

МИНИМИЗАЦИЯ СТОИМОСТИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ РОТОРОМ

Анисимов В.К.

Институт энергетики АН Молдовы

Аннотация. Для ветродвигателей с вертикальным ротором исследована зависимость стоимости наиболее дорогих его частей от соотношения их размеров (высоты и диаметра). Получены формулы, позволяющие определить оптимальную величину этого соотношения для различных вариантов исполнения ветродвигателя: с концентратором ветра или без него.

Ключевые слова: лопасти турбины, стенки концентратора.

DIMINUAREA COSTULUI INSTALAȚIEI EOLIENE CU ROTORUL VERTICAL

Institutul de Energetică a Moldovei

Anisimov V.

Rezumat. Pentru motoarele de vânt cu rotor vertical s-a cercetat dependența valorii unora dintre cele mai costisitoare piese și raportul dimensiunilor lor (înălțimii și diametrului). S-au obținut formule, ce permit determinarea mărimii optime a acestui raport pentru diverse variante de executare a motorului de vânt: cu concentrator de vânt sau fără el.

Cuvinte cheie: palele turbinei, pereții concentratorului.

DECREASING THE COST OF WIND TURBINE WITH VERTICALLY INSTALLED ROTOR WHEEL

Institute of Power Engineering of Republic of Moldova

Anisimov V.K.

Abstract . The cost dependence of the most expensive parts of the vertical rotor windmill and their sizes (height and diameter) was studied. The formulae were obtained allowing determining the optimum value of such dependence for different modifications of a windmill: with or without wind concentrator.

Key words: turbine blades, concentrator walls.

1. Введение

Использование возобновляемых источников энергии является одним из приоритетных направлений современной энергетики. На ранних стадиях развития технологии преобразования энергии возобновляемых источников экономические показатели не рассматривались в качестве значимых ограничивающих факторов. С усовершенствованием технологий, техники преобразования и роста доли установленной мощности этих видов источников в общей структуре энергопроизводства и доли энергии в балансе энергопотребления показатели энергоэффективности ВИЭ становятся определяющими и приобретают статус стратегических показателей. С 2001 г. США увеличила производство электроэнергии за счет ветра более чем на 300%. Это - новая промышленность и более чем 20% процентов электрической энергии в доле потребленной в стране [1]. Обеспечение высокой надежности и эффективности новых чистых источников энергии являются не только технической и технологической категориями, но и экономической.

Например, Президент США Дж. Буш определил в качестве стратегической проблемы развитие технологий, которые позволят произвести достаточные объемы чистой и возобновляемой энергии, и в то же самое время покажут миру, что США является хорошим защитником окружающей среды [2]. При этом необходимо решить ряд научных задач, в том числе следующие задачи:

- Разработка новых технологий производства надежных агрегатов и систем по преобразовании энергии возобновляемых источников, которые легко интегрируются в существующие системы производства, транспорта и распределения электрической энергии, и обеспечивают минимальные затраты при производстве чистой энергии.
- Научная поддержка процесса технологического трансфера результатов научных исследований в новые образцы оборудования, технологий способов эффективного их использования.

Не только технические [3-9], но и экономические аспекты получают все более весомое звучание в стратегических программах продвижения ВИЭ, в том числе для компонент по преобразованию энергии ветра. Например, в программе развития ветроэнергетики США на период 2007-2012 гг. [1] в качестве стратегических указаны задачи, решение которых позволит улучшить эффективность, снизить стоимость обычных ветровых турбин и технологий их изготовления, причем это должно содействовать продвижению малых турбин работающих при низких скоростях ветра.

2. Некоторые особенности традиционных конструкций ветродвигателей

Самыми распространенными в настоящее время являются ветродвигатели с горизонтальной осью вращения. Для таких ветродвигателей имеется большой опыт эксплуатации и возможность построения ветродвигателей в большом диапазоне установленных мощностей: от ватт до нескольких мегаватт. Основным недостатком таких ветродвигателей является их чувствительность к качеству ветра. Им нужен ветер, у которого направление меняется медленно, а поток воздуха - ламинарный.

Ветродвигатели с вертикальной осью вращения мало чувствительны к качеству ветра, но обладают сравнительно низким коэффициентом преобразования кинетической энергии ветра. В силу малой чувствительности к направлению ветра они могут использоваться в местах с высокой турбулентностью ветрового потока, например в зонах застройки.

