

УДК 621.313.5

UDC 621.313.5

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ  
ВЕТРОВОГО ПОТОКА НА ЧАСТОТУ  
ВРАЩЕНИЯ ВЕТРОКОЛЕСА  
ВЕТРОУСТАНОВКИ С ДВУХРОТОРНЫМ  
ГЕНЕРАТОРОМ В ХОДЕ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**THE INFLUENCE ESTIMATION OF THE  
WIND FLOW INSTABILITY ON THE  
ROTATION SPEED OF WINDWHEEL OF  
DOUBLE-ROTOR WIND POWER PLANT  
GENERATOR DURING THE EXPERIMENTAL  
RESEARCH**

Моренко Константин Сергеевич  
аспирант  
*Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Азово-Черноморская государственная  
агроинженерная академия» г. Зерноград, Россия*

Morenko Konstantin Sergeevich  
postgraduate student  
*Federal statement budgetary educational institution of  
higher professional education Azov-Blacksea State  
Agroengineering Academy, Zernograd, Russia*

В статье рассмотрены основные положения, позволяющие оценить влияние отклонений скорости ветра на частоту вращения ветроколеса. Описан способ экспериментального определения момента инерции ветроустановки. Приведены формулы для расчётов

The article deals with the basic regulations which allow us to estimate the influence of the velocity variation of wind upon the rotation speed of the windwheel. The method of experimental determination of the inertia of the wind power plant was described. The formulas for the determination were also described

Ключевые слова: ВЕТРОГЕНЕРАТОР,  
ВЕТРОКОЛЕСО, ДВУХРОТОРНЫЙ, МОМЕНТ  
ИНЕРЦИИ

Keywords: WIND GENERATOR, WINDWHEEL,  
DOUBLE-ROTOR, INERTIA

Двухроторные генераторы [1] являются перспективными устройствами для применения на ветроустановках с управляемым углом атаки лопасти, поскольку позволяют отказаться от применения некоторых узлов в цепи преобразования энергии, повышая эффективность использования энергии установки и её надёжность.

Из источника [2] известно, что для осуществления управления ветроустановкой необходимо знать аэродинамические характеристики ветроколеса. При проведении экспериментальных исследований ветроустановки на базе двухроторного ветрогенератора необходимо определить влияние неустойчивости ветрового потока на частоту вращения ветроколеса.

Во время работы ветроустановка находится в установившемся режиме [2], при этом мощность, отбираемая от ветра, будет равна мощности, потребляемой генератором, а частота вращения вала

ветроколеса будет постоянной. В случае усиления ветра или его спада будет наблюдаться нарушение указанного равенства, что повлечёт за собой разгон или торможение установки. Быстрота разгона или торможения будет определяться запасённой в ветроколесе энергией вращения, загрузкой генератора и поступлением энергии от ветра.

В связи с инерционностью системы некоторыми колебаниями ветрового потока относительно среднего значения можно пренебречь. Основными параметрами отклонений ветрового потока будем считать максимальную величину отклонения и время возврата к предполагаемому среднему значению.

Очевидно, что чем больше величина отклонения ветрового потока, тем большее влияние оказывает оно на изменение установившейся частоты вращения ветроколеса. Учёт времени отклонения необходим в связи с тем, что даже небольшое по величине отклонение за длительный интервал времени может изменить частоту вращения ветроколеса и вывести её из допустимых пределов. Для значительных отклонений величина времени, за которое они способны вывести из допустимого диапазона частоту вращения ветроколеса, значительно меньше.

Для оценки величины колебаний ветрового потока и их влияния на частоту вращения вала ветроколеса рассмотрим случай установившегося вращения, при котором происходит внезапное изменение скорости ветра при отсутствии реакции регулятора. В этом случае скорость ветра отклоняется на некоторую величину, после чего возвращается к своему установившемуся значению, на которое регулятор настроил угол атаки лопастей.

Всякое изменение мощности ветра будет приводить к изменению запасённой в ветроколесе энергии, заставляя его останавливаться при снижении скорости ветра или разгоняться при росте. В связи с тем, что в рассматриваемом случае регулятор настраивает ветроколесо на отбор

необходимой мощности от ветра, коэффициент использования энергии ветра принимается постоянным.

