

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ УРАВНОВЕШИВАНИЯ МАГНИТНОГО МОМЕНТА ДУГОСТАТОРНОГО ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА С КОЛЬЦЕОБРАЗНЫМ РОТОРОМ

В.В. Козырский¹, докт. техн. наук, **Н.И. Трегуб**², канд. техн. наук, **В.В. Гребеников**³, канд. техн. наук, **М.В. Прыймак**⁴, асп.

1 – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,

ул. Героев Обороны, 15, Киев-41, 03041, Украина

2 – Белоцерковский национальный аграрный университет,

пл. Соборная, 8/1, Белая Церковь, 09116, Украина

3, 4 – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Рассмотрены методы уравновешивания магнитного момента дугостаторных аксиальных индукторных и магнитоэлектрических генераторов с кольцеобразным ротором и принцип стабилизации воздушного зазора с помощью магнитных кондукторов, а также исследованы расчетные модели. Библ. 5, рис. 10.

Ключевые слова: дугостаторный аксиальный ветроэлектрический генератор, уравновешивание магнитных моментов, магнитные кондукторы воздушного зазора, расчетные модели электромагнитного момента.

Одним из путей создания безредукторной ветроэлектрической установки является разработка дугостаторного электрогенератора с кольцеобразным ротором большого диаметра, что позволяет [2] достигать более высоких линейных скоростей его активных элементов без потерь в механизмах мультипликации. При этом внутреннее пространство кольцеобразного ротора используется для установки лопастей ветродвигателя. Вместе с тем при определенном магнитном потоке возбуждения возрастает тормозящий момент по сравнению с ротором генератора меньшего диаметра. Поэтому необходимо проанализировать методы уравновешивания момента магнитных потоков возбуждения от постоянных магнитов, чтобы пуск и вращение ветроэлектрического генератора без нагрузки происходили с минимальным сопротивлением.

Состояние проблемы. Существующие способы и методики достижения минимальных пульсаций магнитного момента довольно совершенно разработаны для полностаторных радиальных электрических машин, но для дугостаторных конструкций аксиальной конфигурации требуют уточнений в зависимости от конкретных массогабаритных условий. При этом для генераторов переменного тока всегда рассматриваются конкурирующие условия, например, максимальное количество полюсов ротора при максимальном магнитном потоке через секцию магнитопровода статора и определенном количестве фаз. Конструкция дугостаторного магнитоэлектрического генератора с кольцеобразным ротором рассматривалась в работе [1], где определялись оптимальные аксиальные размеры магнитов различных типов. Кроме того, в [3] были заявлены устройство периферийной части кольцеобразного ротора с аксиально установленными магнитами, а также магнитопровод секции статора, изготовленный из ленточной электротехнической стали. Заявлена также [4, 5] конструкция аксиального индукторного генератора. Однако вопросы уравновешивания моментов магнитных потоков возбуждения, а также стабилизации зазора магнитными кондукторами не рассматривались.

Цель исследований. Разработать способы и методы уравновешивания моментов магнитных потоков возбуждения кольцеобразного ротора дугостаторного генератора и бесконтактной стабилизации аксиального воздушного зазора. Идеальным состоянием магнитоэлектрической системы такого генератора следует считать минимальный момент сопротивления для магнитных потоков возбуждения, поскольку механическая энергия при отсутствии на-

грузки расходуется только на механические потери и потери рассеивания этих магнитных потоков.

Методы исследований. Теоретически проанализированы возможности взаимной компенсации втягивающих и удерживающих усилий магнитных потоков возбуждения в зазоре. Методом моделирования установлены зависимости изменения величины магнитного момента ротора в процессе движения его постоянного магнита в аксиальном зазоре секции магнитопровода статора. Определены геометрические условия достижения нулевого баланса моментов магнитных потоков возбуждения аксиального кольцеобразного ротора с постоянными магнитами путем аналитических расчетов.

Результаты работы. Рассматривались дугостаторные аксиальные генераторы с кольцеобразным ротором индукторного и магнитоэлектрического типов.

