

* * *

Аэродинамическая характеристика идеального ветроколеса

ЦГОЕВ Р.С.

На основе анализа влияния аэродинамических характеристик ветроколес (т.е. их коэффициентов крутящего момента в функции от быстроходности) различных типов на режимы ветроэнергетической установки (ВЭУ) построена графоаналитическим методом аэродинамическая характеристика идеального ветроколеса. Выбор аэродинамической характеристики ветроколеса для ВЭУ в конкретных ветровых условиях определяется теми требованиями, которые перед ней ставятся. Например, если ВЭУ предназначена для работы параллельно с мощной энергосистемой, то целью является максимизировать выработку электроэнергии, например, за год. При этом при выборе ВЭУ для данной местности нужно ориентироваться на максимум удельной годовой энергии ветропотока по данным ветрового кадастра. Если же ВЭУ предназначена для работы на автономную нагрузку, то целью является максимизировать время работы в течение года. При этом при выборе ВЭУ для данной местности нужно ориентироваться на наиболее вероятную скорость ветра по данным ветрового кадастра. Мощная энергосистема может воспринять любую развиваемую ВЭУ мощность независимо от ее схемы исполнения. Однако естественным ограничением развиваемой ветроколесом мощности в соответствии с его аэродинамической характеристикой являются прочность материала лопастей, ограничивающей скорость их концевых частей, а также установленная мощность генератора. Рассматривается работа отечественной ветроэнергетической установки «Радуга-1» мощностью 1000 кВт, предназначенной для работы как на энергосистему, так и на автономную нагрузку.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, аэродинамическая характеристика, идеальное ветроколесо

Совокупность кадастровых аэрологических и энергетических характеристик ветра, позволяющая выявить его энергетическую ценность, вместе с тем, на первый план выдвигает вопрос выбора ветроэнергетической установки (ВЭУ) для данной местности, обеспечивающей наиболее полное использование ветроэнергетического потенциала. Полнота использования ветропотенциала существенно зависит от аэродинамической характеристики ветроколеса (ВК) ВЭУ.

В статье на основе анализа влияния аэродинамических характеристик ветроколеса (т.е. их коэф-

фициентов крутящего момента в функции от быстроходности $C_M = f(Z)$) различных типов на режимы ветроэнергетической установки рассматриваются вопросы построения графоаналитическим методом аэродинамической характеристики идеального ВК с максимально возможной эффективностью.

Выбор аэродинамической характеристики ветроколеса для ВЭУ в конкретных ветровых условиях определяется теми требованиями, которые перед ней ставятся. Например, если ВЭУ предназначена для работы параллельно с мощной энергосистемой ($P_C \gg P_{ВЭУ}$), то цель – максимум выработки элект-

троэнергии, например за год. При этом при выборе ВЭУ для данной местности нужно ориентироваться на максимум удельной годовой энергии ветропотока по данным ветрового кадастра.

Если же ВЭУ предназначена для работы на автономную нагрузку, то цель — максимум времени работы в течение года. При этом при выборе ВЭУ для данной местности нужно ориентироваться на наиболее вероятностную скорость ветра по данным ветрового кадастра, так как согласно [1] вероятностное распределение скорости ветра можно интерпретировать как часть времени года, в течение которого скорость имеет данное, например наиболее вероятное, значение.

Мощная энергосистема может воспринять любую развиваемую ВЭУ мощность независимо от её схемы исполнения. Однако естественным ограничением развиваемой ветроколесом мощности в соответствии с его аэродинамической характеристикой являются прочность материала лопастей, ограничивающей скорость их концевых частей, а также установленная мощность генератора.

Далее рассмотрим технические данные отечественной ветроэнергетической установки «Радуга-1» мощностью 1000 кВт Калмыцкой ВЭС в районе г. Элисты, предназначенной для работы как на энергосистему, так и на автономную нагрузку [2, 3].

В общем случае коэффициент крутящего момента ветроколеса зависит от выбранного профиля лопастей, от крутки и геометрических размеров. Например, известны [4–6] профили ЦАГИ, ЭСПЕРО, НАСА, английский винтовой профиль, симметричный «В», самотормозящий. Определяются коэффициенты крутящего момента как правило, в виде функции $C_M = f(Z)$ продувкой оригинала или модели лопасти в аэродинамической трубе (рис. 1).