Баланс мощностей в данном случае принимает следующий вид

$$P_{\text{потреб}} + P_{\text{разгон}} = P_{\text{ветра.установ}} + \Delta P_{\text{ветра}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{потреб}}$  – мощность, потребляемая ветроколесом, Вт;

$P_{\text{разгон}}$  – мощность, расходуемая на разгон ветроколеса, Вт;

$P_{\text{ветра.установ}}$  – мощность ветрового потока, соответствующая установившейся скорости ветра, Вт;

$\Delta P_{\text{ветра}}$  – изменение мощности ветра, вызванное изменением его скорости, Вт.

Новая частота вращения, возникающая в результате воздействия ветра, будет равна

$$\omega = \omega_{\text{установ}} + \Delta\omega. \quad (2)$$

где  $\omega_{\text{установ}}$  – установившаяся частота вращения, соответствующая установившейся скорости ветра  $c^{-1}$ ;

$\Delta\omega$  – изменение частоты вращения, вызванное изменением скорости ветра  $c^{-1}$ ;

Изменение угловой частоты вращения можно определить с помощью работы, совершённой избыточной мощностью ветра, или использованной на генерацию мощности для потребителей запас энергии вращения ветроколеса, в случае, когда мощности ветра недостаточно, по формуле

$$\Delta\omega = \frac{A_{\text{ветра}}}{J} = \frac{\Delta P_{\text{ветра}} \cdot t}{J}, \quad (3)$$

где  $A_{\text{ветра}}$  – работа, совершаемая изменением скорости ветра, Дж;

$J$  – момент инерции вращения ветроустановки,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$t$  – время воздействия изменившегося значения скорости ветра, с.

Избыточную мощность ветра, воспринимаемую ветроколесом, определим как разность текущей скорости ветра и той скорости, на которую настроено ветроколесо, с учётом коэффициента использования энергии ветра

$$\Delta P_{ветра} = (P_{ветра} - P_{ветра.установ}) \cdot \eta_{ветра} \cdot \quad (4)$$

где действующий коэффициент использования энергии ветра можно определить по выражению

$$\eta_{ветра} = \frac{P_{потреб}}{P_{ветра.установ}}, \quad (5)$$

где  $P_{потреб}$  – мощность, потребляемая от ветроколеса генератором, Вт;

Мощность ветра, протекающего через ометаемую поверхность ветроколеса со скоростью  $v$ , равна

$$P = \frac{\rho \cdot v^3 \cdot F}{2}, \quad (6)$$

где  $\rho$  – удельная плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$F$  – площадь, ометаемая ветроколесом, м<sup>2</sup>.

Таким образом, избыточная мощность ветрового потока преобразуется согласно вышеприведённым выражениям к виду

$$\Delta P = (P_{ветра} - P_{ветра.установ}) \cdot \frac{P_{потреб}}{P_{ветра.установ}}$$

$$\Delta P = \left( \frac{P_{ветра}}{P_{ветра.установ}} - 1 \right) \cdot P_{потреб}$$

$$\Delta P = \left( \frac{\rho \cdot v_{ветра}^3 \cdot F}{2} \cdot \frac{2}{\rho \cdot v_{ветра.установ}^3 \cdot F} - 1 \right) \cdot P_{потреб}$$

$$\Delta P = \left( \left[ \frac{v_{\text{ветра}}}{v_{\text{ветра.установ}}} \right]^3 - 1 \right) \cdot P_{\text{потреб}} \cdot \quad (7)$$

Изменение угловой частоты в этом случае преобразуется к виду

$$\Delta \omega = \left( \left[ \frac{v_{\text{ветра}}}{v_{\text{ветра.установ}}} \right]^3 - 1 \right) \cdot \frac{P_{\text{потреб}} \cdot t}{J}, \quad (8)$$

а относительное изменение угловой частоты выражается из уравнения (2) следующими преобразованиями

$$\frac{\omega}{\omega_{\text{установ}}} = 1 + \frac{\Delta \omega}{\omega_{\text{установ}}};$$

$$\frac{\omega}{\omega_{\text{установ}}} - 1 = \frac{\Delta \omega}{\omega_{\text{установ}}}.$$

