

УДК 621.313.39(476)

ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА (ВЭУ) ДЛЯ ОБЪЕКТОВ АПК

П. Ф. Богданович, В. С. Журко

УО «Гродненский государственный аграрный университет»,
г. Гродно, Республика Беларусь

(Поступила в редакцию 15.06.2015 г.)

Аннотация. *Особенностью вертикально-осевых ВЭУ, наиболее подходящих для использования на объектах АПК, является низкое расположение ветроколеса относительно земной поверхности, где ветровые воздушные потоки имеют явно выраженный турбулентный характер, и скорость ветра за короткие промежутки времени меняется в очень широких пределах. При этом мощность ветроколеса также будет колебаться в широких пределах. Задача стабилизации угловой скорости вращения ветроколеса решается путем использования маховика с нелинейным моментом инерции, обеспечивающим стабилизацию угловой скорости вращения ветроколеса с учетом энергетического спектра пульсаций скорости ветра в приземном слое атмосферы.*

Summary. *Feature of vertical-axis wind turbines are most suitable for use in agriculture, is the low position of the propeller relative to the earth's surface, where wind air flow are expressly turbulent nature of the wind speed for short intervals varies in very wide limits. The power of the propeller will also vary widely. The problem of stabilization of the angular velocity of rotation of the propeller is solved by the use of a flywheel with moment of inertia, to ensure stabilization of the angular velocity of rotation of the propeller taking into account the energy spectrum of the pulsations of the wind speed in the atmospheric surface layer.*

Введение. В Беларуси средняя скорость ветра на открытых участках равна 4 м/с и более, что свидетельствует о целесообразности развития ветроэнергетики. Наряду с этим для функционирования тихоходных ВЭУ необходимо обеспечить надежный пуск при малых рабочих скоростях ветра. Особенно важное значение это обстоятельство имеет для установок, снабженных инерционным накопителем энергии.

Цель работы: разработка конструкции ветроэнергетической установки, наиболее пригодной для использования на объектах АПК в климатических условиях Беларуси.

Материал и методика исследований. Использование ветроэнергетики – одно из быстро развивающихся направлений получения элект-

троэнергии за счет использования возобновляемых источников энергии. Уже в первой половине 2013 г. суммарная установленная мощность всех ВЭУ в мире составила около 300 ГВт [1]. Основную долю из этих установок (более 50%) составляют малые ВЭУ, с номинальной мощностью до 100 кВт и высотой башни ≤ 30 м. Анализ приведенных данных показывает, что наиболее распространенными являются малые ВЭУ с диаметром ветроколеса 2...25 м или с ометаемой площадью от 3,1 до 490 м².

В работах Богдановича П. Ф. и др. показана возможность стабилизации генерируемой электрической мощности и постоянства частоты генерируемого переменного тока путем стабилизации частоты вращения ветроколеса ВЭУ.

ВЭУ, описанная в [2], снабженная инерционным аккумулятором, обеспечивает снижение колебаний выходной мощности электрогенератора путем стабилизации скорости вращения ветроколеса и вращающего момента на его валу в условиях, когда ветер имеет порывистый характер. При этом скорость вращения электрогенератора остается стабильной и при быстропеременной нагрузке. Кроме того, за счет уменьшения коэффициента использования энергии ветра ветроколесом при нарастании средней скорости ветра существенно повышается ветроустойчивость всей конструкции ВЭУ. Недостатком данного устройства является затрудненный пуск при слабом ветре из-за наличия большого момента инерции маховика.

Улучшить пусковые характеристики вертикально-осевой ВЭУ возможно путем изменения конструкции инерционного аккумулятора. Решение этой задачи для ВЭУ малой мощности, у которой аккумулятор (маховик) соединен непосредственно с валом ветроколеса, можно сформулировать следующим образом.

Кинетическая энергия вращения, накопленная во вращающемся теле (маховике), может быть рассчитана по формуле:

$$E = 0,5 J \omega^2, \quad (1)$$

где J – момент инерции массы относительно оси вращения маховика, кг \times м²; ω (омега) – угловая скорость в радианах в секунду.

Очевидно, при частоте $\omega = \text{const}$ требуемый запас энергии E маховика будет полностью определяться моментом инерции J .