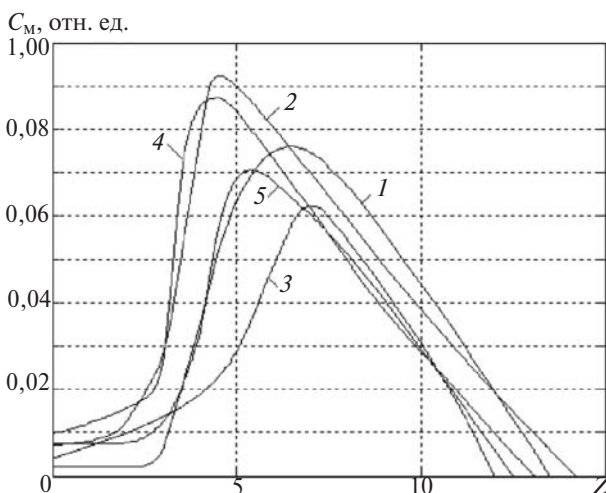


Рис. 1. Аэродинамические характеристики ветроколёс с лопастями различных профилей: 1 — «Радуга-1» (на основе ЭСПЕРО); 2 — ЦАГИ; 3 — симметричный «В»; 4 — ЭСПЕРО; 5 — английский винтовой профиль

При общем характере графики $C_M = f(Z)$ различаются максимальными значениями коэффициентов быстроходности Z и коэффициентов крутящих моментов C_M , а также значениями последних при $Z = 0$, что определяет возможность самозапуска ВЭУ (т.е. определяет необходимость в системе начальной раскрутки ветроэнергетической установки, например включением генератора в двигательный режим).

Для построения характеристик $P = f(U)$ мощностей в функции скорости ветра ветроколёс с аэродинамическими характеристиками согласно рис. 1 воспользуемся известными формулами [1, 3]:

$$Z = \frac{\omega R}{U_0} = \frac{\rho R n}{30 U_0}; \quad (1)$$

$$C_P = Z C_M; \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho S_{\text{вк}} U^3 C_P = \frac{\rho}{2} \gamma R^2 U_0^3 C_P; \quad (3)$$

$$M = 30 P / \rho n, \quad (4)$$

где ω — угловая частота вращения ветроколеса; R — радиус ветроколеса, м; n — скорость вращения ветроколеса, об/мин; γ — удельный вес воздуха, кг/м³; $S_{\text{вк}}$ — площадь, «ометаемая» ветроколесом, м²; U_0 — скорость невозмущённого ветропотока, м/с; C_P — коэффициент мощности ветроколеса, отн.ед.; C_M — коэффициент крутящего момента ветроколеса, отн.ед.; Z — коэффициент быстроходности; P — мощность ветроколеса, Вт; M — крутящий момент ветроколеса, Нж.

На рис. 2 приведены рассчитанные по (1)–(4) мощностные характеристики ветроколёс $P = f(U)$ с радиусом $R = 24$ м (как у ВЭУ «Радуга-1»). На рис. 2 для сравнения приведена мощностная харак-

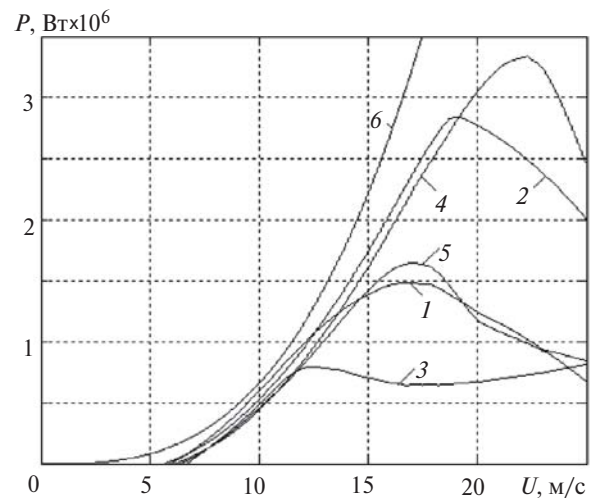


Рис. 2. Характеристики мощностей ветроколёс с лопастями различных профилей в функции скорости ветра при 32 об/мин: 1–5 — см. рис. 1; 6 — график мощности идеального ветроколеса при $C_p = 0,5926$

теристика идеального ВК в невозмущённом ветровом потоке при максимальном коэффициенте мощности $C_P = C_P^{\max} = 16/27 \approx 0,5926$ (критерий Жуковского–Бетца). Область, охватываемая графиком $P = f(U_0)$ по критерию Жуковского–Бетца, по сути, является предельной областью оценки эффективности любого реального ВЭУ так же, как в термодинамике цикл Карно является предельной мерой эффективности тепловых машин.

