизмом управления лопастями. // Доповіді НАН України. – 2008. – №12 – С. 62-68.
6. Гребеников В. В., Прыймак М. В. Моделирование магнитных полей в электромеханических преобразователях энергии с постоянными магнитами. // Вісник кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2009. - №3 (56). - Ч 2. - С. 70-73.