Для получения больших мощностей необходимо, чтобы при малых среднегодовых скоростей ветра ветротурбина имела большую ометаемую площадь. Но поскольку турбины должны выдерживать и большие, но кратковременные порывы ветра, то выполнение этого требования приводит к утяжелению конструкции и росту капитальных затрат. В итоге это влияет на стоимость энергии получаемой от ветра.

Задача настоящей работы состоит в разработке подхода по минимизации стоимости ветродвигателя с вертикальной осью вращения, которые смогут устойчиво работать при низких скоростях ветра, характерных для климатических условий Республики Молдова. Отметим, что такая формулировка задачи хорошо согласуется с сущностью задачи, определенной в качестве актуальной в Программе США по развитию ветроэнергетики.

3. Требования к ветродвигателю с вертикальной осью вращения турбины

На основе теории решения изобретательских задач можно сформулировать требования к предельно достижимому результату (вариант идеальной машины) для обеспечения конкурентоспособности ветроагрегатов, используемых для конверсии низкоскоростных турбулентных потоков ветра в механическую и/или электрическую энергию при минимальных значениях капитальных затрат. Эти требования могут иметь следующие формулировки:

1. Конструкция должна иметь большую ометаемую турбиной площадь для случая ветров с низкой скоростью;
2. Конструкция должна иметь маленькую площадь при ветре с большой скорости ветра;
3. Сам ветер должен плавно изменять величину этой площади (по мере увеличения его скорости площадь должна уменьшаться).
4. Объем капитальных затрат должен быть маленьким.

Сформулированные требования являются противоречивыми для заданного конструктивного исполнения ветроагрегата и для их удовлетворения в необходимо предложить новое конструктивное решение для ветроагрегата или некоторых его частей, которое снимет эти противоречия.

4. Решения, повышающие технические и экономические показатели турбин с вертикальной осью вращения.

Необходимость обеспечения механической устойчивости ветроагрегатов при порывах ветра приводит к увеличению их материалоемкости и стоимости, а также срока окупаемости. Это является следствием того, что вращающаяся турбина должна не только принимать и преобразовать энергию ветра, но и противостоять его избыточному напору, что обуславливает большие механические нагрузки на турбину. Решением вопроса может быть разделение функции между конструктивными элементами, а именно: одни элементы (лучше – неподвижные) должны противостоять избыточной силе ветра, а турбина только преобразовывать его энергию. Возможным техническим решением при такой постановке задачи может быть использование концентратора ветрового потока, что позволит уменьшить габариты ветровой турбины при той же развиваемой мощности (рис.1).

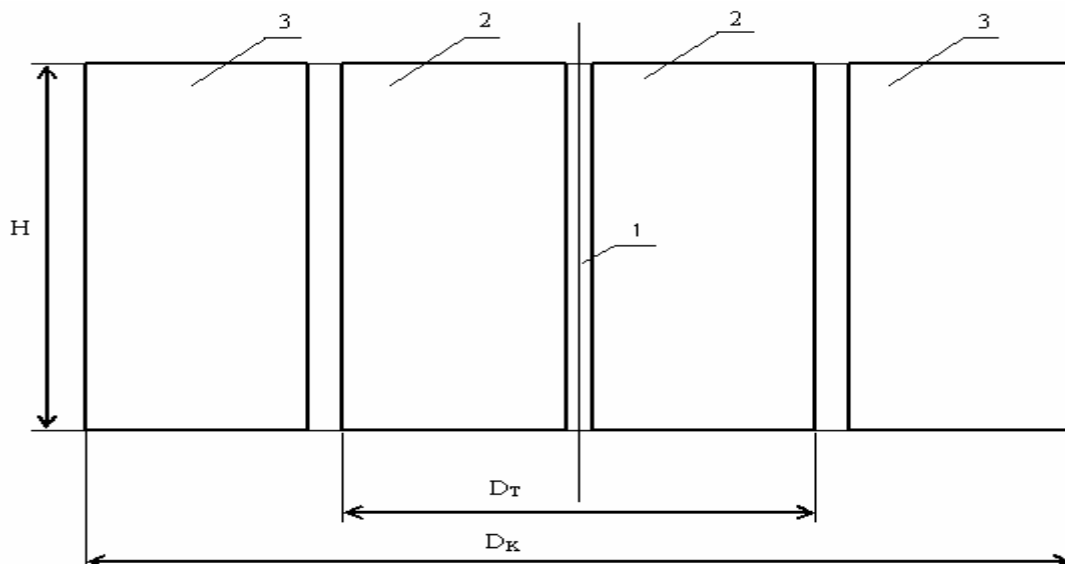


Рис.1. Взаимное расположение оси вращения (1), лопастей турбины (2) и стенок концентратора (3) ветродвигателя

Использование большого количества стенок концентратора (N) может привести к увеличению удельной материалоемкости и стоимости ветродвигателя. Поэтому актуальной задачей для ветроэнергетики является определение границ экономической

целесообразности использования концентраторов ветрового потока, а также и систем стабилизации частоты вращения ветродвигателя.

