

## ОБОСНОВАНИЕ ТИПОВ И ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ БЕЗРЕДУКТОРНЫХ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

**Н.И. Трегуб<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **В.В. Гребеников<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, **М.В. Прыймак<sup>3</sup>**, инж.

1 – Белоцерковский нац. аграрный ун-т,  
пл. Соборная, 8/1, Белая Церковь, 09116, Украина

2,3 – Ин-т электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

*Рассмотрены основные принципы определения типа и методы расчета электрогенераторов безредукторных ветроэлектрических установок для эффективного использования низкопотенциальных ветров в сельскохозяйственном производстве, а также для загородных домов. Библ. 5, рис. 4, табл. 2.*

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический аксиальный генератор, постоянные магниты, электромагнитный момент, индукция магнитного поля.

**Актуальность.** Ветровая энергия (ВЭ) в сельском хозяйстве использовалась [4] на протяжении многих столетий, в первую очередь, на ветровых мельницах почти по всей территории Украины, даже на местностях со среднегодовой скоростью ветра около 4 м/с. Современная стратегия устойчивого энергообеспечения сельских территорий предусматривает увеличение масштабов использования энергии ветра, что требует существенного усовершенствования, в частности, автономных ветроэлектрических установок (АВЭУ) с повышенной эффективностью использования средних и низкопотенциальных ветров. Этот вопрос имеет большую актуальность в нынешний период быстрого развития электромобильных средств с аккумуляторным питанием и необходимостью использования ветроэлектрических пунктов зарядки аккумуляторных батарей, особенно на значительном удалении от электросетей.

**Состояние проблемы.** Современный опыт развития крупных ветроэнергетических установок (ВЭУ) без изменения нельзя распространить на АВЭУ малой и средней мощностей из-за больших относительных потерь энергии на мультипликацию оборотов при передаче с вала ветродвигателя на вал электрогенератора. Кроме того, применяемые на больших ВЭУ типы электрогенераторов не могут полностью удовлетворить требованиям к АВЭУ. Наиболее эффективными считаются [2] безредукторные системы электрогенераторов с постоянными магнитами, которые не требуют расхода энергии на создание магнитного поля возбуждения. Однако везде применяются традиционные конструктивные схемы размещения ротора электрогенератора непосредственно на валу ветродвигателя и цилиндрического статора в сплошном корпусе вокруг него. При этом попытки использовать максимально допустимые диаметральные габариты электрогенератора, для увеличения окружной скорости активных элементов ротора, вызывают перекрытие части ветрового потока на лопасти ветродвигателя с горизонтальной осью. Поэтому предложены технологические схемы безредукторных ВЭУ [3] с кольцеобразным ветропропускным ротором и дуговым статором, в которых совмещены аэромеханические и электротехнические функции в одной конструкции. Но до сих пор остаются недостаточно обоснованными принципы и методы выбора типа электрогенератора с минимальной массой и габаритами активных материалов такого кольцеобразного ротора.

**Цель работы.** Обосновать методы определения типа и принципы расчета безредукторного ветроэлектрического генератора (БВЕГ) с кольцеобразным ротором и сегментным статором.

**Результаты исследований.** Влияние геометрических размеров лопастей ВУ с горизонтальной осью на частоту вращения вала можно оценить известной [5] зависимостью

$$n = Z v_{\theta} / \pi D, \text{ с}^{-1}, \quad (1)$$

где  $Z$  – коэффициент быстроходности лопастного ротора, о. е.;  $v_0$  – скорость ветра, м/с;  $D$  – диаметр окружности, описываемой концами лопастей, м.

