

Оптимизация степени загрузки ветроагрегата при различных скоростях ветра

*В.Г. Петько, д.т.н., профессор, И.А. Рахимжанова, к.с.-х.н.,
В.В. Пугачёв, преподаватель,
А.С. Петров, преподаватель, Оренбургский ГАУ*

Использование энергии ветра особенно перспективно для энергообеспечения производственных и бытовых объектов в сельском хозяйстве. Однако непостоянство скорости ветра V и сравнительно малая её величина, что характерно для большинства районов в Оренбургской области, сдерживается из-за неприемлемо длительного срока окупаемости ветроагрегата. В этих условиях с целью сокращения срока окупаемости особенно важно для каждого конкретного агрегата обеспечить

наиболее полное использование энергии ветра во всём диапазоне изменения его скоростей.

Известно, что кинетическая энергия W ветрового потока, проходящего через ометаемую поверхность S ветроколеса за время t , определяется выражением [1]

$$W = \frac{m V^2}{2} = \frac{\rho S V t V^2}{2} = \frac{\rho S t V^3}{2} \text{ Дж}, \quad (1)$$

где ρ – объёмная плотность воздуха, кг/м³.

Тогда мощность, развиваемая на валу ветроколеса, определяется как

$$P = \xi \frac{W}{t} = \xi \frac{\rho S t V^3}{2t} = \xi \frac{\rho S V^3}{2} \text{Вт}, \quad (2)$$

где ξ – коэффициент использования энергии ветра, зависящий от аэродинамических свойств ветроколеса и степени его торможения $s = \frac{\omega_{xx} - \omega}{\omega_{xx}}$;

ω – угловая скорость ветроколеса, 1/с;

ω_{xx} – угловая скорость идеального холостого хода ветроколеса, 1/с.

В свою очередь

$$\omega_{xx} = z \cdot V, \quad (3)$$

где z – интегральный коэффициент быстроходности лопастей ветроколеса, зависящий в основном от угла их заклинивания;

V – скорость ветра, м/с.

Зависимость коэффициента использования энергии ветра от степени торможения ветроколеса $\xi = f(s)$ – однозначна и не зависит от скорости ветра. Коэффициент использования энергии ветра равен нулю при степенях торможения, равных 0 и 1, и для большинства типов ветроколёс достигает максимума (от 0,15 до 0,45 в зависимости от типа ветроколеса) при степени торможения, близкой к 0,5. В то же время зависимость $\xi = f(\omega)$, поскольку угловая скорость ветроколеса и степень торможения связаны между собой уравнением

$$\omega = \omega_{xx}(1 - s) = zV(1 - s), \quad (4)$$

неоднозначна, так как каждому значению коэффициента использования энергии ветра соответствует своя угловая скорость ветроколеса, тем большая, чем больше скорость ветра.

Это наглядно проиллюстрировано на рисунке, где приведена зависимость $\xi = f_1(\omega)$ для скорости ветра V_1 и зависимость $\xi = f_2(\omega)$ для скорости ветра V_2 , меньшей, чем V_1 .

Эффективность ветроагрегата будет наиболее высокой, если при любой из возможных скоростей ветра мощность ветроколеса будет иметь максимальное значение. Этого можно достичь, во-первых, если применить, как следует из выражения (2), ветроколесо с возможно большим максимальным значением коэффициента использования энергии ветра, а во-вторых, если оно будет использоваться при той степени торможения, при которой коэффициент использования энергии ветра максимален. В соответствии с этим такой режим использования, степень торможения и угловую скорость ветроколеса в этом режиме будем считать оптимальными. А так как с учётом выражения (4)

$$\omega_{opt} = zV(1 - s_{opt}), \quad (5)$$

при постоянной для конкретного типа ветроколеса оптимальной степени торможения s_{opt} оптимальное значение угловой скорости ω_{opt} ветроколеса прямо пропорционально скорости ветра и различно для различных скоростей ветра. На рисунке это ω_{opt1} для скорости ветра V_1 и ω_{opt2} для скорости ветра V_2 .

Следовательно, для того чтобы ветроагрегат работал в оптимальном режиме при оптимальной