Повышение устойчивости к порывам ветра за счет явления самостабилизации частоты вращения и снижения ветрового напора на конструктивные элементы турбины может получено за счет введения специальных конструктивных элементов. В [8] предложено изменить конструкцию лопасти ветротурбины введением простого элемента - форточка с горизонтальной осью вращения по верхнему краю крепления. Введение таких элементов в лопастях турбины позволяет решить задачу автоматического изменения величины рабочей площади, следовательно, и адаптации параметров турбины к случайным характеристикам ветра при существенно более низких значениях динамических механических нагрузок.

Для определения условий экономической целесообразности применения концентратора ветрового потока проведем следующий анализ.

Диаметр турбины D_T вместе с высотой турбины H определяют величину рабочей площади приема энергии ветра:

$$S_T = 0,5D_T H , \quad (1)$$

так как вертикальная турбина принимает энергию ветра только той половиной, где лопасти движутся по направлению ветра. Введение концентратора потока, стенки которого направляют ветер на лопасти турбины, не просто увеличивает диаметр ветродвигателя с D_T до D_K (наружный диаметр концентратора), но и увеличивают рабочую площадь поверхности за счет улучшения использования ветрового потока:

$$S_K = D_K H . \quad (2)$$

Величина соотношения площадей рассматриваемых конструкций ветроагрегата определяется соотношением:

$$S_K / S_T = D_K / 0,5D_T . \quad (3)$$

Площадь приема энергии ветра входит в формулу для определения мощности ветродвигателя в первой степени. Предположим, что стоимость ветродвигателей в первом приближении пропорциональна их мощности. Исходя из такой гипотезы можем полагать, что в первом приближении соотношение рабочих площадей для приема ветра ветродвигателей практически равно соотношению их стоимостей:

$$S_K / S_T = D_K / 0,5D_T = C_B / C_T , \quad (4)$$

где C_B - стоимость ветродвигателя с концентратором ветра, а C_T - стоимость турбины.

Стоимость ветродвигателя включает стоимость концентратора и стоимость турбины

$$C_B = C_K + C_T \quad (5)$$

Разделив обе части этого равенства на стоимость турбины C_T , получаем

$$C_B / C_T = C_K / C_T + 1. \quad (6)$$

Подставляем значения из (4) в (6) и получаем пороговое условие для стоимости концентратора ветрового потока

$$C_K \leq C_T \left(\frac{D_K}{0,5D_T} - 1 \right). \quad (7)$$

Выполнение этого условия можно считать первым требованием к экономической целесообразности применения концентраторов ветрового потока в установках по приему энергии ветра. Если условие (7) выполняется, то для увеличения экономических показателей ветроустановки целесообразно использовать концентраторы ветрового потока, а если не выполняется, то экономически выгоднее будет установка без концентратора ветрового потока.

5. Влияние элементов крепления на стоимость турбины с вертикальным ротором вращения.

На стоимость ветродвигателя сильно влияет стоимость крепления листового материала в лопастях турбины и в стенках концентратора. При этом исходим из предположения, что значительная часть объема работы по изготовлению ветродвигателя приходится на долю деталей крепления и на процесс их крепления в интегрированную конструкцию.

С учетом данной гипотезы следует, что зависимость стоимости турбины от соотношения ее основных размеров - высоты H и диаметра D_T (коэффициент $K = H / D_T$) можно получить следующим образом.