Из анализа рис. 1 и 2 следует:

1) чем меньше значение Z , при котором $C_M = C_M^{\max}$, тем большую мощность развивает ВК;

2) чем больше значение Z_{\max} , при котором $C_M = 0$, тем меньше скорость ветра, при которой мощность ВК при данной скорости вращения $P > 0$, т.е. тем меньше скорость ветра начала работы ВЭУ (эта же тенденция сохраняется при снижении скорости вращения ВК и/или уменьшении радиуса ВК, так как при этом Z_{\max} достигается при меньших скоростях ветра);

3) при превышении общих потерь ВЭУ примерно 100–150 кВт наиболее эффективно ВК ветроэнергетической установки «Радуга-1»;

4) при выполнении лопастей ветроколеса симметричного «В» профиля практически нет необходимости в системе регулирования их угла установки.

Разнообразие аэродинамических характеристик ветроколёс и их мощностных возможностей позволяет судить о том, сколь важен вопрос выбора типа ветроколеса.

Уравнение (4) является следствием уравнений (1)–(3). Кроме того, из всех восьми параметров, входящих в уравнения (1)–(3), три являются независимыми параметрами: R – конструкционный параметр ветроколеса; скорость ветра U_0 – параметр, имеющий случайный характер; удельный вес воздуха γ , если специально не оговариваются условия, обычно принимают равным $1,2258312 \text{ кг/м}^3$.

Так как независимых уравнений только три, а неизвестных – пять, для дальнейшего анализа необходимо два параметра принять заданными.

Считаем, что конечная цель – построение аэродинамической характеристики $C_M = f(Z)$ идеального ветроколеса. Построение проводится, как указывалось, графоаналитическим путём.

Для идеального ветроколеса [1, 4, 5] принимаем коэффициент мощности равным теоретическому пределу, представляющему известный критерий Жуковского–Бетца:

$$C_P = C_P^{\max} = 16/27 \approx 0,5926 = \text{const.}$$

Следует заметить, что для неидеального ветроколеса, в принципе, можно задаться *любым* другим

значением коэффициента мощности при соблюдении условия $C_P = C_P^{\max} = 16/27$. При выполнении условия $C_P = \text{const}$ необходимо задаться ещё одним из оставшихся двух параметров. Он может быть задан в виде одного из следующих условий: $n = \text{const}$ или $Z = \text{const}$.

Рассмотрим их в такой же последовательности.

Режим ветроколеса при $n = f(U_0) = \text{const}$ (см. рис. 3,а). При выполнении условий $C_P = \text{const}$ и $n = \text{const}$ из (3) видно, что мощность ветроколеса в диапазоне скоростей ветра $0 \leq U_0 \leq U_{\text{ном}}$ ($U_{\text{ном}}$ – скорость ветра, при достижении которой мощность ветроколеса становится равной номинальному значению) возрастает пропорционально U_0^3 ($P \sim U_0^3$).

При скорости ветра $U_0 = U_{\text{ном}}$ и далее в диапазоне скоростей $U_{\text{ном}} \leq U \leq U_{\text{max}}$ (U_{max} – максимальная скорость ветра, после достижения которой обычно ВЭУ отключается) принимаем постоянную мощность ветроколеса: $P = P_{\text{ном}} = \text{const}$.

Это ограничение обусловлено установленной мощностью электрогенератора ВЭУ. С учётом отмеченного на рис. 3,б приведена мощностная характеристика идеального ветроколеса при $P = P_{\text{ном}} = 1000$ кВт. Характеристика $P = f(U_0)$ на рис. 3,б имеет особую точку А – точку достижения номинального режима, в которой при заданных $P_{\text{ном}} = 1000$ и $n_{\text{ном}} = 32$ об/мин по (1)–(3) определена и номинальная быстроходность $Z_{\text{ном}} = 7$.

При $n = \text{const}$ согласно (1) график изменения быстроходности $Z = f(U_0)$ приведён на рис. 3,в. Ориентируясь на максимальные значения быстроходности реальных графиков аэродинамических характеристик $C_M = f(Z)$ на рис. 1 (т.е. на точки, в которых $C_M = 0$), в диапазоне скоростей $0 \leq U_0 \leq U_{\text{max}}$ принято ограничение быстроходности значением $Z = Z_{\text{max}} = 15 = \text{const}$.