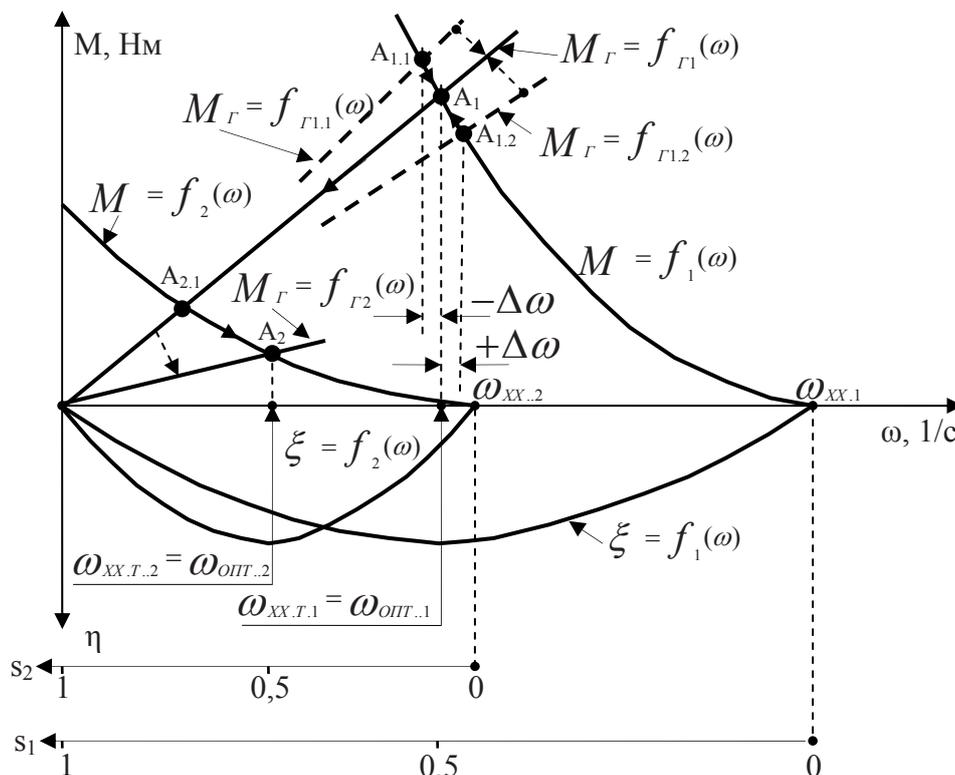


Рис. – Характеристики ветроагрегата в оптимальных режимах при различных скоростях ветра

угловой скорости ветроколеса, необходимо обеспечить равенство развиваемого ветроколесом момента M и момента сопротивления M_r соединённого с ним электрического генератора именно при этой изменяющейся с изменением скорости ветра угловой скорости ветроколеса.

Момент ветроколеса с ростом степени торможения возрастает. Его зависимость от угловой скорости ветроколеса (механическая характеристика $M=f(\omega)$) для тихоходного многолопастного колеса с достаточной степенью точности описывается уравнением [2–4]:

$$M = B (\omega_{xx} - \omega)^2 = B (zV - \omega)^2 \text{ Нм}, \quad (6)$$

где B – коэффициент пропорциональности, Нм/с².

Как видим, механическая характеристика для различных скоростей ветра различна. На рисунке приведена механическая характеристика ветроколеса:

$$M = f_1(\omega) = B (zV_1 - \omega)^2, \quad (7)$$

при скорости ветра V_1 и – механическая характеристика ветроколеса:

$$M = f_2(\omega) = B (zV_2 - \omega)^2, \quad (8)$$

при скорости ветра V_2 . Более того, для ветроколеса с нерегулируемой геометрией лопастей ($z = \text{Const}$), а именно такие ветроколеса ввиду их простоты используются в большинстве случаев, воздействовать на параметры механической характеристики с целью вывода ветроколеса на оптимальный режим невозможно.

Поэтому установить оптимальный режим загрузки ветроагрегата можно, воздействуя только на параметры механической характеристики генератора, которая, как, например, для генератора постоянного тока, линейна и описывается без учёта потерь холостого хода уравнением:

$$M_r = \frac{(C \Phi)^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{н}}} \omega, \quad (9)$$

где $R_{\text{я}}$ и $R_{\text{н}}$ – соответственно сопротивление якоря и сопротивление нагрузки, Ом;

C и Φ – соответственно конструктивная постоянная генератора и магнитный поток.

Такими параметрами характеристики, как видим, являются сопротивление нагрузки и магнитный поток, изменяя которые можно изменять наклон характеристики и тем самым перемещать рабочую точку A ветроагрегата вдоль оси ω .

На диаграмме (рис.) изображена механическая характеристика генератора:

$$M_r = f_r(\omega) = \frac{(C \Phi_1)^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{н}}} \omega, \quad (10)$$

сопротивление нагрузки которого $R_{\text{н}}$ и магнитный поток Φ_1 установлены таким образом, что наклон механической характеристики генератора обеспечивает пересечение её с механической ха-

рактеристикой ветроколеса $M = f_1(\omega)$ в точке A_1 , оптимальной по частоте вращения для скорости ветра V_1 . Этот режим соответствует максимальному использованию энергии ветра. При случайном увеличении магнитного потока до величины $\Phi_{1.1}$ или уменьшении сопротивления нагрузки до величины $R_{\text{н}1.1}$ механическая характеристика генератора станет описываться уравнением:

$$M_r = f_{r1.1}(\omega) = \frac{(C \Phi_{1.1})^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{н}1.1}} \omega \quad (11)$$

и при указанном изменении параметров увеличит наклон. Рабочая точка переместится в положение $A_{1.1}$. При этом произойдёт отклонение угловой скорости ветроколеса от его оптимальной скорости в сторону уменьшения на величину $\Delta\omega = \omega - \omega_{\text{опт}}$.