Коэффициент быстроходности  $Z$  является интегральным аэродинамическим показателем качества изготовления лопастей, а также их количества. Можно принимать его усредненные значения для роторов ВУ с определенным количеством лопастей. Из формулы (1) видно, что увеличение диаметра ротора ветродвигателя с горизонтальной осью вызывает уменьшение частоты его вращения асимптотически относительно аргумента. Очевидно также, что окружная скорость разноудаленных участков лопастей возрастает пропорционально удалению их от центра вращения и достигает максимума на периферии. В предложенной в работе [3] конструкции безредукторного ветроэлектрического генератора с кольцеобразным ротором, установленным на жестких внутренних лопастях впереди основных больших лопастей, соотношение их размеров можно определить графически. Если провести горизонтальную линию на уровне определенного значения частоты вращения, то она будет пересекать кривые частотных характеристик ветродвигателей с разным количеством лопастей в различных точках, а опущенные из них вертикали на ось аргумента будут указывать значения диаметров лопастных роторов, синхронно вращающихся без взаимного их торможения. Например, частота вращения трехлопастного ветродвигателя диаметром 4,4 м и шестилопастного диаметром 2,4 м будет одинаковой. С увеличением длины лопастей разница диаметров возрастает сильнее. Поэтому, проектируя кольцеобразный ротор безредукторной ВЭУ путем подбора количества внутренних лопастей, можно определить его диаметр в зависимости от размеров основных больших лопастей. Если кольцеобразный ротор установлен одновременно на внутренних малых и укреплен на корневой части больших лопастей, то учитывается общее их количество.

Опыт использования экспериментальной трехлопастной модели АВЭУ диаметром 4,2 м на протяжении ряда лет в Белоцерковском НАУ показал также преимущество такой кон-

струкции в прочности трехточечного крепления основных лопастей по сравнению с одноточечным консольным креплением большинства распространенных конструкций лопастных ветродвигателей.

Расположение основных и внутрикольцевых лопастей предложенной безредукторной ветроэлектрической установки схематически представлено на рис. 1. Предложенная конструкция позволяет выполнять кольцеобразный ротор электрогенератора большого диаметра, установленный на жестких внутренних лопастях, используя при этом известный диффузорный аэродинамический эффект кольца. Функциональные электромагнитные части ротора устанавливаются на периферийной внешней части кольца, вращающегося в зазоре дугообразного статора. При этом важным условием лучших аэродинамических показателей являются минимальные габариты конструктивных и функциональных деталей кольцевого ротора, зависящих от механических нагрузок и расчетной электрической мощности генератора, которые определяются расчетной мощностью ветродвигателя.