В свою очередь значение момента инерции для вращающихся тел существенно зависит от их формы. Так, для сплошного цилиндра массой m (см. рис. 1, а)

$$J = 0,5 \cdot m \cdot 1r_1^2. \quad (2)$$

Для полого цилиндра (Рис. 1, б) момент инерции

$$J=0,5 \cdot m (r_1^2 + r_2^2), \text{ кг} \times \text{м}^2, \quad (3)$$

где r_1 и r_2 – внешний и внутренний радиусы цилиндра.

Из рассмотрения выражений 1, 2 и 3 следует, что при одной и той же массе m маховик в виде полого цилиндра обладает большим моментом инерции и способен накапливать в $(r_1^2 + r_2^2)/r^2$ раз большее количество энергии по сравнению с маховиком, выполненным в виде сплошного цилиндра.

Однако применение маховика в виде полого цилиндра в качестве инерционного аккумулятора не решает задачу облегчения пуска ВЭУ по причине возрастания момента инерции также в $(r_1^2 + r_2^2)/r^2$ раз.

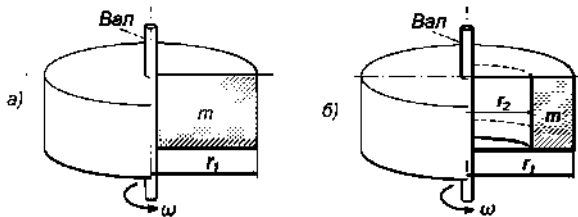


Рисунок 1

Для решения этой задачи предлагается использовать в качестве инерционного аккумулятора для вертикально-осевой ВЭУ маховик с нелинейной зависимостью момента инерции J от частоты вращения ω . Реализовать такой маховик возможно в виде полого тонкостенного корпуса цилиндрической формы, частично заполненного жидкостью (антифриз, минеральное масло и др. – рис. 2). В начале процесса раскручивания (рис. 2, а) момент инерции, определяемый массой тонкостенного корпуса маховика, будет иметь минимальное значение ($J_{\text{Мин}}$). При нарастании скорости вращения ω за счет наличия трения о стенки корпуса маховика жидкость массой m будет также вовлекаться во вращательное движение. При достижении всей массой m жидкости рабочей угловой скорости вращения ω_p момент инерции достигнет максимального значения ($J_{\text{Макс}}$). Жидкость при этом будет распределена у внешней цилиндрической поверхности корпуса маховика в виде полого цилиндра (рис. 2, б).

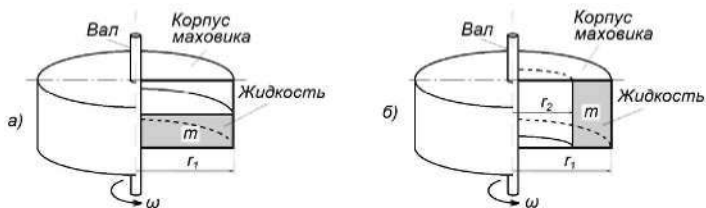


Рисунок 2

Начальное значение момента инерции ($J_{МИН}$) можно определить согласно выражению, справедливому для тонкостенного цилиндра [3]:

$$J_{МИН} = m_{КМ} r_1^2, \quad (4)$$

где $m_{КМ}$ – масса корпуса маховика.

Если принять $m_{КМ} \approx 50$ кг и $r_1 = 1$ м, то получим минимальное значение момента инерции $J_{МИН} \approx 50$ кг \times м².

Максимальное значение момента инерции будет определяться соотношением 1:3. При $r_1 = 1$ м и $r_2 = 0.8$ м для условий ВЭУ, описанной в [2], масса m жидкости составит 773 кг. Тогда, согласно (3)

$$J_{МАКС} = 633.86 \approx 684 \text{ кг}\times\text{м}^2.$$

Соотношение $J_{МАКС} / J_{МИН} = 633.86 / 50 \approx 12.7$. Значит, в процессе зарядки инерционного аккумулятора его момент инерции будет изменяться более чем в 12 раз. Это обстоятельство позволяет утверждать, что с помощью использования маховика с переменным моментом инерции задачу облегчения пуска ВЭУ можно успешно решить.

Наряду с этим, из-за малого трения между жидкостью и стенками корпуса маховика, следует ожидать большего времени зарядки такого аккумулятора. Улучшить этот показатель можно путем оборудования корпуса маховика перегородками, установленными вертикально с внутренней стороны цилиндрической стенки. Такое решение использовано в вертикально-осевой ВЭУ, приведенной на рис. 3.

