

УДК 621.313

## ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ТИПА АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЬЦЕОБРАЗНОГО РОТОРА ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

*Н.И. Трегуб*

Заключение совета рецензентов: 14.10.13 Заключение совета экспертов: 15.10.13 Принято к публикации: 16.10.13

Белоцерковский национальный аграрный университет  
Пл. Соборная 8/1, г. Белая Церковь, 09117, Украина  
Тел.: (04563) 331196, e-mail: tregyb.m.i@gmail.com

На основании теоретического анализа аэродинамических условий работы горизонтально-осевого ветродвигателя сформулированы принципы определения геометрических параметров и типа активных элементов кольцеобразного ротора дугостаторного генератора безредукторной ветроэлектрической установки.

Ключевые слова: аэродинамическая эффективность, кольцеобразный ротор, ветроэлектрический генератор, преобразование вихревого потока.

## GROUNDS FOR GEOMETRICAL PARAMETERS AND TYPE OF RING-SHAPE ROTOR OF WIND POWER GENERATOR

*M.I. Tregub*

Referred 14.10.13 Expertise: 15.10.13 Accepted: 16.10.13

Bila Tserkva National Agrarian University  
8/1 Soborna Sq., Bila Tserkva, 09117, Ukraine  
Tel.: (04563) 331196, e-mail: tregyb.m.i@gmail.com

Principles of defining geometrical parameters and types of active elements of ring-shape rotor of arch-shape generator of gearless wind power generator are stated under theoretical analysis of air dynamics working conditions.

Keywords: aerodynamic efficiency, annular rotor, wind electric generator, vortex flow change.

*Николай Илларионович Трегуб*

**Сведения об авторе:** кандидат технических наук, доцент кафедры механизации и электрификации сельскохозяйственного производства.

**Область научных интересов:** ветроэлектрические генераторы.

**Публикации:** 85.

### Актуальность

Одним из путей создания безредукторной ветроэлектрической установки есть разработка дугостаторного электрогенератора с кольцеобразным ротором большого диаметра, что позволяет [1] достигать более высоких линейных скоростей его активных элементов без потерь энергии в механизмах мультипликации. Однако кольцеобразный ротор, установленный коаксиально на ометаемой площади ветродвигателя, может при определенных его размерах и форме оказывать существенное влияние на общие показатели аэродинамической эффективности. Поэтому необходимо определить условия удовлетворения основных требований, которые принципиально

позволяют сохранять наиболее высокие показатели аэродинамической эффективности одновременно с минимальными потерями в системе электромеханического преобразования энергии ветра.

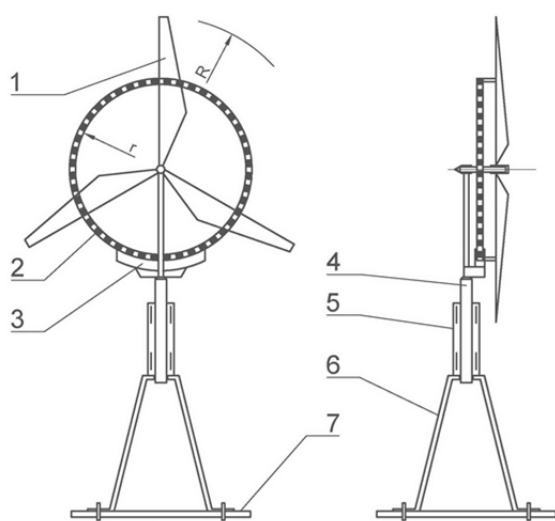
### Состояние вопроса

Общая идея кольцеобразной конструкции ротора генератора ветроэлектрической установки крыльчатого типа известна довольно давно, например [2]. Однако рассматривались различные варианты конструкций, техническая реализация которых на определенных уровнях развития техники и технологий была весьма сложной. Известны также примеры решения отдельных технических задач,

например, усовершенствование аэромеханической системы безредукторной электромеханической ветроустановки [3] или разработка магнито-электрического дугостаторного генератора [4]. Но вопросы обоснования одновременно эффективного аэродинамического профиля кольцеобразного ротора и при этом определение наиболее приемлемого типа бесконтактного электрогенератора требуют дальнейшего изучения.

### Результаты исследований

Была предложена [1] конструкция безредукторной ветроэнергетической установки (ВЭУ), выполненной по следующей конструктивной схеме (рис. 1).