Левая часть выражения представляет собой относительное изменение угловой частоты вращения

$$\omega_{\%} = \frac{\Delta \omega}{\omega_{\text{установ}}};$$

$$\omega_{\%} = \left( \left[ \frac{v_{\text{ветра}}}{v_{\text{ветра.установ}}} \right]^3 - 1 \right) \cdot \frac{P_{\text{потреб}} \cdot t}{J \cdot \omega_{\text{установ}}}. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует вывод о том, что чем ниже мощность потребителей, тем меньше влияние изменения скорости ветра на режим работы ветроустановки.

В действительности регулятор подстраивает угол атаки лопастей для сохранения баланса мощностей, и коэффициент использования энергии ветра изменяется таким образом, чтобы минимизировать переходной процесс и удерживать частоту вращения заданной.

Для проведения расчётов для действующей ветроустановки

необходимо определить инерцию вращения ветроколеса вместе с генератором.

Для определения инерции вращения ветроколеса был проведён ряд испытаний установки. В безветренную погоду лопасти были установлены в положение, оказывающее наименьшее сопротивление при движении. Была собрана экспериментальная установка, схема которой приведена на рисунке 1.

На ось вращения ветроколеса был установлен шкив 2, на который был намотан трос 3, на другом конце которого располагался груз 4 массой 3,2 кг. Из состояния покоя груз ускоренно опускался, приводя в действие шкив и разгоняя ветроколесо 1 и связанный с ним генератор. Пройдя траекторию (а)-(б) до нижней точки, груз поднимался по траектории (б)-(в) за счёт энергии, запасённой во вращающемся ветроколесе и генераторе до момента остановки. Во время эксперимента фиксируются: высота опускания  $h_1$  и последующего подъёма груза  $h_2$  а также соответствующие интервалы времени движения по траекториям (а)-(б) и (б)-(в).