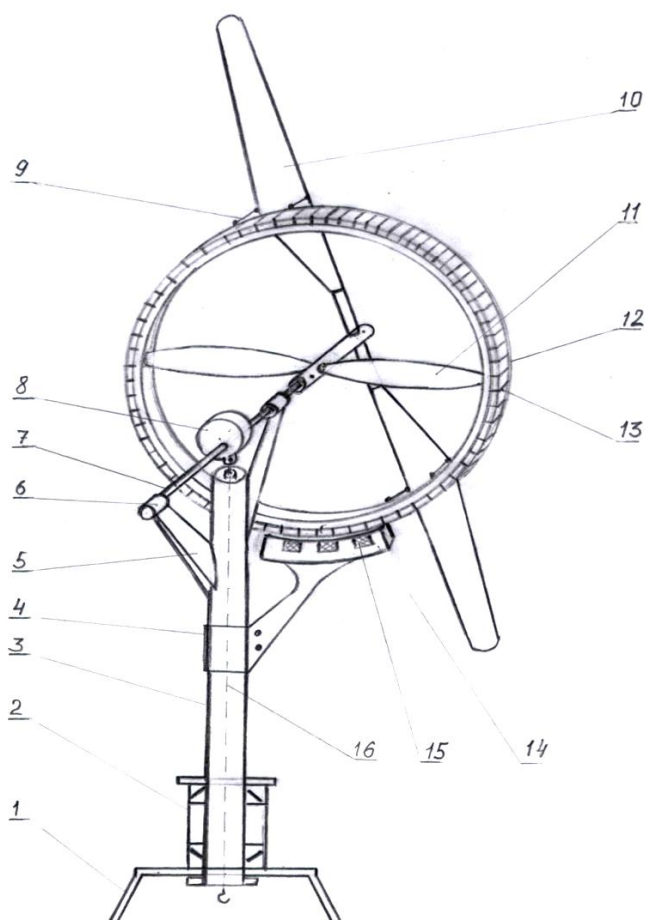


Рис. 1

На рис. 1 обозначено: 1 – рама основания; 2 – подшипниковый узел стойки; 3 – поворотная стойка; 4 – штатив статора; 5 – кронштейн крепления вала; 6 – подшипниковый узел вала; 7 – вал ротора; 8 – эксцентрик; 9 – соединительные тяги; 10 – основные лопасти; 11 – внутрикольцевые лопасти; 12 – кольцеобразный ротор; 13 – активные элементы ротора; 14 – дугообразный статор; 15 – обмотки статора; 16 – тяга механического привода.

Основная техническая проблема эффективного использования энергии низкопотенциальных ветров состоит в том, что при снижении скорости ветра располагаемая мощность уменьшается в кубе и необходимо минимизировать все энергетические потери. Теоретически достижимая мощность ветродвигателя с горизонтальной осью определяется известной [4] зависимостью:

$$P = \pi / 8 \rho v_g^3 D^2 \xi, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, у поверхности земли при температуре 15 °С и нормальном атмосферном давлении [2] равная 1,23 кг/м<sup>3</sup>;  $v_g$  – скорость ветра, м/с;  $D$  – диаметр окружности, описываемой концами лопастей, м;  $\xi$  – коэффициент использования энергии ветра, теоретическое значение которого  $\xi_T$  [4] равно 16/27 или приблизительно 0,593, а наиболее реальные технически достигаемые значения  $\xi_d$  для современных ВУ определенного класса с горизонтальной осью ротора [2] принимаются от 0,4 до 0,48.

При определении расчетной мощности электрогенератора для ветродвигателя с определенными геометрическими параметрами задаются величиной неизбежных энергетических потерь, добавляя их в формулу (2). Однако этот расчет весьма приблизительный из-за сложного закона нелинейного [2] изменения коэффициента мощности от быстроходности.

Принимая предварительно  $\xi_d = 0,4$ , с помощью зависимостей (1) и (2) определяем расчетную мощность  $P$  (Вт) ветродвигателя, частоту его оборотов  $n$  (мин<sup>-1</sup>) и крутящий момент  $M$  (Нм) при различной длине основных лопастей и скоростях ветра от 1 до 12 м/с. Диаметр роторного кольца определяем с учетом разного количества внутренних лопастей, обеспечивающих механическую жесткость конструкции. Результаты расчетов сводим в табл. 1.

В табл. 1 приведены расчетная мощность, частота вращения и крутящий момент трехлопастной модели ветродвигателя с коэффициентом быстроходности  $Z = 5$  при различной длине лопастей от 1 до 6 м и скоростях ветра от 1 до 12 м/с.

Таблица 1

Длина лопастей, м	Диаметр ротора, м	Показатели	Скорость ветра, м/с								
			1	2	3	4	5	6	8	10	12
2	0,7	$P$ , Вт	3	25	83	198	386	668	1583	3091	5342
		$n$ , мин <sup>-1</sup>	24	48	72	95	119	143	191	239	286
		$M$ , Нм	1,2	4,9	11,1	20	31	45	79	124	178
3	1,8	$P$ , Вт	7	56	188	445	869	1502	3561	6955	12019
		$n$ , мин <sup>-1</sup>	16	32	48	64	80	95	127	159	191
		$M$ , Нм	4	17	38	67	104	150	267	417	601
4	2,2	$P$ , Вт	12	99	334	791	1546	2671	6331	12365	21367
		$n$ , мин <sup>-1</sup>	12	24	36	48	60	72	95	119	143
		$M$ , Нм	9,9	40	89	158	247	356	633	989	1424