Как отмечалось, максимальное значение быстроходности Z_{max} , при котором аэродинамическая

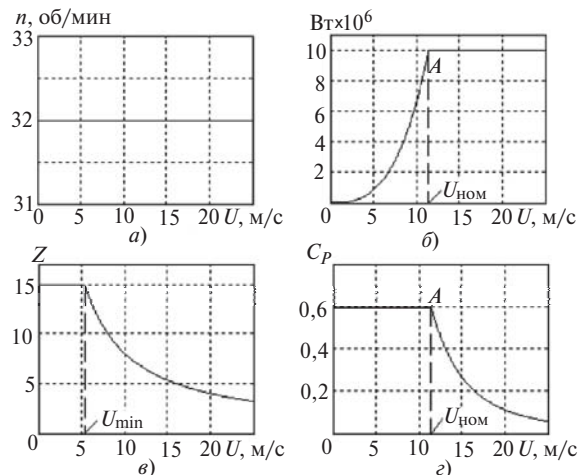


Рис. 3. Графики параметров режима ветроколеса при: а – $n = f(U)$; б – $P = f(U)$; в – $Z = f(U)$; г – $C_P = f(U)$

характеристика $C_M = f(Z)$ принимает нулевое значение, определяет минимальную скорость ветра U_{min} , при которой ВЭУ начинает работать. В диапазоне скоростей ветра $U_{min} \leq U \leq U_{max}$ быстроходность согласно (1) обратно пропорциональна скорости ветра $Z \sim 1/U_0$.

На рис. 3,г приведен график коэффициента мощности колеса в функции скорости ветра. В диапазоне скоростей ветра $0 \leq U \leq U_{ном}$ выполняется условие $C_P = const$, а в диапазоне скоростей ветра $U_{ном} \leq U \leq U_{max}$ согласно (3):

$$C_P = \frac{P_{ном}}{\frac{\rho}{2} \pi R^2 U_0^3},$$

откуда следует $C_P = 1/U_0^3$.

Согласно (4) во всём диапазоне скоростей ветра $0 \leq U \leq U_{max}$ характер изменения момента, развиваемого ветроколесом, аналогичен характеру изменения мощности.

Рассмотренные диапазоны изменения скорости ветра характерны и для коэффициента крутящего момента C_M . В диапазоне скоростей ветра $0 \leq U \leq U_{min}$, как упоминалось, $Z = Z_{max} = const$, поэтому согласно (2)

$$C_M(Z=15) = \frac{C_P^{max}}{Z} = \frac{16}{27 \cdot 15} \approx 0,039506 = const. \quad (5)$$

В диапазоне скоростей ветра $U_{min} \leq U \leq U_{ном}$ при выполнении условий $C_P = const$ и $n = const$ согласно (2)

$$C_M = \frac{C_P}{Z} = \frac{C_P^{max}}{\frac{\rho R n \dot{\omega}}{c} \frac{\dot{\omega}}{c} \frac{1}{30U_0 \dot{\omega}}} = \frac{C_P^{max} 30U_0}{\rho R n}, \quad (6)$$

откуда следует, что $C_M \sim U_0$.

В диапазоне скоростей ветра $U_{ном} \leq U \leq U_{max}$ выполняется условие $P = P_{ном} = const$, поэтому с учётом (3), а также условия $n = const$ коэффициент крутящего момента равен

$$C_M = \frac{C_P}{Z} = \frac{P_{ном}}{\frac{\rho}{2} \pi R^2 U_0^3 \frac{\dot{\omega}}{c} \frac{1}{30U_0 \dot{\omega}}} = \frac{P_{ном} 60}{\rho^2 \pi R^3 U_0^2 n}, \quad (7)$$

откуда следует, что $C_M \sim 1/U_0^2$.

С учётом (5)–(7) на рис. 4 приведен график $C_M = f(U_0)$ коэффициента крутящего момента в функции скорости ветра.

При этом в качестве меток по мере возрастания скорости ветра через каждый шаг $\Delta U_0 = 1$ м/с проведена вертикальная линия.

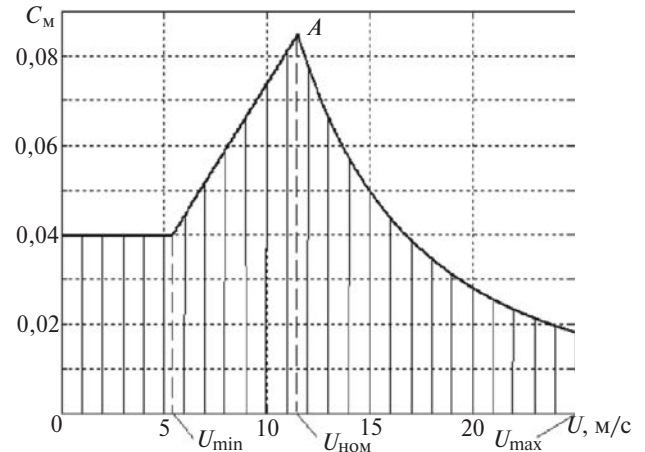


Рис. 4. График коэффициента крутящего момента в функции скорости ветра

Построить график аэродинамической характеристики $C_M = f(Z)$, имея график быстроходности (рис. 3,е) и график коэффициента крутящего момента (рис. 4), не представляет трудности. Однако построим график $C_M = f(Z)$ исходя из основных уравнений. Для идеального ветроколеса в диапазоне скоростей ветра $0 \leq U \leq U_{ном}$ согласно (6)