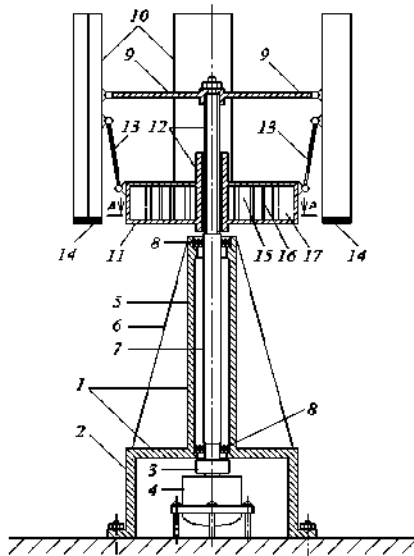


Рисунок 3

ВЭУ содержит основание 1, выполненное в виде корпуса 2, внутри которого помещены планетарный редуктор 3 с электрогенератором 4, стойка 5, с ребрами жесткости 6, вертикальный вал 7, два радиально-упорных подшипника 8, закрепленные на валу радиальные траверсы 9, шарнирно закрепленные на концах траверс вертикальные лопасти 10, маховик 11, шлицевое соединение 12, обеспечивающее вертикальное перемещение маховика вдоль вала, тяги 13, шарнирно связывающие маховик с лопастями, которые имеют возможность углового отклонения в вертикальной плоскости относительно вала 7, противовесы 14, закрепленные на нижних концах лопастей. Электрогенератор 4 через планетарный редуктор 3 кинематически связан с нижним концом вертикального вала 7, а маховик 11 (рис. 4) дополнительно содержит внутреннюю полость 15, снабженную ребрами 16, установленными по ее периметру вертикально относительно плоскости вращения маховика и частично заполненную незамерзающей жидкостью 17.

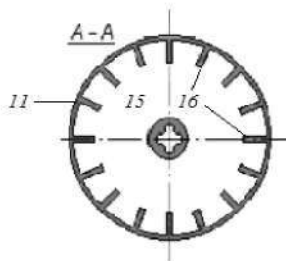


Рисунок 4

ВЭУ работает следующим образом. В исходном положении при отсутствии ветра ветроколесо неподвижно, а лопасти 10 расположены вертикально. В диапазоне рабочих скоростей ветра, начиная с некоторого минимального значения скорости ветра, ВЭУ при отсутствии нагрузки у потребителя самозапускается. При этом лопасти 10 начинают под действием ветра двигаться по окружности постепенно ускоряя свое движение. Возможен также и принудительный запуск. Лопасти 10 через траверсы 9 приводят во вращение вал 7, связанный с ним маховик 11, редуктор 3 и электрогенератор 4. При нарастании угловой частоты вращения маховика, объем жидкости 17 будет вступать во вращательное движение постепенно, оказывая нарастающее сопротивление вращению.

При этом момент инерции маховика будет изменяться от минимального значения до максимального также постепенно, что существенно облегчает самозапуск ВЭУ. Кинетическая энергия всей системы вращающихся элементов установки будет плавно нарастать до некоторого значения, соответствующего средней скорости ветра. При этом кинетическая энергия маховика 11 будет тем больше, чем дальше от центра вращения в полости 15 будет находиться жидкость 17. При достижении рабочей скорости вращения ветроколеса жидкость в полости маховика распределится в области ее периметра, где расположены ребра 16. Наличие этих ребер в полости 15, создающих сопротивление перетеканию жидкости 17, будет препятствовать изменению момента инерции маховика 11 на больших скоростях его вращения. Колебания скорости вращения ветроколеса при быстрых изменениях рабочей скорости ветра будут сглаживаться в основном за счет инерции маховика 11 и, в меньшей степени, за счет инерции остальных вращающихся элементов ВЭУ. Когда частота вращения электрогенератора превысит некоторую минимальную величину, включается потребитель, получающий от него электроэнергию.

Так как лопасти 10 участвуют во вращательном движении, то на противовесы 14, закрепленные на нижних концах лопастей, будут дей-

ствовать центробежные силы, направленные от вала 7 и стремящиеся отклонить лопасти от вертикального положения. Удержание лопастей в вертикальном положении обеспечивается за счет веса маховика, приложенного к ним через тяги 13. Вес маховика и масса противовесов лопастей выбирается так, что если средняя скорость ветра не превышает некоторое расчетное значение, то лопасти 10 находятся в вертикальном положении и ВЭУ работает с максимально возможным для ее конструкции коэффициентом использования энергии ветра. Угловая частота вращения вертикального вала и маховика также будет иметь расчетное значение. Электрогенератор также будет отдавать потребителю расчетную мощность.