Анализируя абсолютные значения показателей расчетной мощности, приходим к выводу, что использование низкоскоростных ветров возможно лишь при минимизации мощностных потерь. Одновременно необходимо использовать электрогенератор, способный преобразовывать различную механическую мощность, например, для проектируемой модели ВЭУ с трехметровыми лопастями, от 0,1 до 10 кВт, что не могут обеспечить серийные электрические машины. Для оценки технических возможностей синхронного генератора с постоянными магнитами на роторе изготовлена лабораторная модель и проведены исследования модели магнитной системы с помощью компьютерного моделирования.

Предварительные лабораторные исследования показали, что наиболее рациональной оказалась модель с аксиально ориентированными полюсами постоянных магнитов на роторе и отдельными С-образными секциями магнитопроводов с обмотками статора. При этом эффективно используются простые призматические магниты без каких-либо полюсных наконечников, что принципиально не возможно при традиционной цилиндрической конфигурации с радиальным направлением магнитного потока в зазоре. Большим преимуществом генераторов аксиальной конфигурации можно также считать отсутствие радиальной составляющей силового действия магнитных полей в отличие от электрических машин цилиндрической конфигурации. Это обеспечивает гироскопическую устойчивость положения ротора в зазоре и полностью разгружает вал от радиальных усилий магнитного поля. Общий вид лабораторной модели магнитоэлектрического аксиального генератора с кольцеобразным ротором, диаметр которого равен  $D = 700$  мм, представлен на рис. 2. На роторе установлено 36 постоянных магнитов размером  $30 \times 30$  мм чередующейся полярности. Три секции статора образуют трехфазную систему.