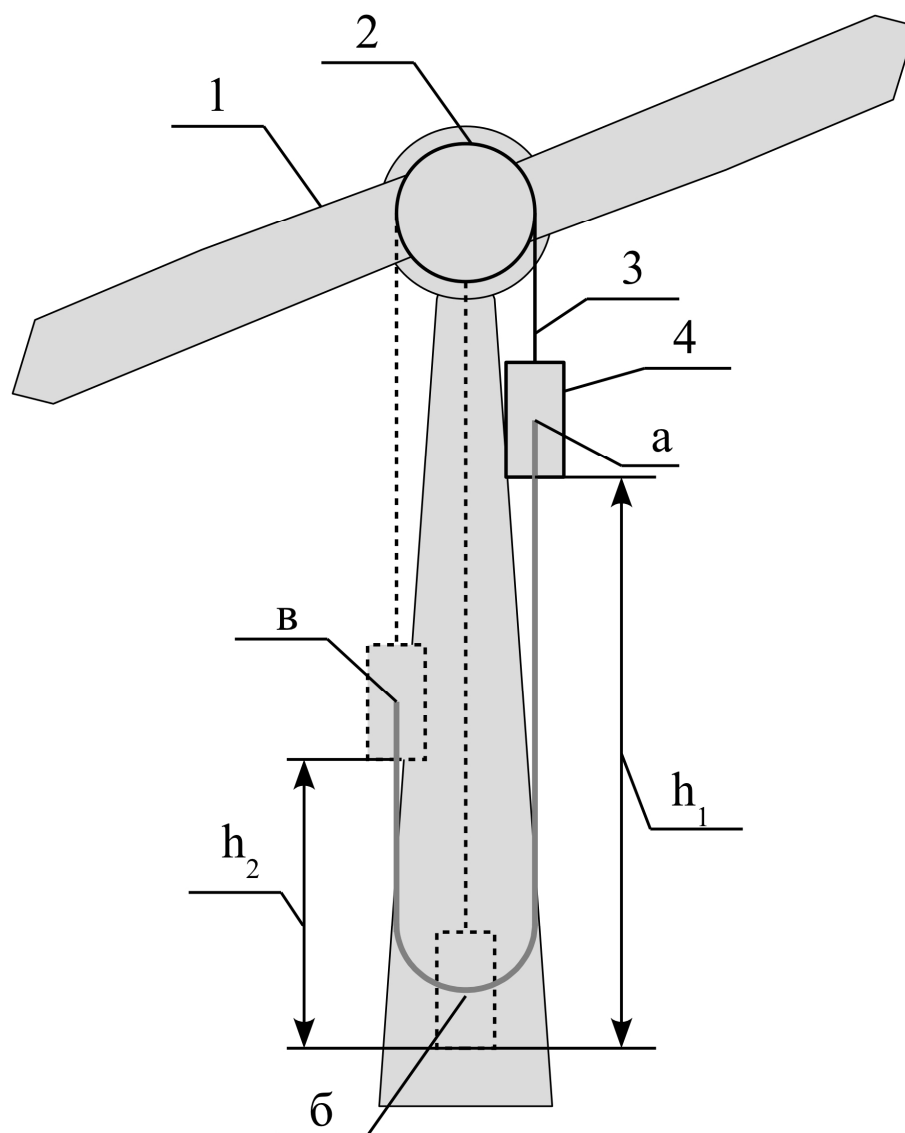


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки по определению момента инерции ветроустановки

Во всех случаях движения работу совершали три силы: работа силы тяжести  $A_m$ , силы аэродинамического сопротивления  $A_a$  и силы инерции ветроколеса и генератора  $A_u$ . Для удобства будем обозначать работы на первом участке траектории при опускании груза дополнительными индексами «1», а на втором участке при подъёме груза – индексами «2».

При движении по траектории (а)-(б) сила тяжести совершала положительную работу по разгону ветроколеса и преодолению аэродинамического сопротивления, откуда

$$A_{m1} - A_{a1} - A_u = 0, \quad (10)$$

в то время как при движении по траектории (б)-(в) положительную работу совершала сила инерции, преодолевая силу тяжести при подъёме груза и силу аэродинамического сопротивления, образуя равенство

$$A_u - A_{m2} - A_{a2} = 0. \quad (11)$$

Работа консервативной силы инерции в обоих случаях одинакова в виду того, что ветроколесо в точках (а) и (в) траектории не вращалось, а в точке (б) имело одну и ту же скорость.

Выполним вычитание уравнения (10) из уравнения (11) и получим

$$2 \cdot A_u - A_{m1} - A_{m2} + A_{a1} - A_{a2} = 0. \quad (12)$$

В уравнении (12) присутствует две работы аэродинамических сил на каждом из участков траектории; с целью упрощения выражения следует определить соотношение между ними.

Известно, что сила аэродинамического сопротивления является функцией скорости движения  $F_{ветра} = f(v)$ . Поскольку в обоих случаях значения скоростей в крайних точках совпадают, можно сделать вывод о том, что совпадают и величины аэродинамических сил. Следует учесть, что сила аэродинамического сопротивления является единственной переменной силой, зависящей от скорости. Примерный вид изменения этой силы вдоль траектории движения приведён на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, форма кривой силы аэродинамического сопротивления не зависит от полного пути, а является только функцией скорости, которая в соответствующих крайних точках одинакова. Таким образом, площади под кривыми  $A_{a1}$  и  $A_{a2}$  линейно зависят от масштабного коэффициента  $x$  – пройденного пути.