Особенность конструкции магнитоэлектрического генератора состоит в том, что постоянные магниты призматической или цилиндрической формы устанавливаются на диэлектрической дискообразной периферийной части кольцеобразного ротора с односторонней ориентацией их одноименных полюсов в аксиальном направлении. Это позволило уменьшить поперечные потоки рассеяния через магнитопровод и одновременно дало возможность установить на входе и выходе дугообразного статора магнитные кондукторы аксиального воздушного зазора. Схематическое изображение конструкции аксиального магнитоэлектрического дугостаторного генератора с магнитными кондукторами воздушного зазора представлено на рис. 1, где обозначено: 1 – диэлектрическая станина статора, 2 – магнитопровод секции статора, 3 – обмотка секции статора, 4 – диамагнитный корпус кольцеобразного ротора, 5 – ось ротора, 6 – спицы ротора, 7 – постоянные магниты ротора, 8 – постоянные магниты кондуктора воздушного зазора, установленного на общей диэлектрической станине секций статора, 9 – диэлектрический корпус кондуктора, 10 – регулировочные винты кондуктора.

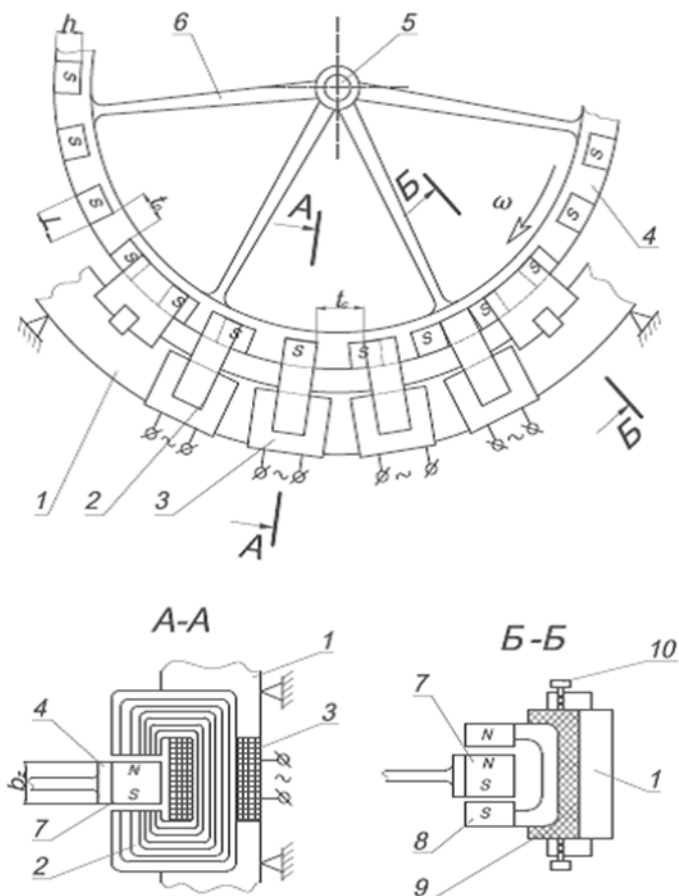


Рис. 1

Принцип действия генератора состоит в том, что полюсные магниты кольцеобразного ротора, проходя в аксиальных зазорах дугообразного статора, одновременно притягиваются магнитопроводами секций статора и отталкиваются в том же аксиальном направлении магнитными кондукторами. Поскольку происходит наложение сил не только в аксиальном, но и в тангенциальном направлении, то необходимо отдельно исследовать картины этих сил. Большим преимуществом аксиального зазора дугостаторного генератора по сравнению с радиальным считаются аксиальная симметричность сил притягивания и отсутствие силового действия магнитных потоков на всю конструкцию и ось кольцеобразного ротора в радиальном направлении. Кроме того, чрезвычайно важно, что в аксиальном зазоре гироскопический момент вращающегося кольцеобразного ротора препятствует одностороннему притягиванию в аксиальном направлении магнита ротора к магнитопроводу статора, особенно на больших оборотах.

Для лучшего представления схемы действия аксиальных и тангенциальных составляющих сил со стороны магнитных кондукторов и секций статора на магниты ротора можно показать развертку радиальной проекции дугового статора (рис. 2). Положения деталей, изображенных на рис. 1 и 2, совпадают, где 2 – полюсные выступы магнитопроводов секций статора, 7 – постоянные магниты ротора, 8 – магниты кондуктора.