$$C_M = \frac{C_P}{Z} = \frac{C_P^{max}}{Z} = \frac{16}{27Z}, \quad (8)$$

откуда следует, что $C_M \sim 1/Z$ (нисходящая часть Af характеристики $cbAf$ на рис. 5).

Для диапазона скоростей ветра $U_{ном} \leq U \leq U_{max}$, определив скорость ветра U_0 через быстроходность Z по уравнению (1) и подставив в (7), получим

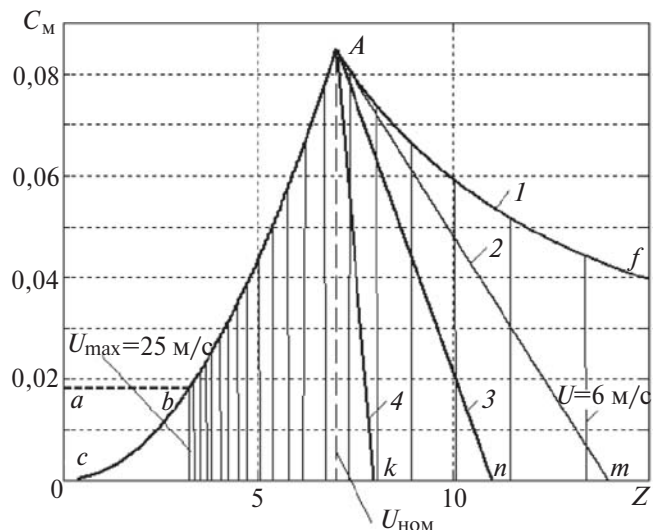


Рис. 5. Аэродинамическая характеристика $C_M = f(Z)$ идеального ветроколеса (1) с правой Af гиперболической и левой cbA параболической частями графика $cbAf$ по отношению к вертикальной линии $U_0 = U_{ном}$; 2 – 4 – аэродинамические характеристики при той же параболической левой части, что и 1, но с правыми частями в виде произвольных прямых соответственно при $Z = Z_{max} = 14; 11; 8$

$$C_M = \frac{C_P}{Z} = \frac{P_{\text{ном}}}{Z \frac{\rho}{2} r R^2 U_0^3} = \frac{P_{\text{ном}}}{Z \frac{\rho}{2} r R^2 \frac{30 R n^3}{60 Z}} = \frac{2 \times 10^3 P_{\text{ном}} Z^2}{\rho^4 r R^5 n^3}, \quad (9)$$

откуда следует, что $C_M \sim Z^2$ (восходящая часть *cbA* характеристики *cbAf* на рис. 5).

С учётом (8) и (9) на рис. 5 приведен полный график аэродинамической характеристики $C_M = f(Z)$ при выполнении условий $C_P = \text{const}$ и $n = \text{const}$. При этом график по (8) расположен в правой части рисунка, график по (9) расположен в левой части рисунка по отношению к вертикальной пунктирной линии при $U_0 = U_{\text{ном}}$. Там ещё проведены те же вертикальные линии (метки), что и на рис. 4 с указанием скорости ветра, что позволяет увязать рис. 4 и 5.

Особо следует обратить внимание на следующий момент. При превышении скоростью ветра максимально допустимого значения $U_{\text{max}} > 25$ м/с ветроэнергетическая установка, как отмечалось, по соображениям прочности элементов должна полностью останавливаться. Следовательно, на рис. 5 параболическая часть характеристики при $U_{\text{max}} > 25$ м/с (т.е. влево от вертикальной линии при $U_{\text{max}} = 25$ м/с) теряет смысл. Вместе с тем по (1) при неподвижном ветроколесе и при ненулевой скорости ветра быстрходность равна нулю. В этой точке согласно (9) $C_M = 0$, и, следовательно, ветроколесо не может само раскрутиться. Поэтому в конструкции лопастей ветроколеса может быть предусмотрено любое изменение, позволяющее создать начальный пусковой момент. В частности, это изменение (т.е. не подчиняющееся уравнениям (1)–(4)) может быть представлено горизонтальной линией *ab* на рис. 5