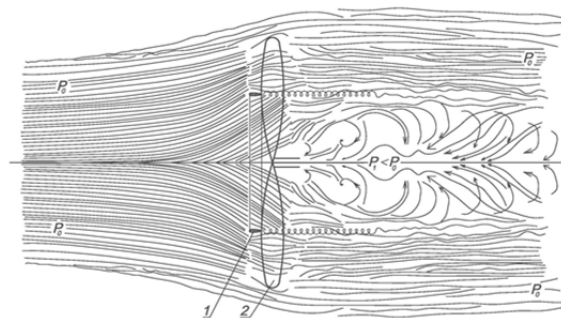


**Рис. 1.** Общая конструктивная схема безредукторной ВЭУ с кольцеобразным ротором, установленным коаксиально на лопастях ветродвигателя: 1 – лопасть; 2 – кольцевой ротор; 3 – дуговой статор; 4 – поворотная мачта; 5 – ступица поворотной мачты; 6 – опора; 7 – основание; R – радиус вращения концов лопастей; r – радиус кольцевого ротора  
**Fig. 1.** General functional scheme of gearless WEU with ring rotor settled coaxially on the wind motor blades  
 1 – blades, 2 – ring rotor, 3 – arc stator, 4 – turning stick, 5 – turning stick hub, 6 – support, 7 – base,  
 R – radius of blades ends turning, r – radius of ring rotor

Очевидными преимуществами представленной на рисунке конструктивной схемы можно считать отсутствие на оси гондолы генератора и, вследствие этого, уменьшение осевого затенения ветрового потока, а также техническую возможность использования кольцеобразного ротора в качестве инерционного аккумулятора энергии для уменьшения влияния неравномерности мгновенных скоростей ветра. Кроме того, соединение лопастей с корпусом кольцевого ротора существенно повышает их механическую прочность по сравнению с традиционным одноточечным консольным креплением, что позволяет выполнять их более тонкими с лучшим аэродинамическим качеством.

Влияние кольцеобразного ротора на общую аэродинамическую картину ветрового потока, проходящего через плоскость вращения лопастей, можно представить схематической моделью, описывающей известный механизм образования осевого вихревого движения ветра за ометаемой плоскостью ветродвигателя (рис. 2). Представленная картина построена аналитически на основании известных в аэродинамике [5] математических моделей образования вихревых движений воздуха.

Вероятнее всего профиль корпуса кольцевого ротора будет создавать коаксиальный вихревой след, концентрический относительно осевого вихря с квазисинхронной скоростью вращения, что должно увеличивать общее торможение воздушного потока. Однако это увеличение при определенных геометрических размерах и форме аэродинамического профиля кольцевого корпуса может оказаться меньше, чем при установке гондолы генератора на оси ветродвигателя.



**Рис. 2.** Схематическое изображение вероятной картины направлений движения ветрового потока, проходящего через ометаемую плоскость ветродвигателя с кольцеобразным ротором: 1 – профиль кольцеобразного корпуса ротора; 2 – лопасти;  $P_0$  – давление окружающего ветрового потока;  $P_1$  – локальное давление в центре осевого вихревого канала  
**Fig. 2.** Schematic picture of possible picture of wind flow mowing directions: 1 – profile of rotor ring corpus, 2 – blades,  $P_0$  – surrounding wind flow pressure,  $P_1$  – local pressure in the center of axial wind channel

С учетом определенных условий можно считать, что давление окружающего ветродвигатель воздушного пространства на значительном расстоянии от центра осевого вихря везде одинаково и равно  $P_0$ , а разность давлений, вызванная наличием вихревого движения, согласно [5] определяется выражением:

$$P_0 - P = \int_{\infty}^r \frac{\rho v^2}{r} dr, \quad (1)$$

где  $P_0$  – свободное давление окружающего воздушного пространства;  $P$  – переменное давление, изменяющееся по мере приближения к центру вихря,  $\rho$  – плотность воздуха;  $v^2/r$  – центростремительное ускорение вихревого движения воздуха на

расстоянии  $г$  от центра вихря;  $v$  – окружная скорость вихревого движения воздушного слоя;  $r$  – радиус-вектор вращения вихревого слоя относительно центра вихревого канала.