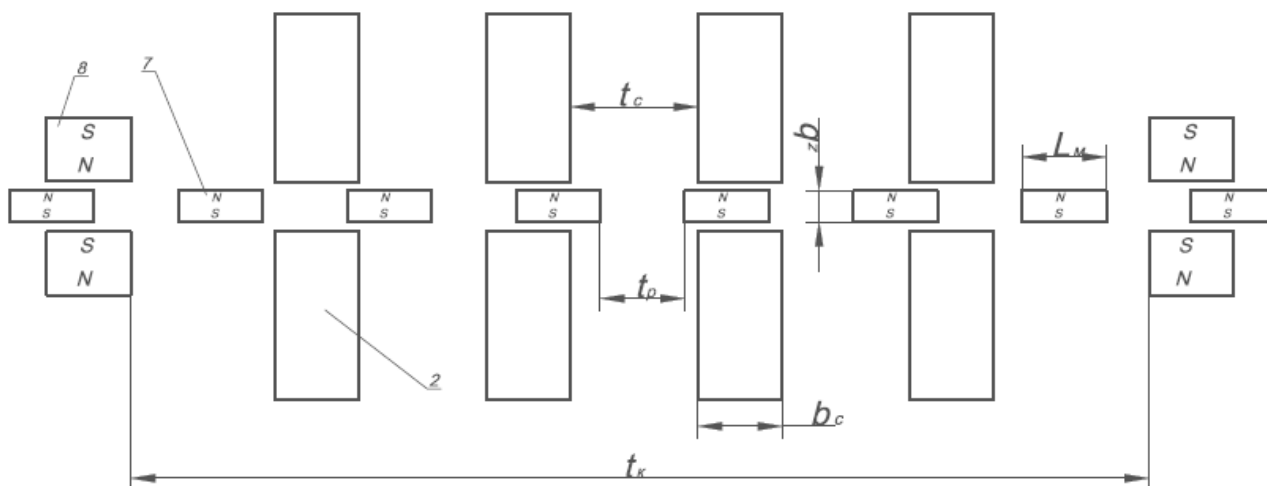


Рис. 2

В представленной схеме изначально принято следующее:

- поверхности полюсов призматических магнитов ротора и торцов магнитопроводов секций статора в зазоре взаимно параллельны;
- диэлектрический диамагнитный материал периферийной части корпуса ротора, где установлены магниты, имеет магнитную проницаемость, близкую к проницаемости воздуха, поэтому на схеме не показан;
- размер стороны квадратной полюсной поверхности магнитов ротора одинаков с расстоянием между ними;
- ширина магнитопроводов статора в зазоре и ширина магнитов ротора одинаковы, поэтому можно записать $t_p = b_c = L_m$.

В статическом режиме магнитные кондукторы статора силами отталкивания действуют на одноименные полюса магнитов ротора, компенсируя силы притягивания других магнитов к магнитопроводам статора в аксиальном зазоре. Очевидно, что максимальное отталкивающее усилие возникает при полном совмещении площадей полюсов магнитов кондуктора с одноименными полюсами магнитов ротора. Если магнитные кондукторы установлены на обоих концах дугообразного статора (один на входе и один на выходе), то для взаимного уравновешивания тангенциальных усилий выталкивания магнитов ротора необходимо их устанавливать со смещением сближением на половину ширины магнита ротора. Тогда касательные усилия выталкивания в магнитных кондукторах постоянно будут симметрично направлены в противоположные стороны, то есть взаимно компенсированы.

Также отдельно необходимо определить условия взаимного компенсирования тангенциальных усилий втягивания и удержания магнитов ротора в зазорах секций магнитопроводов дугового статора. Очевидно, что уравновешивание усилий втягивания и удержания принципиально возможно только при четном количестве секций статора. Таким образом, количество секций статора, позволяющее взаимно компенсировать тангенциальные усилия втягивания и удержания в зазоре магнитов ротора, должно быть не менее двух. При двух секциях статора расстояние между ними должно равняться двум расстояниям между магнитами ротора. При таком расположении два магнита ротора будут постоянно находиться в силовом равновесии втягивания и удержания в зазорах обеих секций магнитопроводов дугообразного статора.