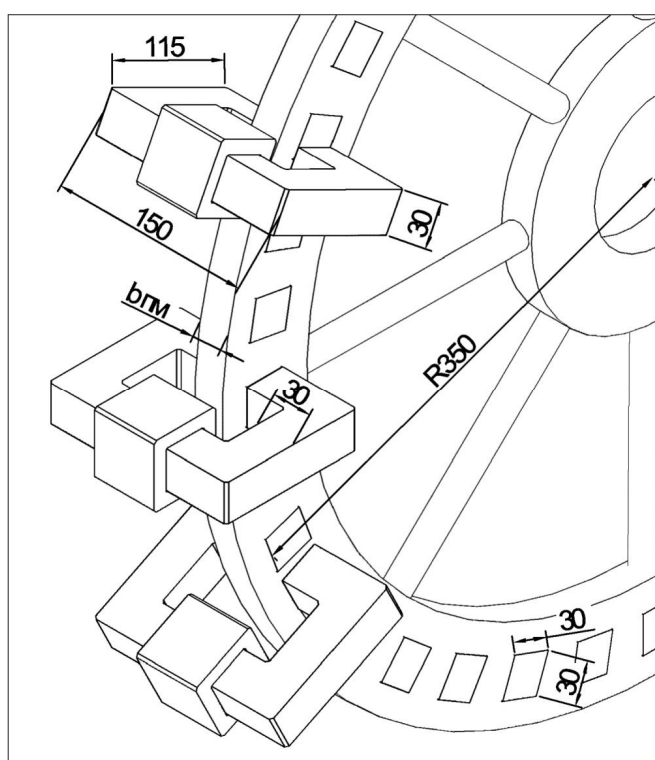


Рис. 2

Цель численных исследований – определение влияния аксиальной длины ротора, т.е. толщины постоянных магнитов  $b_{пм}$  на суммарный тормозной электромагнитный момент. Расчеты проводились для двух типов постоянных магнитов – ферритовых магнитов и редкоземельных на основе соединения Nd-Fe-B для лабораторной модели с диаметром ротора  $D = 700$  мм. Для ферритовых магнитов во всех расчетах коэрцитивная сила задавалась равной  $H_{св} = 220$  кА/м, магнитная проницаемость –  $\mu_m = 1,3$  и для неодимовых магнитов соответственно –  $H_{св} = 800$  кА/м,  $\mu_m = 1,05$ . Магнитопровод статора – сталь Ст2211 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали). Величина технологического зазора между ротором и статором составляет  $\delta = 0,5$  мм с каждой стороны ротора. 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 [5]. Плотность тока задана равной  $J_r = 5,0$  А/мм<sup>2</sup>, а коэффициент заполнения обмотки медью принят равным  $k_3 = 0,5$ . Моделирование магнитного поля и определение тормозного момента для трехфазной секции статора производилось в трехмерной постановке в программном комплексе COMSOL 3.5 (FEMLAB). На рис. 3 *a* показана расчетная модель одной из секций статора, а на рис. 3 *б* – картина распределения линий индукции. Для расчетной модели, представленной на рис. 3, толщина постоянных магнитов задавалась равной  $b_{пм} = 10$  мм, а материал постоянных магнитов – Nd-Fe-B. Зависимость тормозного электромагнитного момента, действующего при нагрузке на ротор, от угла поворота ротора при возбуждении трех секций статора вычислялась в диапазоне от оси *d* до оси *q*. Оси *d* соответствует точка устойчивого магнитного положения, в которой тормозной электромагнитный момент равен нулю, а оси *q* – точка неустойчивого магнитного положения, в которой момент также равен нулю. Для исследуемой модели этот диапазон равен  $10^\circ$ . Для удобства анализа зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора на рис. 4 *a* приведена в среднем диапазоне угла от  $\theta = 3,3^\circ$  до  $\theta = 6,6^\circ$ , т.е. величина среднего

зах *B* и *C* –  $i = 0,5 I_m$  и условно отрицательный [5]. Плотность тока задана равной  $J_r = 5,0$  А/мм<sup>2</sup>, а коэффициент заполнения обмотки медью принят равным  $k_3 = 0,5$ . Моделирование магнитного поля и определение тормозного момента для трехфазной секции статора производилось в трехмерной постановке в программном комплексе COMSOL 3.5 (FEMLAB). На рис. 3 *a* показана расчетная модель одной из секций статора, а на рис. 3 *б* – картина распределения линий индукции. Для расчетной модели, представленной на рис. 3, толщина постоянных магнитов задавалась равной  $b_{пм} = 10$  мм, а материал постоянных магнитов – Nd-Fe-B. Зависимость тормозного электромагнитного момента, действующего при нагрузке на ротор, от угла поворота ротора при возбуждении трех секций статора вычислялась в диапазоне от оси *d* до оси *q*. Оси *d* соответствует точка устойчивого магнитного положения, в которой тормозной электромагнитный момент равен нулю, а оси *q* – точка неустойчивого магнитного положения, в которой момент также равен нулю. Для исследуемой модели этот диапазон равен  $10^\circ$ . Для удобства анализа зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора на рис. 4 *a* приведена в среднем диапазоне угла от  $\theta = 3,3^\circ$  до  $\theta = 6,6^\circ$ , т.е. величина среднего