Анализ этого выражения показывает, что давление уменьшается монотонно по мере приближения из отдаленного пространства к центру осевого вихря. Из решения уравнения (1) видно, что за пределами вихревого потока, когда расстояние от центра  $r$  превышает радиальный размер  $\alpha$  вихря ( $r \geq \alpha$ ) при постоянной плотности воздушной среды изменение давления описывается известной [5] зависимостью:

$$P = P_0 - \frac{\rho\omega^2\alpha^2}{2r^2}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вихревого движения,  $\alpha$  – радиальный размер вихря.

Непосредственно в середине вихревого потока воздуха, когда  $r \leq \alpha$ , аналогично законам вихревого движения идеального газа, давление должно изменяться в зависимости от положения в пространстве относительно центра оси вихря, согласно известному [5] выражению:

$$P = P_0 - \rho\omega^2\alpha^2 + 0,5\rho\omega^2r^2, \quad (3)$$

Минимальное давление в центре осевого вихря, при условии  $r = 0$ , аналогично модели для идеальной несжимаемой жидкости [5] определяется зависимостью:

$$P_{\min} = P_0 - \rho\omega^2\alpha^2 \quad (4)$$

Значение минимального давления в центре осевого вихря при постоянной плотности воздуха на основании выражения (4) зависит одновременно от радиальных размеров вихря и угловой скорости вихревого движения, причем одинаково весомо от квадратов этих параметров. При установке на оси гондолы генератора минимальное давление дополнительно возникает также вследствие ветрового затенения непосредственно за ее корпусом, где начинается центральный канал осевого вихря. При отсутствии гондолы воздушный поток, засасываемый вихревым каналом, проходит более свободно через осевое пространство кольцевого ротора, увеличивая общую пропускную способность ометаемой площади ветродвигателя.

Таким образом, градиент давления в центре осевого вихря будет направлен преимущественно назад от плоскости вращения лопастей, что всегда вызывает [5] обратные встречные воздушные потоки, то есть противоположные направлению ветра перед ометаемой плоскостью ветродвигателя, увеличивая общее аэродинамическое сопротивление вязкостного характера, что и показано на рис. 2.

Действительная картина вихревого движения за плоскостью вращения лопастей, конечно, намного сложнее, поскольку выделяют [6] как минимум три основных группы одновременных вихрей: *геликоидного*, от винтового характера движения лопастей; *циркуляционного*, вследствие обтекания неодинаковых передней и задней поверхностей каждой лопасти, а также упоминаемого *осевого* вихря, возникающего вокруг горизонтальной осевой линии в результате закручивания ветрового потока с угловой скоростью вращения ветродвигателя. Однако даже этот сделанный упрощенный теоретический анализ влияния аэродинамического профиля кольцевого ротора на характер вихревого движения позволяет установить определенные общие закономерности выполнения геометрической формы кольцевого ротора. Если одновременно с условиями минимализации аэродинамического профиля учитывать ограничения электромагнитной системы генератора, которые известны из теоретических принципов проектирования бесконтактных электрических машин [7], то можно сформулировать следующие консолидированные требования к выполнению размеров и геометрической формы электромагнитно активных элементов кольцевого ротора:

- электромагнитно активные детали кольцевого ротора должны иметь вытянутую в аксиальном направлении обтекаемую форму профиля с минимально возможным радиальным сечением, ограниченным только условиями механической прочности и расчетными радиальными размерами полюсов;

- максимальное количество полюсов кольцевого ротора выполняется за счет большого его диаметра и минимальной ширины сегментного полюсного деления в пределах возможностей размещения обмоток статора и допустимых межполюсных потоков рассеяния;

- минимальная длина роторного участка элементарной магнитной цепи генератора достигается при обеспечении неизменного прямолинейного направления магнитного потока между полюсными выступами магнитопровода статора через воздушный зазор и активное звено ротора.

Перечисленные требования определяют общие черты геометрической конфигурации магнитопровода дугового статора и формы активных деталей кольцеобразного ротора для различных типов бесконтактных электрогенераторов. В свою очередь общие принципы выбора типа электромагнитно активных деталей кольцевого ротора можно сформулировать, анализируя известные [7] показатели надежности, энергетической эффективности и простоты конструкции различных типов бесконтактных электрических машин. Эти принципы установлены на основании выполнения следующих наиболее очевидных требований к

электромагнитно активным деталям кольцевого ротора:

- отсутствие на роторе вращающихся обмоток и полупроводников;
- минимальные расходы дорогостоящих магнитных материалов;
- возможность выполнения необходимого аэродинамического профиля;
- устойчивость к механическим повреждениям и атмосферным воздействиям;
- минимальные масса и габариты.