В общем случае условие уравнивания моментов магнитных потоков возбуждения отдельных секций дугообразного статора зависит от их четного количества и описывается зависимостью

$$t_c/t_p = (m + 2)/m, \quad (1)$$

где t_c – расстояние на уровне зазора между магнитопроводами соседних секций статора; t_p – расстояние по дуге окружности вращения между магнитами ротора; m – четное количество секций дугообразного статора.

Поскольку функционально зависимой величиной является расстояние t_c между магнитопроводами секций статора, а переменным аргументом – количество секций статора m , то из выражения (1) получим функциональную зависимость расстояния между секциями статора и их количеством при детерминированном значении размеров полюсных поверхностей магнитов ротора и расстояний между ними:

$$t_c = t_p \frac{(m + 2)}{m}. \quad (2)$$

Зависимость (2) одновременно учитывает условие целевой функции оптимального (минимального) расстояния между магнитопроводами соседних секций дугообразного статора на уровне середины аксиального зазора. С увеличением четного количества секций дугообразного статора расстояние между ними приближается к расстоянию между магнитами ротора по дуге окружности их вращения, что повышает показатели использования длины статора.

Приведенное выражение (2) в одинаковой мере может определять условия уравнивания магнитных моментов для дугостаторных генераторов не только магнитоэлектрического, но также индукторного [4] типа, причем кроме аксиальных и с другими типами зазоров.

Принцип действия магнитных кондукторов 8 (рис. 2) можно пояснить с помощью анализа векторов их силового взаимодействия с магнитами ротора и одновременно магнитов ротора с магнитопроводами секций статора. Первая пара одноименных магнитных полей вызывает взаимное отталкивание, тогда как между магнитами ротора и магнитопроводами секций статора действуют лишь силы притягивания. Поскольку магнитные кондукторы и секции статора установлены на общем корпусе, то аксиальные силы притягивания магнитов до магнитопроводов в зазоре могут компенсироваться силами отталкивания других магнитов от магнитных кондукторов в противоположном направлении. Аналогично условиям уравнивания магнитного момента при взаимодействии магнитов ротора с магнитопроводами секций статора, необходимо определить условия уравнивания выталкивающего касательного усилия магнитов кондукторов на магниты ротора. Если считать тангенциальные выталкивающие усилия одинаковыми относительно геометрической оси симметрии поверхностей полюсов магнитов, то такие условия имеют геометрически однозначное решение, когда магниты кондукторов установлены относительно магнитов ротора в противофазе на минимальном расстоянии от магнитопроводов статора, как показано на рис. 2, и описываются выражением

$$t_\kappa = m \cdot b_c + (m - 1) \cdot t_c + \frac{m + 2}{m} \cdot t_p, \quad (3)$$

где t_κ – расстояние между магнитами кондукторов, м; b_c – ширина магнитопровода секции статора, м.

Подставляя значение t_c из выражения (2) с учетом замены $b_c = t_p$, из начальных условий, после сокращений выражение (3) можно записать более простым выражением:

$$t_\kappa = 2t_p(m + 1). \quad (4)$$

Однако представленные теоретические зависимости (2), (4) могут быть точными лишь при условии полной симметрии тангенциальных сил втягивания магнита в аксиальный зазор и удержания его там относительно величины взаимного перекрытия нормальных площадей полюсов магнита и магнитопровода в зазоре. Действительная же картина может несколько

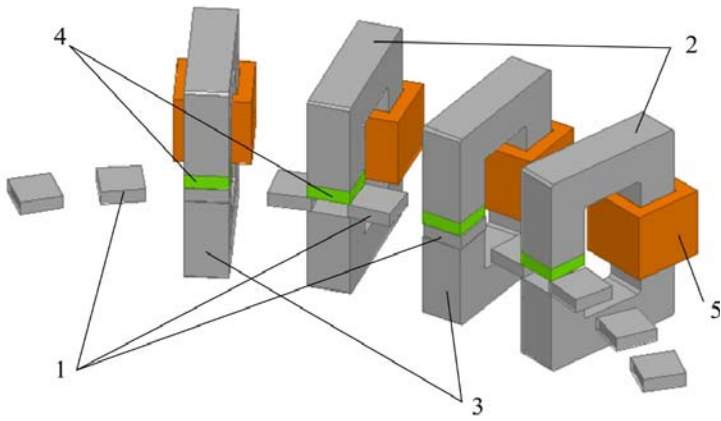


Рис. 3

торного типа (рис. 3) постоянные магниты 4 на основе редкоземельных материалов (NdFeB) закреплены неподвижно на статорных секциях 2 и 3, а ротор состоит из ферромагнитных сегментов 1. При перемещении ротора величина воздушного зазора секции статора изменяется, что влечет за собой изменение магнитного потока постоянного магнита сцепленного с катушкой статора 5, в которой индуцируется ЭДС.