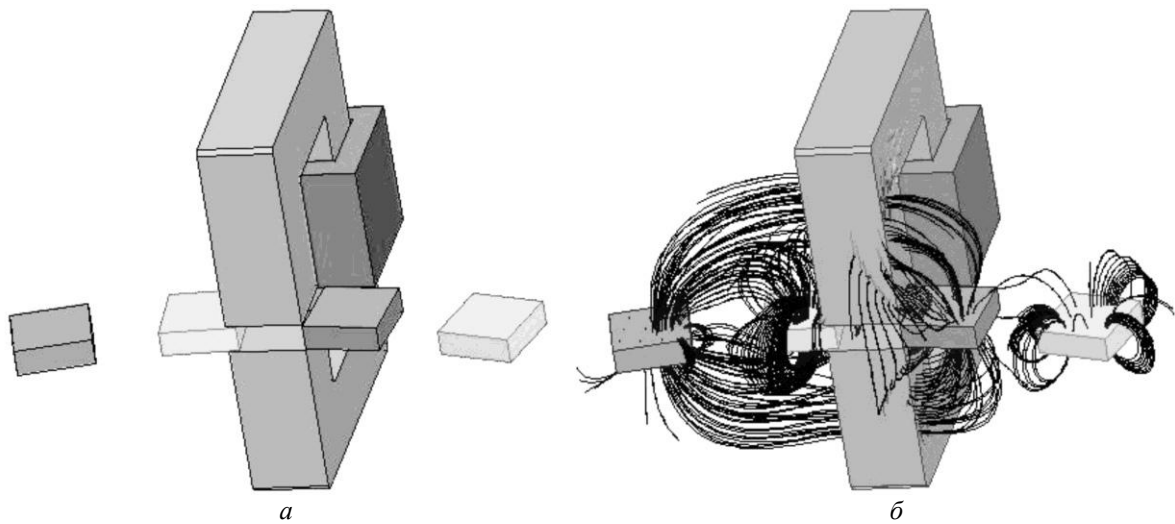


Рис. 3

диапазона равна  $\tau_{cp} = 10/3 = 3,3^\circ$ . Таким образом, результаты расчета тормозного электромагнитного момента иллюстрируют, что применение постоянных магнитов на основе соединения Nd-Fe-B позволяет получить примерно в 2,8 больший момент по сравнению с ферритовыми магнитами.

Средний электромагнитный момент, действующий при нагрузке на ротор электрогенератора, в пределах среднего диапазона определяется выражением

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

где  $\theta$  – угол поворота ротора;  $\tau_{cp}$  – величина среднего диапазона.

На рис. 4 б представлена зависимость среднего тормозного момента, действующего при нагрузке на ротор генератора, от толщины постоянных магнитов и их свойств (ферритовые магниты и на основе соединения, и Nd-Fe-B). Толщина постоянных магнитов варьировалась в диапазоне  $b_{пм} = 5 \dots 35$  мм.

Анализируя результаты расчета, приведенные на рис. 4 б, следует отметить, что для ферритовых магнитов величина среднего электромагнитного момента примерно в 2,6 раза меньше по сравнению с ниодимовыми во всем диапазоне изменения их толщины. Кроме того, при толщине магнитов  $b_{пм} \geq 20$  мм как для ферритовых, так и для ниодимовых магнитов наблюдается уменьшение среднего тормозного момента. Поэтому, исходя из конструктивных особенностей изготовления ротора, следует выбрать толщину ниодимовых магнитов,