Обозначим количество лопастей турбины буквой M , а погонную стоимость крепления листового материала - буквой C . Площадь листового материала определяется площадью сбора энергии ветра и количеством лопастей турбины, поэтому от величины K не зависит. Для упрощения определения стоимости крепления листового материала будем считать, что она пропорциональна длине периметра листа и ее удельное значение распределено равномерно по данному периметру. Площадь сечения турбины $S_T = HD_T$ при соотношении высоты к диаметру $K = H / D_T$. Тогда

$$D_T = \sqrt{\frac{S_T}{K}}, \text{ а } H = \sqrt{S_T K}. \quad (8)$$

Стоимость горизонтальных элементов крепления определяем как $C_T = CD_T M$, а вертикальных - $C_B = 2CHM$, а общая стоимость элементов крепления равна:

$$C = C_T + C_B = CM \sqrt{S_T} \left(\frac{1}{\sqrt{K}} + 2\sqrt{K} \right). \quad (9)$$

Для нахождения оптимальной величины $K_{опт}$, при которой стоимость C минимальна, дифференцируем уравнение (9) и приравняем полученное выражение для первой производной нулю:

$$CM\left(\frac{1}{\sqrt{K}} - \frac{1}{2K\sqrt{K}}\right)\sqrt{S} = 0 \quad (10)$$

Из уравнения (10) следует, что искомое значение переменной $K_{опт} = 0,5$. Это означает, что лопасти турбины должны быть квадратными, и величина $K_{опт}$ не зависит от их количества M . Этот результат можно было предвидеть, так как из планиметрии известно, что из всех прямоугольников квадрат имеет наименьшую длину периметра при той же площади.

Определим условия минимальной стоимости для элементов крепления турбины в случае, когда погонные стоимости креплений по горизонтали и вертикали не совпадают и отличаются коэффициентом b . При этих условиях оптимальное значение искомой величины равно $K_{опт} = b/2$, где $b = C_{г} / C_{в}$.

На рис.2 приведена зависимость стоимости элементов крепления от геометрии ветровой турбины с вертикальным ротором. Отметим, что этот график имеет пологий участок, в средней части которого и находится величина $K_{опт} = 0,5$. Именно это и позволяет широко использовать листовый материал стандартных размеров с минимальными потерями в стоимости.

Рассмотрим теперь общий случай, когда ветродвигатель содержит турбину и концентратор (оба - произвольного диаметра), причем не все стенки концентратора одинаковы, и погонные стоимости крепления (все четыре) отличаются друг от друга.

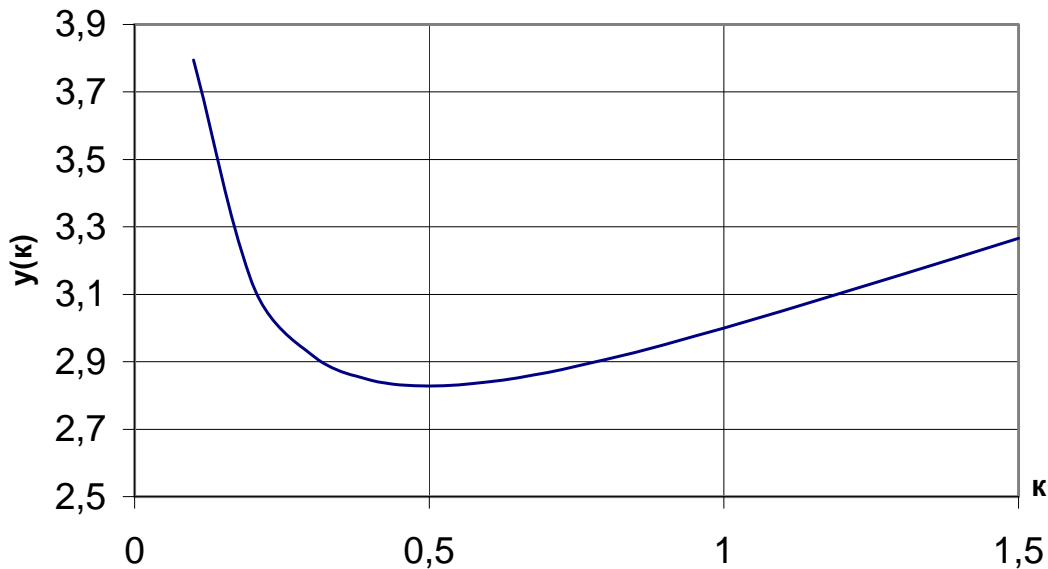


Рис.2. Зависимость относительной стоимости $y(k)$ элементов крепления в турбине от отношения высоты к диаметру k .