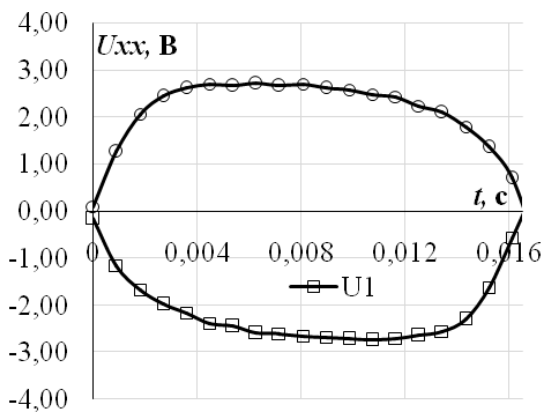


Рис. 4

Для оценки напряжения генератора выполнена серия расчетов магнитостатики в пакете COMSOL 3.5 при последовательном смещении ротора на 0,3 градуса. Для каждой магнитостатической задачи рассчитано значение потокосцепления катушки статора одной статорной секции. Исходя из значения скорости вращения ротора $n = 50$ об/мин и значения приращения потокосцепления, получены зависимости фазных напряжений от времени для двух соседних фазных секций статора (рис. 4, где U_1 – фазное напряжение катушки фазы 1, U_2 – фазное напряжение катушки фазы 2). Действующее напряжение в одной катушке фазы $U = 2,23$ В.

Для повышения выходного напряжения генератора необходимо последовательно соединить необходимое количество обмоток статорных секций. Так, для получения максимального значения разности потенциалов на зажимах генератора $U = 54$ В необходимо последовательно соединить по 10 статорных секций на каждую фазу.

На рис. 5 приведена зависимость «клеящего» момента от положения ротора. Величина «клеящего» момента определяет минимальную скорость ветра, при которой ветроустановка начинает вращаться. Следует отметить, что максимальное значение «клеящего» момента невелико и составляет $M_{кл} = 1,22$ Нм.

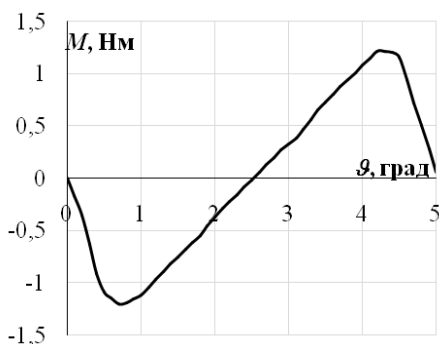


Рис. 5

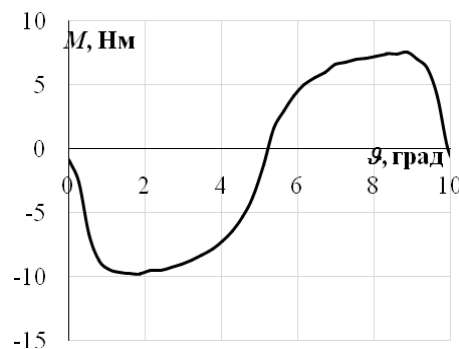


Рис. 6

отличаться от теоретических расчетов. Поэтому была необходимость изучения тангенциальных составляющих сил втягивания и удержания магнита ротора в аксиальном зазоре методом моделирования. Проведены исследования магнитных моментов параметрических моделей магнитов кольцеобразного ротора в аксиальных зазорах дугообразного статора.

Далее, приведены результаты моделирования двух моделей дугостаторного генератора. У модели 1 индукторного типа (рис. 3) постоянные магниты 4 на основе редкоземельных материалов (NdFeB) закреплены неподвижно на статорных секциях 2 и 3, а ротор состоит из ферромагнитных сегментов 1. При перемещении ротора величина воздушного зазора секции статора изменяется, что влечет за собой изменение магнитного потока постоянного магнита сцепленного с катушкой статора 5, в которой индуцируется ЭДС.