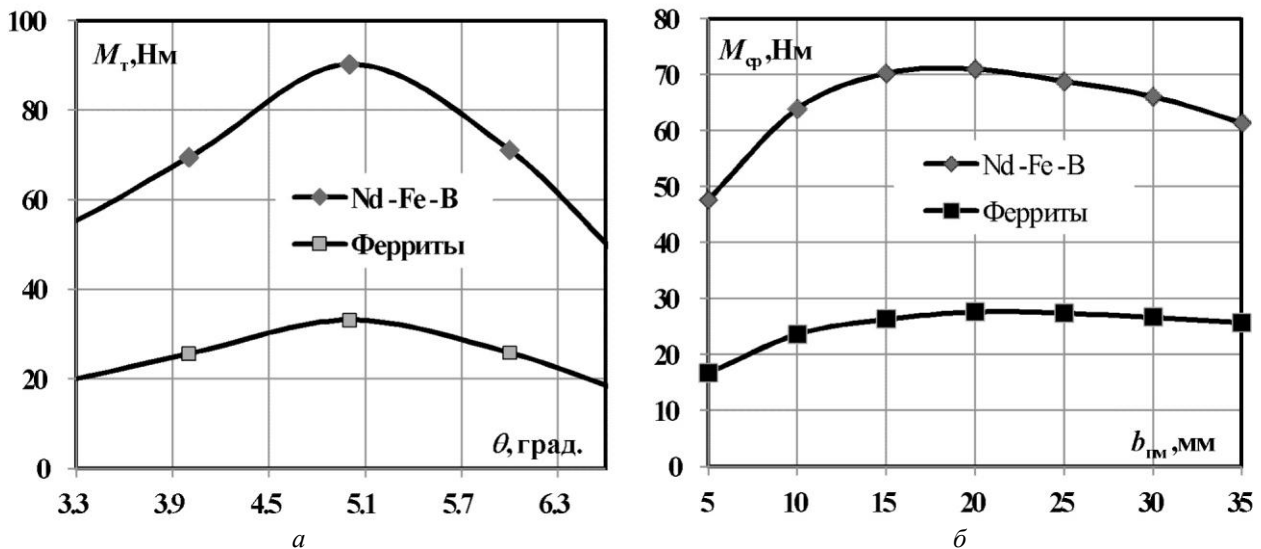


Рис. 4

равную  $b_{\text{пм}} = 10$  мм, и соответственно толщину ферритовых магнитов следует выбрать равной  $b_{\text{пм}} = 20$  мм.

Проектируемый электрогенератор должен обеспечивать расчетный момент во всем диапазоне скоростей ветра. Как правило, при проектировании ветроустановок максимальная скорость ветра принимается равной  $v_{\text{в}} = 12$  м/с. При большей скорости ветра ветроустановка должна стопориться во избежание поломки. Расчеты магнитного поля и тормозного момента выполнены для электрогенератора, диаметр ротора которого равен  $D = 0,7$  м. Однако эти результаты можно экстраполировать для электрогенераторов с большим диаметром ротора при условии равенства размеров статорных секций и размеров магнитов, равных  $30 \times 30$  мм. Тогда для диаметра ротора, равного  $D = 1,8$  м, тормозной электромагнитный момент необходимо пересчитать с коэффициентом увеличения радиуса, равным  $k = 2,64$ , а для диаметра ротора  $D = 2,2$  м – с коэффициентом  $k = 3,2$ .

В табл. 2 приведены основные результаты расчетов электрогенератора для различного диаметра ротора. Следует отметить, что, например, для обеспечения расчетного момента, равного  $M = 178$  Нм (при скорости ветра 12 м/с), для электрогенератора, имеющего диаметр ротора  $D = 0,7$  м, необходимо использовать три трехфазные секции с магнитами на основе Nd-Fe-B. Для обеспечения заданной мощности в случае использования ферритовых магнитов понадобилось бы семь трехфазных секций, однако такое количество секций физически не может быть размещено на роторе диаметром, равным  $D = 0,7$  м.

Например, следует учесть, что для Киевской области среднегодовая скорость ветра составляет  $V = 4,5$  м/с. Тогда электрогенератор с одной трехфазной секцией и ниодимовыми магнитами толщиной  $b_{\text{пм}} = 10$  мм и диаметром ротора  $D = 0,7$  м, имея расчетный момент, равный  $M_{\text{ср}} = 63,9$  Нм, способен обеспечить отбор мощности от ветроустановки при скорости ветра до  $v_{\text{в}} = 7$  м/с. При этой скорости ветра расчетная мощность ветроустановки согласно данным табл. 1 составляет  $M = 52,5$  Нм. Если для электрогенератора использовать две трехфазные секции из ферритовых магнитов толщиной  $b_{\text{пм}} = 20$  мм, то расчетный момент, равный  $M_{\text{ср}} = 55,2$  Нм, обеспечит отбор мощности при скорости ветра до  $v_{\text{в}} = 6$  м/с (при этой скорости ветра расчетная мощность ветроустановки составляет  $M = 45$  Нм). Таким образом, ферритовые постоянные магниты, стоящие на два порядка меньше ниодимовых, в определенном диапазоне скорости ветра могут быть использованы для электрогенератора данного типа.