На основании даже этих ограниченных очевидных требований наиболее удовлетворяющим будет индукторный тип активных деталей кольцевого ротора, например, предложенной [8] конструкции. Активным элементом кольцевого ротора такого индукторного генератора является дискретно установленный на диэлектрической части корпуса пакет электротехнической стали. Учитывая наличие в современной номенклатуре химически устойчивых марок электротехнической стали, можно считать такой вариант вполне приемлемым с точки зрения его технической реализации.

#### Список литературы

1. Пат. кор. мод. UA, №32851, F 03D 1/00. Безредукторна вітроенергетична установка / Трегуб М.І. // Заявл. 19.03.2007. Оpubл. 10.06.2008. Бюл. №11.
2. Ляхтер В.М. Что может дать энергия ветра // Наука в СССР. 1991. № 1. С. 58-65.
3. Пат. кор. мод. UA, №79610, F 03D 1/00. Безредукторна електромеханічна вітроустановка / Трегуб М.І., Василенко О.С. // Заявл. 12.11.2012. Оpubл. 25.04.2013. Бюл. №8.
4. Трегуб Н.И., Гребеников В.В., Прыймак М.В. Обоснование типов и параметров электрогенераторов для безредукторных ветроэлектрических установок // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць. 2012. Вип. 31. К. С. 67-73.
5. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 2. М.: Наука. 1970.
6. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Харьков. нац. аэрокосм. ун-т. «Харьк. авиац. ин-т.». Кн. 2. Ветроэнергетика / Учебник. Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т. 2004.
7. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. М.: Высш. шк. 1990.
8. Пат. №101118 UA, МПК H02K19/20, H02K21/38. Индукторный аксиальный генератор / Трегуб М.І., Козирський В.В. // Заявл. 27.01.2012. Оpubл. 25.02.2013. Бюл. №4.

#### Заклучение

1. Кольцеобразная конструкция ротора ветроэлектрического генератора позволяет достигать более высоких линейных скоростей его активных деталей без потерь в механизмах мультипликации, уменьшить влияние неравномерности мгновенных скоростей ветра и повысить общую прочность лопастей.

2. Установка кольцевого ротора на ометаемой поверхности ветродвигателя требует выполнения его с минимальным аэродинамическим аксиальным профилем с ограничениями механической прочности и минимальных потерь электромеханического преобразования энергии ветра.

3. В наибольшей степени удовлетворяются требования к активным деталям кольцевого ротора при индукторном типе дугостаторного генератора с дискретно установленными пакетами электротехнической стали.

#### References

1. Pat. kor. mod. UA, №32851, F 03D 1/00. Bezreduktorna vitroenergetična ustanovka / Tregub M.I. // Zaâvl. 19.03.2007. Opubl. 10.06.2008. Bûl. №11.
2. Lâhter V.M. Čto moţet dat' ènergiâ vetra // Nauka v SSSR. 1991. № 1. S. 58-65.
3. Pat. kor. mod. UA, №79610, F 03D 1/00. Bezreduktorna elektromehanična vitroustanovka / Tregub M.I., Vasilenko O.S. // Zaâvl. 12.11.2012. Opubl. 25.04.2013. Bûl. №8.
4. Tregub N.I., Grebenikov V.V., Pryjmak M.V. Obosnovanie tipov i parametrov èlektrogeneratorov dlâ bezreduktornyh vetroèlektričeskikh ustanovok // Praci Institutu elektrodinamiki Nacional'noï akademii nauk Ukraïni. Zbirnik naukovih prac'. 2012. Vip. 31. K. S. 67-73.
5. Sedov L.I. Mehanika splošnoj sredy. Tom 2. M.: Nauka. 1970.
6. Krivcov V.S., Olejnikov A.M., Âkovlev A.I. Neisčerpaemaâ ènergiâ. Har'kov. nac. aèrokosm. un-t. «Har'k. aviac. in-t.». Kn. 2. Vetroènergetika / Učebnik. Sevastopol': Sevast. nac. tehn. un-t. 2004.
7. But D.A. Beskontaktnye èlektričeskie mašiny. M.: Vysš. šk. 1990.
8. Pat. №101118 UA, МПК H02K19/20, H02K21/38. Induktornij aksial'nij generator / Tregub M.I., Kozir'skij V.V. // Zaâvl. 27.01.2012. Opubl. 25.02.2013. Bûl. №4.

Транслитерация по ISO 9:1995