Введем следующие обозначения: C - погонная стоимость горизонтального крепления турбины; b_1C - погонная стоимость вертикального крепления; b_2C - погонная стоимость горизонтального элементов горизонтального крепления концентратора; b_3C - вертикальных элементов крепления; $a = D_T / D_K$ - отношение диаметров турбины и концентратора; M - количество лопастей турбины; N - общее количество стенок

концентратора; $N_K = (1-t)N$ - число коротких стенок; $N_D = tN$ количество длинных стенок, к которым крепится неподвижный вал турбины.

Стоимость крепления листов турбины C_T (с учетом формул (8)) помощью крепежных элементов складывается из стоимостей креплений по вертикали C_B и по горизонтали C_G :

$$C_T = C_B + C_G = 2b_1CM\sqrt{SK} + CMa\sqrt{\frac{S}{K}}. \quad (11)$$

Стоимость крепления листов концентратора C_K складывается из стоимостей элементов креплений по вертикали (они одинаковы для коротких и длинных стенок) и стоимостей элементов креплений по горизонтали (они зависят от размеров стенки) :

$$C_K = C_B + C_{ГК} + C_{ГД} = 2b_3CN\sqrt{SK} + (1-t)CNb_2(1-a)\sqrt{\frac{S}{K}} + b_2CtM\sqrt{\frac{S}{K}} \quad (12)$$

Общую стоимость C креплений листов турбины и концентратора удобно представить в виде:

$$C = A\sqrt{K} + \frac{B}{\sqrt{K}} \quad (13)$$

где : $A = 2C\sqrt{S}(b_1M + b_3N)$; $B = C\sqrt{S}[aM + b_2N(1-a+at)]$

Для определения оптимальной величины $K_{опт}$, при которой стоимость C минимальна, дифференцируем (13) и приравняем полученное выражение к нулю:

$$\frac{A}{2\sqrt{K}} - \frac{B}{2K\sqrt{K}} = 0 \quad (14)$$

Решение уравнения (14):

$$K_{опт} = \frac{B}{A} = 0,5 \frac{aM + b_2N(1-a+at)}{b_1M + b_3N} \quad (15)$$

Для величин $a = 0,5$, $M = 6$, $N = 11$, $t = 0,273$, и $b_1 = b_2 = b_3 = 1$, получаем:

$$K_{опт} = 0,59.$$

Выводы.

1. Стоимость концентратора не должна превышать стоимость турбины, так как только при этих условиях можно получить экономическую выгоду за счет снижения удельной материалоемкости ветродвигателя.
2. Ветродвигатели с одинаковой площадью сбора энергии ветра будут иметь разную стоимость в зависимости от соотношения высоты и диаметра турбины.

Чтобы стоимость ветродвигателя была минимальной, необходимо определить оптимальную величину этого соотношения.

Литература

1. Wind Energy Multiyear Program Plan for 2007–2012. USA.
2. President Bush Attends Washington International Renewable Energy Conference 2008 (WIREC 2008)/Washington Convention Center// Washington, D.C.
<http://www.whitehouse.gov/news/releases/2008/03/print/20080305.html>
3. Менблатов Б. Карусельный ветродвигатель. Авт. Свид. СССР 1008482, 03 3/06, опубл. 30.03.1983, Бюлл. Изобр. №12.
4. Меликсетов А. Ветродвигатель. . Авт. Свид. СССР № 408049, F 03 D 3/04, Опубл. 10.12.1973, Бюлл. Изобр. № 47.
5. Паволоцкий Ю. Ветродвигатель. Авт. Свид. СССР № 987160, F 03 D 3/04, Опубл. 07.01.1983, Бюлл. Изобр. № 1.
6. Чередниченко Ю. Ветродвигатель. Авт. Свид. СССР № 1268792, F 03 D 3/04, Опубл. 07.11.1986, Бюлл. Изобр. № 41.
7. Плотников П. Ветряной ротор. Патент № 2008515 , F 03 D 3/04, Опубл. 28.02.1994, Бюлл. Изобр. №
8. Берзан В. Анисимов В. Ветродвигатель с концентратором воздушного потока и турбиной с вертикальным ротором. Заявка на изобретение а 2006 0282 от 18.12.2006, по классу F 03 D 3/04.
9. Culinschii G. , . Culinschii I. , Pîcev A. Instalație energetică eoliană carusel. Brevet de invenție . MD 2531, F 03 D 3/00 2004.08.31., BOPI № 8/2004.

Информация об авторе.

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института энергетики АНМ. Область научных интересов – нетрадиционные источники энергии, холодный ядерный синтез, получение водорода. Автор 80 научных работ, в том числе 63 изобретений.