Таблица 2

Диаметр ротора электрогенератора, м	0,7	1,8	2,2
Количество магнитов, шт	36	96	228
Расчетный момент трехфазной секции электрогенератора $M_{\text{ср}}$ , Нм (материал магнитов – Nd-Fe-B, их толщина – $b_{\text{пм}} = 10$ мм)	63,9	168,9	207,1
Расчетный момент трехфазной секции электрогенератора $M_{\text{ср}}$ , Нм (материал магнитов – феррит, их толщина – $b_{\text{пм}} = 20$ мм)	27,6	73,0	89,5
Расчетный момент ветроколеса $M$ , Нм при 12 м/с	178	601	1424
Количество трехфазных секций (материал магнитов – Nd-Fe-B, их толщина – $b_{\text{пм}} = 10$ мм)	3	4	7
Количество трехфазных секций (материал магнитов – феррит, их толщина – $b_{\text{пм}} = 20$ мм)	7	8	16

Приведенная методика расчета безредукторного ветроэлектрического генератора позволяет на стадии предварительного проектирования оценить основные размеры магнитной цепи и обосновать применение материалов постоянных магнитов. Окончательные решения по всем геометрическим и электромагнитным параметрам, размерам постоянных магнитов могут быть приняты только после полного расчета электрогенератора и его характеристик, а также теплового расчета при номинальной нагрузке.

1. Гребеников В.В. Электрогенераторы с постоянными магнитами для ветроустановок и микроГЭС // Гідроенергетика України. – 2011. – № 1. – С. 43–48.
2. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветроэлектрогенераторы: Учеб. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.

3. *Трегуб М.І.* Безредукторна вітроенергетична установка / Д. п. кор. мод. №32851, МПК F03D 1/00; Заявл. 19.03. 2007; Опубл. 10.06.2008. Бюл. № 11.
4. *Фатеев Е.М.* Ветродвиатели и ветроустановки – М.: Сельхозиздат, 1957. – 536 с.
5. *Шефтер Я.И.* Использование энергии ветра. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 193 с.

УДК 620.92, 621.13

**М.І. Трегуб<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **В.В. Гребеніков<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, **М.В. Приймак<sup>3</sup>**, інж.

1 – Білоцерківський нац. аграрний ун-т,  
пл. Соборна, 8/1, Біла Церква, 09116, Україна

2, 3 – Ін-т електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Обґрунтування типів та параметрів електрогенераторів для безредукторних вітроелектричних установок**

*Розглянуто основні принципи визначення типу та методи розрахунку електрогенераторів безредукторних вітроелектричних установок для ефективного використання низькопотенційних вітрів у сільськогосподарському виробництві, а також для замських будинків. Бібл. 5, рис. 4, табл. 2.*

**Ключові слова:** магнітоелектричний аксіальний генератор, постійні магніти, електромагнітний момент, індукція магнітного поля.

**M.I. Tregub<sup>1</sup>, V.V. Hrebenikov<sup>2</sup>, M.V. Pryimak<sup>3</sup>**

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

2, 3 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,  
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Substantiation of types and parameters of electrical generators for gearless wind-electric sets**

*The main principles of determination of type and methods of calculation of electrical generators for gearless wind-electric sets for effective usage of low speed winds in agricultural production and for willage houses are examined in article. References 5, figures 4, tables 2.*

**Key words:** magnetically electrical axial generator, permanent magnets, electromagnetic torque, induction of magnetic field.

Надійшла 17.02.2012

Received 17.02.2012