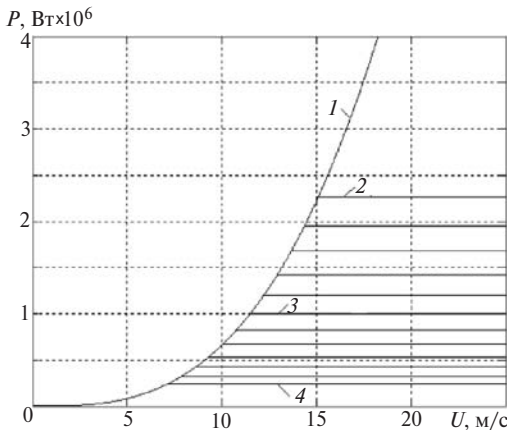


Рис. 6. Режимы $P = f(U_0)$ по мощности при различных постоянных скоростях вращения идеального ветроколеса: 1 – график мощности ветроколеса по (3) при $C_P = 16/27$; 2 – при $n=42$ об/мин; 3 – $n=32$ об/мин; 4 – $n=20$ об/мин

По аэродинамической характеристике $C_M = f(Z)$ идеального ветроколеса (кривая 1 рис. 5) были выполнены расчёты режимов $P = f(U_0)$ по мощности при различных постоянных скоростях вращения ветроколеса в диапазоне $20 \leq n \leq 42$ об/мин с шагом 2 об/мин, графики которых приведены на рис. 6. «Идеальность» мощностных характеристик сохраняется при любых скоростях вращения.

На рис. 7 приведены графики аналогичных расчётов режимов ветроколеса по мощности, проведённых по всем аэродинамическим характеристикам $C_M = f(Z)$ по рис. 5 (нумерация сохранена). Очевидно, что чем больше отличие аэродинамической характеристики от идеальной, тем больше недоиспользование ветроколеса по мощности.

Режим ветроколеса при $Z = \text{const}$. По сути, во всём диапазоне скоростей ветра $0 \leq U_0 \leq U_{\text{max}}$ графики режима при $n = \text{const}$ (рис. 3, б и в) представляют графики максимального использования ветроустановки, поэтому примем, что они справедливы и для рассматриваемого случая $Z = \text{const}$.

Рассмотрим по-прежнему два диапазона скоростей ветра.

1. В диапазоне скоростей ветра $0 \leq U_0 \leq U_{\text{ном}}$, если выполняется условие $Z = \text{const}$ (на рис. 8, б $Z = Z_{\text{ном}} = 7$), то согласно (1)

$$n = 30 Z U_0 / \rho R, \quad (10)$$

т.е. $n \sim U_0$ – скорость вращения ветроколеса меняется пропорционально изменениям скорости ветра (см. рис. 8, а).

При одновременном выполнении условия $C_P = \text{const}$ из (2) следует:

$$C_M = \frac{C_P}{Z} = \frac{C_P^{\text{max}}}{Z_{\text{ном}}} = \frac{16}{27 \times 7} = 0,084656 = \text{const}, \quad (11)$$

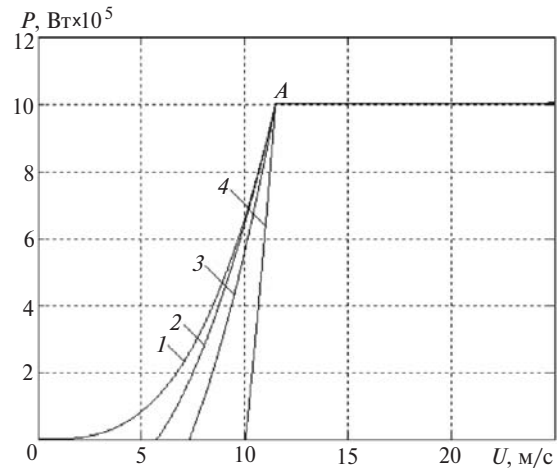


Рис. 7. Графики режимов ветроколеса по мощности, проведённых по всем аэродинамическим характеристикам $C_M = f(Z)$ по рис. 5 (нумерация сохранена)

т.е. коэффициент крутящего момента также является постоянной величиной (на рис. 9 – горизонтальный участок характеристики $C_M = f(U_0) = \text{const}$).