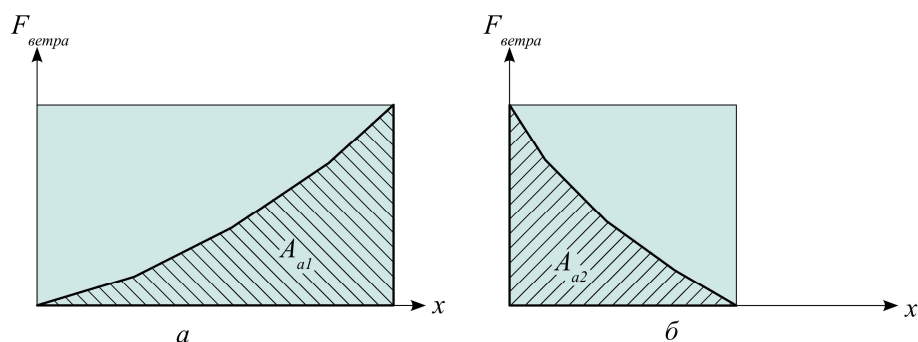


Рисунок 2. Изменение силы аэродинамического сопротивления при движении груза

Поскольку эти площади представляет собой работу силы аэродинамического сопротивления, следует, что отношение работ сил аэродинамического сопротивления в обоих случаях можно выразить через перемещения груза следующим образом

$$\frac{A_{a1}}{A_{a2}} = \frac{h_1}{h_2},$$

откуда следует, что

$$A_{a1} = \frac{h_1}{h_2} \cdot A_{a2}. \tag{13}$$

Вышеприведённое уравнение (13), будучи подставленным в уравнение (12), приведёт к следующим результатам

$$2 \cdot A_u - A_{m1} - A_{m2} + \frac{h_1}{h_2} \cdot A_{a2} - A_{a2} = 0;$$

$$2 \cdot A_u - A_{m1} - A_{m2} + A_{a2} \left( \frac{h_1}{h_2} - 1 \right) = 0;$$

$$2 \cdot A_u - A_{m1} - A_{m2} + A_{a2} \cdot \frac{h_1 - h_2}{h_2} = 0. \tag{14}$$

Преобразовав уравнение (11), получим выражение,

$$A_{a2} = A_u - A_{m2},$$

подставив его в уравнение (14), получим следующий результат

$$\begin{aligned}
 2 \cdot A_u - A_{m1} - A_{m2} + A_u \cdot \frac{h_1 - h_2}{h_2} - A_{m2} \cdot \frac{h_1 - h_2}{h_2} &= 0; \\
 A_u \cdot \left( \frac{h_1 - h_2 + 2h_2}{h_2} \right) - A_{m1} - A_{m2} \cdot \left( \frac{h_1 - h_2 + h_2}{h_2} \right) &= 0; \\
 A_u \cdot \frac{h_1 + h_2}{h_2} - A_{m1} - A_{m2} \cdot \frac{h_1}{h_2} &= 0.
 \end{aligned} \tag{15}$$

Высоты подъёма и опускания груза измерялись в эксперименте относительно точки нулевой потенциальной энергии (б). Поскольку в точках (а), (б) и (в) скорость груза была равна нулю, можно сделать вывод о том, что единственный вид энергии, которым обладает груз в каждой из этих точек – потенциальная. Поскольку участки траекторий (а)-(б) и (б)-(в) имеют в точке (б) нулевую потенциальную энергию, работа силы тяжести может быть выражена через высоту подъёма или опускания груза по известной формуле [механика]

$$A_m = m \cdot g \cdot h. \tag{16}$$

Используя вышеприведённое выражение для определения работы в выражении (15) получим

$$\begin{aligned}
 A_u \frac{h_1 + h_2}{h_2} &= m \cdot g \cdot \left( h_1 + h_2 \frac{h_1}{h_2} \right) \\
 A_u \frac{h_1 + h_2}{h_2} &= 2 \cdot m \cdot g \cdot h_1 \\
 A_u &= 2 \cdot m \cdot g \cdot \frac{h_1 \cdot h_2}{h_1 + h_2}.
 \end{aligned} \tag{17}$$

Подставляя известные значения в выражение (16), получим работу силы инерции на каждом из двух участков

$$A_u = 2 \cdot 3,2 \cdot 9,81 \cdot \frac{1,2 \cdot 0,58}{1,2 + 0,58} = 24,6 \text{ Дж}.$$