Если средняя скорость ветра будет возрастать и превысит расчетное значение, тогда угловая частота вращения вращающихся элементов ВЭУ также будет возрастать и превысит расчетное значение. Под действием центробежных сил противовесов 14 лопасти 10 начнут отклоняться от вертикального положения на некоторый угол. Отклонение лопастей передается через тяги 13 на маховик и вызовет его перемещение вдоль вертикального вала по шлицевому соединению 12 вверх. Отклонение лопастей от вертикального положения вызывает уменьшение коэффициента использования энергии ветра ветроколесом. Мощность ветроколеса снизится и увеличение угловой частоты вращения прекратится. Таким путем осуществляется стабилизация частоты вращения ветроколеса при изменении средней скорости ветра.

Выполненная в мобильном варианте данная ВЭУ может использоваться в комплексе с передвижным гелиоводонагревателем для автономного обеспечения тепловой и электрической энергией сельскохозяйственных объектов, удаленных от коммуникаций, таких как пастбищная доильная установка, полевой стан, жилое здание и др. подобных объектов.

Результаты исследований и их обсуждение. Учитывая, что среднегодовая скорость ветра на территории Республики Беларусь невысокая (1,7-3,5 м/с), возникает потребность использования для нужд предприятий АПК тихоходных ВЭУ, способных эффективно работать при скорости ветра от 2,0 м/с. Оборудованные инерционным аккумулятором такие ВЭУ не требуют ориентации на ветер, надежны и просты в обслуживании, обеспечивают снижение колебаний выходной мощности электрогенератора за счет стабилизации скорости вращения ветроколеса и вращающего момента на его валу в условиях, когда ветер имеет порывистый характер.

За счет регулирования коэффициента использования энергии ветра ветроколесом при нарастании средней скорости ветра, существенно

повышается ветроустойчивость всей конструкции ВЭУ и расширяется диапазон рабочих скоростей ветра.

Использование в качестве инерционного аккумулятора маховика с изменяемым моментом инерции облегчает самозапуск ВЭУ при минимальной рабочей скорости ветра.

Предлагаемая ВЭУ обладает новизной (получен патент РФ на полезную модель № 10466). В ней за счет наличия у маховика полости, снабженной ребрами, вертикально установленными по ее периметру относительно плоскости вращения маховика и частично заполненной незамерзающей жидкостью, обеспечиваются легкие условия самозапуска и снижение колебаний выходной мощности электрогенератора путем стабилизации скорости вращения ветроколеса и вращающего момента на его валу в условиях, когда ветер имеет порывистый характер. При этом скорость вращения электрогенератора будет стабильной и при быстропеременной нагрузке. Кроме того, за счет уменьшения коэффициента использования энергии ветра ветроколесом при нарастании средней скорости ветра существенно повышается ветроустойчивость всей конструкции ВЭУ и расширяется диапазон рабочих скоростей ветра.

Заключение. На основе полученных результатов можно утверждать следующее:

1. При использовании в качестве инерционного аккумулятора маховика с изменяемым моментом инерции облегчается самозапуск ВЭУ при минимальной рабочей скорости ветра.

2. В предлагаемой ВЭУ обеспечивается ветроустойчивость всей конструкции и расширяется диапазон рабочих скоростей ветра. Это обстоятельство расширяет возможности ее использования в качестве источника электрической энергии как в стационарном, так и в мобильном вариантах на объектах АПК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергосбережение. Практикум, № 5. Сентябрь – октябрь, 2014. – С. 28-35.
2. Богданович П. Ф., Григорьев Д. А. Заневский В. В. Усовершенствование вертикально-осевой ветроэнергетической установки (ВЭУ). «С/х - проблемы и перспективы» Сб. н.т., т.26. ПГАУ - 2014. – С. 8-14.
3. Ветроустановка: патент РФ на полезную модель №10466 U 2014.12.30, МПК F03D 3/00 / П. Ф. Богданович, Д. А. Григорьев, Пестис В. К., Заневский В. В.