Однако, определяя аэродинамическую характеристику в виде зависимости $C_M = f(Z)$, для рассматриваемого диапазона скоростей ветра $0 \leq U_0 \leq U_{\text{ном}}$ график $C_M = f(Z)$ с учетом (11) вырождается в одну точку *A* (рис. 10).

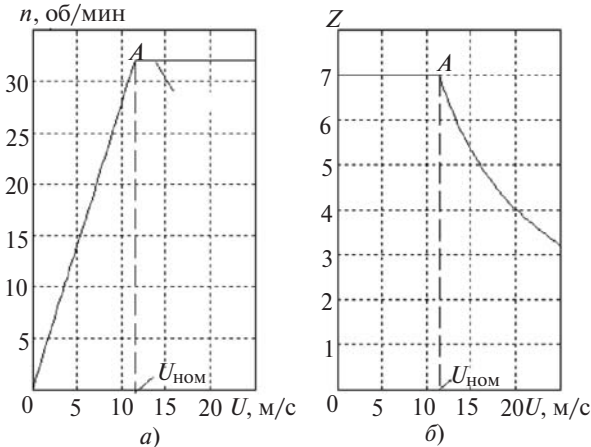


Рис. 8. Графики параметров режима ветроколеса при $Z = \text{const}$

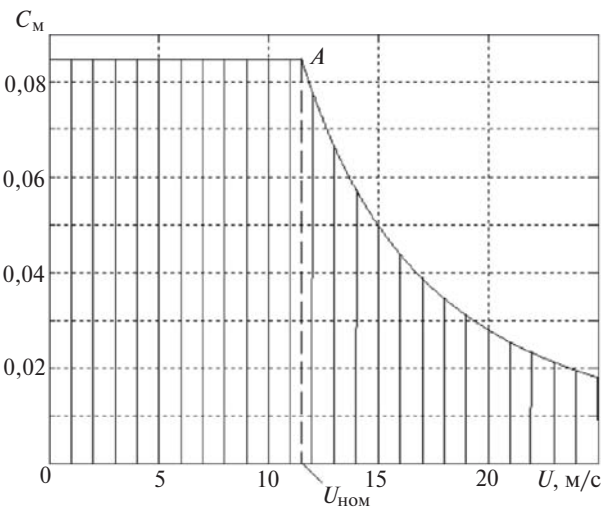


Рис. 9. График $C_M = f(U_0)$ коэффициента крутящего момента в функции скорости ветра при $Z = \text{const}$

2. Для диапазона скоростей ветра $U_{\text{ном}} \leq U \leq U_{\text{max}}$ примем, что выполняются условия $n = \text{const}$ и $P = P_{\text{ном}} = \text{const}$. В частности, в этом диапазоне скоростей ветра график $C_M = f(U)$ (рис. 9) повторяет график рис. 4, поэтому будут справедливы все соотношения, полученные ранее для режима $n = \text{const}$.

Полный график функции $C_M = f(Z)$ во всём диапазоне скоростей ветра с учетом графика быстроходности $Z = f(U_0)$ (рис. 8,б), графика коэффициента крутящего момента $C_M = f(U_0)$ (рис. 9) и (11) представлен на рис. 10. Очевидно, что для диапазона скоростей ветра $U_{\text{ном}} \leq U \leq U_{\text{max}}$ график $C_M = f(Z)$ рис. 10 повторяет график рис. 5.

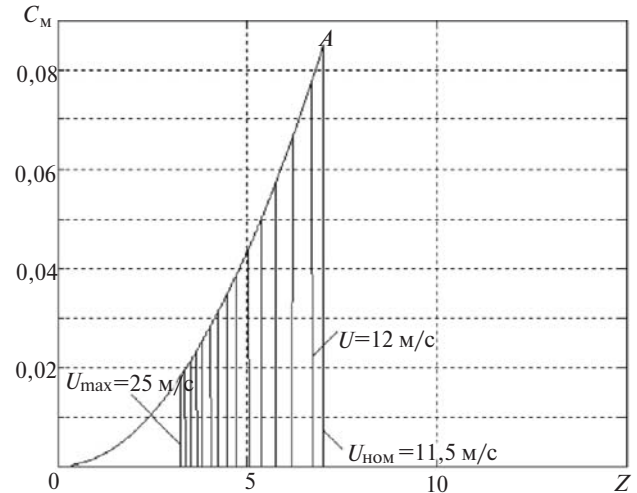


Рис. 10. Аэродинамическая характеристика $C_M = f(Z)$ идеального ветроколеса при $Z = \text{const}$

Выводы. 1. При режимах работы во всём диапазоне скоростей ветра с постоянной скоростью вращения восходящая часть аэродинамической характеристики $C_M = f(Z)$ ветроколеса должна быть пропорциональна квадрату быстроходности, а её нисходящая часть – обратно пропорциональна быстроходности. Чем больше отличие аэродинамической характеристики от идеальной, тем больше недоиспользование ветроколеса по мощности.