Восстановить оптимальный режим можно, применив автоматический регулятор (оптимизатор загрузки ветроколеса). На один из его входов должна поступать информация о текущей угловой скорости ветроколеса, а на другой – информация о скорости ветра и, следовательно, о величине оптимальной для данной скорости ветра угловой скорости ветроколеса $\omega_{\text{опт}}$. Последняя может быть рассчитана логическим устройством регулятора по значению поступившей на его вход текущей скорости ветра. Для этого в его память предварительно должна быть заложена величина интегральной быстроходности z ветроколеса.

В простейшем же варианте регулятора за оптимальную угловую скорость ветроколеса может быть принята равная ей угловая скорость идеального холостого хода $\omega_{\text{т.хх}}$ вспомогательной ветротурбины. А так как с учётом выражения (3)

$$\omega_{\text{т.хх}} = z_1 V, \quad (12)$$

а оптимальная частота ветроколеса $\omega_{\text{опт}}$ определяется выражением (5), то из условия их равенства интегральная быстроходность вспомогательной ветротурбины должна быть равна величине, определяемой по формуле:

$$z_T = z (1 - s_{\text{опт}}). \quad (13)$$

Тогда из точки $A_{1.1}$ ветроагрегат вернётся в оптимальный режим, если регулятор при $\Delta\omega$ меньше нуля будет настроен на увеличение наклона механической характеристики генератора, т. е. на уменьшение магнитного потока генератора или увеличение сопротивления нагрузки.

Ситуация будет обратной, если произойдёт увеличение угловой скорости ветроколеса и рабочая точка переместится в положение $A_{1.2}$. В этом случае $\Delta\omega$ больше нуля и для перехода ветроагрегата в оптимальный режим регулятор должен или увеличить магнитный поток, или уменьшить сопротивление нагрузки.

При изменении скорости ветра разность угловых скоростей $\Delta\omega$ возникает теперь уже не только за счёт изменения угловой скорости ветроколеса, а и за счёт изменения её оптимального значения. Так, если

скорость ветра уменьшится до величины V_2 , то, как показано на рисунке, механическая характеристика ветроколеса станет соответствовать выражению (8) и рабочая точка ветроагрегата переместится в положение A_2 . Одновременно уменьшится и оптимальная угловая скорость ветроколеса до величины $\omega_{\text{опт}2} = \omega_{T.XX.2}$. При этом на выходе элемента сравнения регулятора появится отрицательная величина $\Delta\omega$ и регулятор, как было показано выше, или уменьшит величину магнитного потока Φ , или увеличит сопротивление нагрузки R_H . Генератор перейдет при этом на характеристику:

$$M_r = f_{r_2}(\omega) = \frac{(C \Phi_2)^2}{R_{я} + R_{H2}} \omega . \quad (14)$$

Наклон характеристики увеличится, рабочая точка переместится в положение A_2 , соответствующее оптимальному режиму ветроагрегата при изменившейся скорости ветра.

Конструкция регулятора может быть ещё более упрощена при соосном расположении ветроколеса и вспомогательной ветротурбины [5]. Тогда отпадает необходимость в элементе сравнения регулятора, так как непосредственно на его вход можно подать

величину взаимного углового смещения лопастей ветроколеса $\Delta\varphi$, пропорциональную $\Delta\omega$.

Таким образом, предлагаемый алгоритм функционирования регулятора загрузки ветроагрегата и элементы его структуры позволят при сравнительно простой нерегулируемой конструкции ветроколеса обеспечить максимальное использование энергии ветра при всех возможных его скоростях. В конечном итоге это позволит увеличить объём вырабатываемой электрической энергии ветроагрегатом и тем самым сократить срок окупаемости средств на его приобретение и установку.

Литература

1. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. 280 с.
2. Адрианов В.Н., Быстрицкий Д.Н. Ветроэлектрические станции. М.: Государственное энергетическое изд-во, 1960. 310 с.
3. Д. де Рензо. Ветроэнергетика. М.: Энергоатомиздат, 1982. 272 с.
4. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. М.: ОГПЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1956. 544 с.
5. Пат. 2454565. Российская Федерация. МПК F03D7/04 F03D9/00 Ветроэлектрический агрегат / Петько В. Г., Маловский Н. А., Митрофанов А. А., Красников А. В., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Оренбургский государственный аграрный университет» (RU). № 2010111540/06, заявл. 25.03.2010, опубл. 27.06.2012. 2 с., ил.