Для оценки напряжения генератора выполнена серия расчетов магнитостатики в пакете COMSOL 3.5 при последовательном смещении ротора на 0,3 градуса. Для каждой магнитостатической задачи рассчитано значение потокосцепления катушки статора одной статорной секции. Исходя из значения скорости вращения ротора $n = 50$ об/мин и значения приращения потокосцепления, получены зависимости фазных напряжений от времени для двух соседних фазных секций статора (рис. 4, где U_1 – фазное напряжение катушки фазы 1, U_2 – фазное напряжение катушки фазы 2). Действующее напряжение в одной катушке фазы $U = 2,23$ В.

Для повышения выходного напряжения генератора необходимо последовательно соединить необходимое количество обмоток статорных секций. Так, для получения максимального значения разности потенциалов на зажимах генератора $U = 54$ В необходимо последовательно соединить по 10 статорных секций на каждую фазу.

На рис. 5 приведена зависимость «клеящего» момента от положения ротора. Величина «клеящего» момента определяет минимальную скорость ветра, при которой ветроустановка начинает вращаться. Следует отметить, что максимальное значение «клеящего» момента невелико и составляет $M_{кл} = 1,22$ Нм.

Для оценки мощности электрогенератора без построения динамической модели можно провести моделирование ряда задач магнитостатики при номинальном значении тока в фазе статора для ряда положений ротора и по

строить зависимость электромагнитного момента от положения ротора (рис. 6).

Из полученной зависимости электромагнитного момента от положения ротора найдено действующее значение электромагнитного момента $M = 7$ Нм для двух статорных секций одной фазы (позиция 3, рис. 3). Таким образом, действующее значение электромагнитного момента электрогенератора для 10 статорных секций на фазу составляет $M = 70$ Нм, а расчетное значение мощности $-P_2 \approx 350$ Вт при частоте вращения ротора $n = 50$ об/мин.

Недостатком описанной конструкции является наличие значительных аксиальных усилий, приложенных к ротору при несимметрии рабочего зазора. Для получения приемлемых значений выходной мощности и напряжения электрогенератора необходимо увеличивать количество статорных секций, что влечет увеличение массы дорогостоящих редкоземельных постоянных магнитов. Однако вместо редкоземельных магнитов можно использовать более дешевые, поскольку конструкция позволяет устанавливать на неподвижном статоре их более габаритными. Одновременно достигаются предельная простота и минимальные массогабаритные показатели конструкции кольцеобразного ротора.

Для сравнения показателей расхода активных материалов, необходимых для изготовления электрогенератора, предложена другая модель электрогенератора, представленная на рис. 7.

Здесь модель 2 содержит ферритовые постоянные магниты 1, размещенные на роторе.

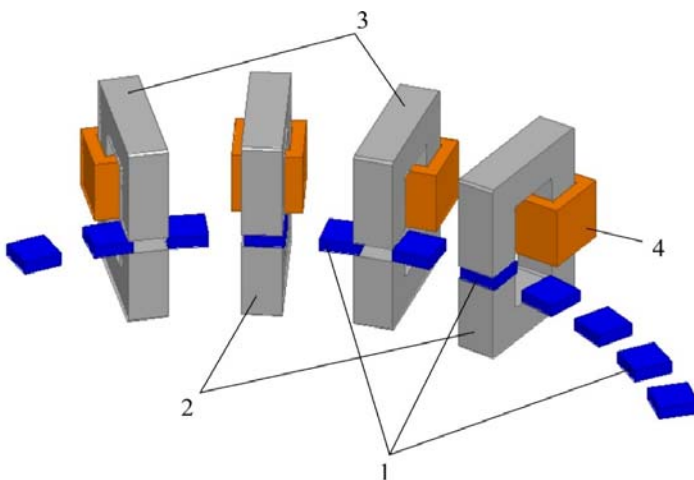


Рис. 7

Вектор намагниченности у всех магнитов совпадает и направлен вдоль оси вращения ротора. Такая конструкция также позволяет применить магнитные кондукторы для компенсации аксиальных усилий, приложенных к ротору, и удержания ротора посередине воздушного зазора. Модель электрогенератора имеет четыре статорных секции 2 и 3 (рис. 7), по две на каждую фазу. При вращении ротора с ферритовыми постоянными магнитами в ферромагнитных сердечниках статорных секций изменяется величина магнитного потока сцепленного с катушками статора 4.