Для определения среднего значения момента во время движения по первому участку траектории используем выражение [3]

$$M = \frac{A_u}{j} = \frac{24,6}{7,85} = 3,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Разгон ветроколеса на участке (а)-(б) траектории осуществлялся за счёт работы силы инерции и создания запаса энергии во вращающемся ветроколесе и генераторе. Торможение на участке (б)-(в) происходило в результате расходования запасённой кинетической энергии на подъём груза. Пренебрегая неравномерностью аэродинамического сопротивления в виду малых скоростей движения инерцию можно определить через среднее значение момента по выражению:

$$J = \frac{M \cdot t^2}{2 \cdot \varphi}. \quad (18)$$

$$J = \frac{3,1 \cdot 11,5^2}{2 \cdot 7,85} = 26,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Следует отметить влияние угла поворота лопасти на величину инерции вращения. Ось вращения ветроколеса и ось вращения каждой лопасти образуют прямой угол. Были проведены теоретические определения влияния угла поворота на инерцию лопасти для двух предельных углов установки лопасти – 0 и 90 градусов. Результаты показывают, что максимальное изменение инерции лопасти не превышает 1,8 % при максимальной величине угла поворота.

Рассмотрим случай, когда установка находится в установившемся режиме при заданной частоте вращения и скорость вращения при этом соответствует номинальной. Происходит случайное отклонение скорости ветра. Необходимо оценить влияние на частоту вращения при заданной

величине провала или выбега скорости ветра и заданном времени воздействия.

В этом случае следует проинтегрировать провал скорости ветра по выражению (9) по времени

$$\omega_{\%} = \int \left( \left[ \frac{v_{\text{ветра}}(t)}{v_{\text{ветраустанов}}} \right]^3 - 1 \right) \cdot \frac{P_{\text{потреб}}}{J \cdot \omega_{\text{установ}}} dt. \quad (19)$$

Указанные провалы допустимы лишь в том случае, когда мощность ветра в нижней точке провала превосходит потребляемую генератором механическую мощность. В случае, когда провал ветрового потока не опускается ниже 8 м/с, учитывать указанное ограничение нет необходимости, т.к. при указанной скорости ветра генератор может выдавать номинальную мощность.

Таким образом, в случае, когда отклонение частоты вращения не превышает заранее определённых критических для эксперимента значений, скорость ветра можно принимать за указанный интервал постоянной, поскольку отклонения не оказывают существенного влияния на изменение частоты вращения ветроколеса.

Для получения статического состояния ветроустановки необходимо удостовериться в завершении переходного процесса при изменении скорости ветра или нагрузки. Критерием завершения переходного процесса зачастую служить отсутствие отклонения частоты вращения более чем на 5 %.

В результате проведённых исследований выяснено, что инерция вращения экспериментальной ветроустановки составляет  $26,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Полученное значение инерции не зависит от угла установки лопастей. Получена формула, позволяющая оценить влияние неустойчивости ветрового потока на частоту вращения ветроколеса. Применение данной формулы в ходе обработки результатов экспериментальных исследований

позволяет определить влияние отклонений скорости ветра и отвлекаться от незначимых.

#### Список литературы

1. Патент RU2433301C2 F03D1/02, F03D7/04 Двухроторный ветрогенератор / Моренко К.С. Опубликовано: 10.11.2011, бюл. №31.
2. *Моренко К.С.* Расчёт регулировочной характеристики лопастного ветроколеса для двухроторного генератора средствами MatLab / К.С. Моренко // Материалы VII международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы создания новых экологически чистых технологий в агропромышленном комплексе» – Ставрополь: «Параграф». 2012.
3. *Маркеев А.П.* Теоретическая механика: Учеб. для университетов. – М.: ЧеРо, 1999. – 572 с.

#### References

1. Patent RU2433301S2 F03D1/02, F03D7/04 Dvuhrotornyj vetrogenerator / Morenko K.S. Opublikovano: 10.11.2011, bjul. №31.
2. Morenko K.S. Raschjot regulirovochnoj harakteristiki lopastnogo vetrokolesa dlja dvuhrotornogo generatora sredstvami MatLab / K.S. Morenko // Materialy VII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Fiziko-tehnicheskie problemy sozdanija novyh jekologicheski chistyh tehnologij v agropromyshlennom komplekse» – Stavropol': «Paragraf». 2012.
3. Markeev A.P. Teoreticheskaja mehanika: Ucheb. dlja universitetov. – M.: CheRo, 1999. – 572 s.