2. При режимах работы в диапазоне до номинальной скорости ветра с постоянной быстроходностью восходящая часть аэродинамической характеристики ветроколеса $C_M = f(Z)$ должна быть пропорциональна квадрату быстроходности, а нисходящая часть – произвольно наклонной прямой, так как характеристика вырождается в одну точку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии/Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990, 392 с.
2. Селезнев И.С. Состояние и перспективы работ МКБ «Радуга» в области ветроэнергетики. Конверсия в машиностроении – Conversion in machine building of Russia, 1995, № 5.
3. Дьяков А.Ф., Перминов Э.М., Шакарян Ю.Г. Ветроэнергетика России. Состояние и перспективы развития. – М.: Изд-во МЭИ, 1996, 220 с.
4. Андрианов В.Н., Быстрицкий Д.Н., Вашкевич К.П., Секторов В.Р. Ветроэлектрические станции. – М.: Госэнергоиздат, 1960, 320 с.
5. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. 2 изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983, 200 с.
6. Вашкевич К.П. Аэродинамические характеристики ветродвигателей ветроэлектрических установок. – Изв. АН. Энергетика, 1997, № 3.

[07.10.14]

Автор: Цгоев Руслан Сергеевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1971 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию по управляемым связям электроэнергетических систем. Профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» НИУ «МЭИ».

The Aerodynamic Characterization of an Ideal Windmill

R.S. TSGOYEV

The aerodynamic characteristic of an ideal windmill is constructed using a combined graphic and analytic method based on the data from analyzing the influence of windmill aerodynamic characteristics, i.e., the windmill torque as a function of the specific speed of different types on the wind-driven power plant (WPP) operating modes. The choice of the windmill aerodynamic characteristic for a WPP under particular wind conditions is determined by the requirements imposed on the WPP. For example, if the WPP is intended for operation in parallel with a large-capacity power system, the aim will be to maximize the production of electricity, e.g., for a year. In selecting a WPP for the given locality, it is necessary to be oriented at the maximum of specific annual energy of wind flow according to the wind cadaster data. If a WPP is intended to supply power to an isolated load, the aim will be to maximize the time of operation during a year. In this case, in selecting a WPP for a particular locality, it is necessary to be oriented at the most probable wind velocity according to the wind cadaster data. A large-capacity power system can absorb any power output developed by the WPP irrespectively of its basic circuit. However, the strength of blade material, which limits the speed of the blade end parts, as well as the installed generator capacity, behave as the natural limitation of the power output developed by the windmill in accordance with its aerodynamic characteristic. The operation of the Russian Raduga-1 1000 kW WPP intended for operation on both the power grid and on isolated load is considered.

Key words: *wind-driven power plant, aerodynamic characteristic, ideal windmill*

REFERENCES

1. **Twidell J., Ware A.** *Vozobnovlyayemye istochniki energii/Per. s angliiskogo* (Renewable energy/Trans. from English). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1990, 392 p.
2. **Seleznev I.S.** *Konversiya v mashinostroyenii* (Conversion in mashine building), 1995, No 5.
3. **D'yakov A.F., Perminov E.M., Shakaryan Yu.G.** *Vetroenergetika Rossii. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya* (Wind power in Russia. Status and prospects of development). Moscow, Publ. of Moscow Power Engineering Institute, 1996, 220 p.
4. **Andrianov V.N., Bystritskii D.N., Vashkevich K.P., Sektorov V.R.** *Vetroenergeticheskiye stantsii* (Wind power stations). Moscow, Publ. Gosenergoizdat, 1960, 320 p.
5. **Shefter Ya.I.** *Ispol'zovaniye energii vetra. 2-ye izd.* (The use of wind energy. 2nd edition). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1983, 200 p.
6. **Vashkevich K.P.** *Izvestiya Akademii nauk. Energetika (Proc of Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 1997, No. 3.

Author: Tsgoyev Ruslan Sergeyevich (Moscow, Russia) – Doctor Techn. Sci., Professor in the Department at the Scientific and Research University «Moscow Power Engineering Institute».

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать (желательно и на английском языке):

- полные имена и отчества всех авторов;
- какой факультет, какого вуза и когда закончил;
- когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;
- место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять реферат (не менее 100 слов) на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