С помощью описанного выше подхода

получены зависимости фазного напряжения для одной катушки каждой фазы от времени (рис. 8). Действующее напряжение в одной катушке фазы $U = 3,1$ В, что в 1,4 раза больше, чем в модели 1.

На рис. 9 приведена зависимость «клеящего» момента от положения ротора. Максимальное значение этого момента $M_{кл} = 1,61$ Нм, т.е. в 1,3 раза больше, чем у модели 1. Поскольку увеличилось значение «клеящего» момента, то и пусковая скорость ветра будет большей.

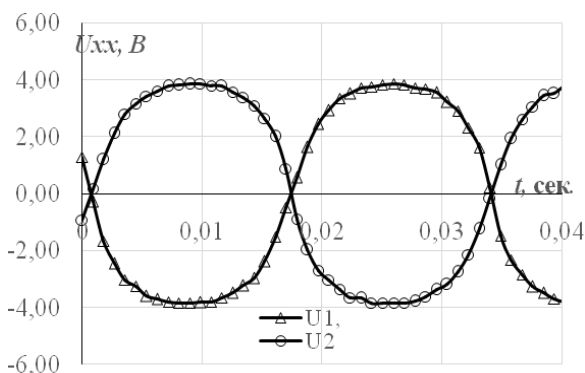


Рис. 8

Как и для модели 1, для оценки выходной мощности электрогенератора построена зависимость электромагнитного момента от положения ротора (рис. 10). Из полученной зависимости электромагнитного момента от положения ротора найдено действующее значение электромагнитного момента $M = 9,15$ Нм для двух статорных секций одной фазы (позиция 2, рис. 7).

Таким образом, расчетная мощность электрогенератора для 10 статорных секций на фазу будет равна $P_2 = 457$ Вт. Для диаметра ротора 700 мм максимальное количество статорных секций, которое

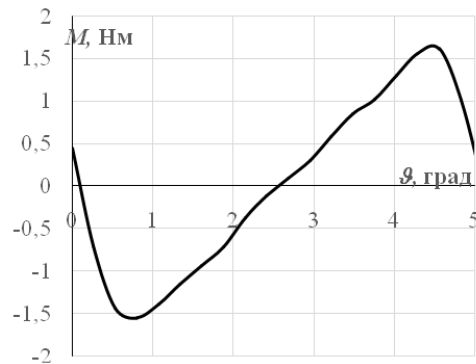


Рис. 9

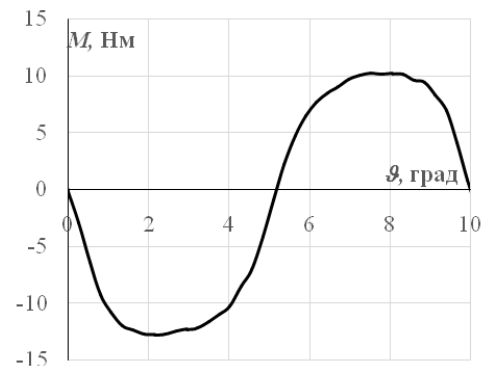


Рис. 10

можно установить в электрогенераторе такой конструкции, $N = 12$ шт. для каждой фазы.

Сравнивая две исследованные модели, необходимо отметить перспективность индукторной конструкции кольцеобразного ротора дугостаторного ветроэлектрического генератора, как наиболее простую с минимальными габаритами, хотя она уступает магнитоэлектрическому типу модели 2 по использованию магнитного материала. Результаты моделирования показали небольшие значения выходной мощности электрогенератора, однако это вызвано очень низкой скоростью вращения кольцеобразного ротора, что можно компенсировать увеличением его диаметра.

Выводы. 1. Минимальный магнитный момент сопротивления достигается при геометрическом расположении секций статора и магнитных полюсов ротора в соответствии с зависимостью $t_c = t_p(m+2)/m$. Приведенное выражение в одинаковой мере может определять условия уравнивания магнитных моментов для дугостаторных генераторов не только магнитоэлектрического, но также индукторного типа, причем кроме аксиальных и с другими типами зазоров.

2. Бесконтактное стабилизирование воздушных зазоров возможно на магнитоэлектрических генераторах без чередования полюсов магнитов на роторе с помощью магнитных кондукторов. При этом уравнивание магнитных моментов кондукторов достигается при условии установки их в противофазе относительно магнитов ротора с учетом минимального расстояния между магнитопроводами крайних секций дугообразного статора на расстоянии, определяемом зависимостью $t_k = 2t_p(m+1)$.

3. Результаты моделирования показывают, что магнитоэлектрический тип модели имеет лучшие показатели по использованию магнитного материала, в то же время индукторный тип хотя и уступает по этим показателям, однако имеет преимущества по простоте и массогабаритным параметрам кольцеобразного ротора.

1. *Трегуб Н.И., Гребеніков В.В., Приймак М.В.* Обоснование типов и параметров электрогенераторов для безредукторных ветроэлектрических установок // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2012. – Вип. 31. – С. 62–73.
2. *Пат. на корисну модель 32851, МПК F03D 1/00.* Безредукторна вітроенергетична установка / *М.І. Трегуб.* Заявл. 19.03.2007. Опубл. 10.06.2008; Бюл. № 11.
3. *Пат. на корисну модель 71835, МПК H02K21/12.* Магнітоелектричний аксіальний генератор / *М.І. Трегуб, В.В. Гребеніков, М.В. Приймак.* Заявл. 06.02.2012; Опубл. 25.07.2012; Бюл. № 14.
4. *Пат. на корисну модель 101118, МПК H02K19/20, H02K21/38.* Індукторний аксіальний генератор / *М.І. Трегуб, В.В. Козирський.* Заявл. 27.01.2012; Опубл. 25.02.2013; Бюл. № 4.
5. *Пат. на корисну модель 79084, МПК H02K21/12, H02K21/24.* Аксиальний магнітоелектричний генератор / *М.І. Трегуб, В.В. Козирський, В.В. Гребеніков, М.В. Приймак.* Заявл. 15.10.2012; Опубл. 10.04.2013; Бюл. № 7.

УДК 620.92, 621.13

В.В. Козирський¹, докт. техн. наук, **М.І. Трегуб**², канд. техн. наук, **В.В. Гребеніков**³, канд. техн. наук, **М.В. Приймак**⁴, асп.

1 – Національний університет біоресурсів та природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, Київ-41, 03041, Україна

2 – Білоцерківський національний аграрний університет,
пл. Соборна, 8/1, Біла Церква, 09116, Україна
3, 4 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

Обґрунтування методів урівноважування магнітного моменту дугостаторного вітроелектричного генератора з кільцеподібним ротором

Розглянуто методи зрівноважування магнітного моменту дугостаторних аксіальних індукторних і магнітоелектричних генераторів з кільцеподібним ротором та принцип стабілізування повітряного зазору за допомогою магнітних кондукторів, а також досліджено розрахункові моделі. Бібл. 5, рис. 10.

Ключові слова: дугостаторний аксіальний вітроелектричний генератор, зрівноважування магнітних моментів, магнітні кондуктори повітряного зазору, розрахункові моделі електромагнітного моменту.

V.V. Kozyrskyi¹, M.I. Tregub², V.V. Grebenikov³, M.V. Priymak⁴

1 – National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine,
Heroiv Oborony, 15, Kyiv-41, 03041, Ukraine

2 – Bilotserkivskyi National Agrarian University,
Soborna, 8/1, Bila Tserkva, 09116, Ukraine

3, 4 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine

Justification of the methods of magnetic torque balancing of wind-electric generator with arc-type stator and ring-type rotor

The methods of magnetic torque balancing of axial inductor and electromagnetic generators with arc-type stator and ring-type rotor and the principle of stabilization of air gap with magnetic conductors are examined also research was carried out into calculating models. References 5, figures 10.

Key words: axial wind-electric generator with arc-type stator and ring-type rotor, balancing of magnetic torques, air gap magnetic conductors, calculating models of electromagnetic torque.

Надійшла 16.05.2013
Received 16.05.2013