УДК 621.311.245(045)

В. М. Синеглазов, д-р техн. наук, проф.,
С. С. Алёшкин,
А. В. Кульбака

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

Институт аэрокосмических систем управления НАУ, e-mail: svm@nau.edu.ua

Разработан алгоритм автоматизированного проектирования ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения, обеспечивающей достижение максимальной мощности при минимальном моменте трогания. Предложенный алгоритм основан на использовании импульсной модели ветроколеса с вертикальной осью вращения.

Ключевые слова: ротор с вертикальной осью вращения, малые ветра, оптимальные геометрические параметры.

Введение. Разработка различных систем энергоснабжения, простых и доступных автономных источников электрической энергией является одной из актуальных проблем в Украине.

В соответствии с Законом Украины «Об энергосбережении» и «Национальной энергетической программой» ветроэнергетика, наряду с другими нетрадиционными источниками энергии, является одним из приоритетных направлений в энергетике.

Автономные ветроэлектрические установки (ВЭУ) мощностью от единиц до десятков киловатт, предназначенные для снабжения электрической энергией удаленных районов, индивидуальных потребителей, где есть проблемы со стационарными источниками электроэнергии, являются единственно приемлемым вариантом.

В связи с тем, что в Украине преобладают слабые ветра, возникает необходимость в разработке таких автономных ВЭУ, которые могли бы вырабатывать максимальную мощность при минимальном моменте трогания, используя энергию малых ветров (2 – 5 м/с), а также были бы надежными, простыми в управлении и эксплуатации, имели стоимость, более низкую по сравнению с зарубежными аналогами.

Постановка задачи. Существующие ВЭУ можно разделить на два класса с горизонтальным и вертикальным роторами вращения. В работах [5; 6] показаны, что ВЭУ с вертикальным ротором вращения имеют определённые преимущества: не требуют механизма ориентации на ветер, передача энергии на землю и снижение механического шума, высокие инерционные характеристики ротора, удобство в обслуживании.

В качестве ротора с вертикальной осью вращения в данной работе выбираем ротор Дарье, общий вид которого показан на рисунке.

Эффективность ВЭУ характеризуется мощностью N и моментом трогания $M_{\text{тр}}$, которые определяются следующим образом:

$$N = C_P \frac{\rho V^3}{2} DH \eta_{\text{общ}},$$

где C_P – коэффициент мощности; V – расчетная скорость ветра [2], м/с; ρ – плотность воздуха, кг/м^3; $\eta_{\text{общ}}$ – задаваемый предварительно КПД;

$$M_{\text{тр}} = C_{\text{м}} \rho V^2 D^2 H \text{ при } Z = 0,$$

где $C_{\text{м}}$ – коэффициент момента.

В настоящей работе ставится задача нахождения оптимального вектора геометрических параметров ротора ВЭУ $X^* = (H, D, b, n, p)^{\mathrm{T}}$, $X^* = \max\limits_{X^*} N$, при следующем ограничении $M_{\text{тр}} \le M_{\text{тр}_{\text{зад}}}$.

Обзор существующих решений. Мощность, создаваемая ВЭУ, связана с геометрическими характеристиками через аэродинамические характеристики. Известные методы определения аэродинамических характеристик ВЭУ можно разделить на два основных класса: экспериментальные и теоретические. Экспериментальные исследования весьма дорогостоящие, к тому же с их помощью не всегда удается получить нужную информацию о структуре нестационарного течения.

Существующие методики конструирования роторов ВЭУ опираются на известные данные по авиационным крыльевым профилям. Это не позволяет должным образом учесть особенности обтекания вращающихся ветроколес. При выборе конструкции ВЭУ следует проводить комплексное исследование аэродинамических характеристик лопастей с учетом как нестационарных, так и пространственных эффектов. Экспериментальные методы исследований зачастую оперируют ограниченными объемами данных.

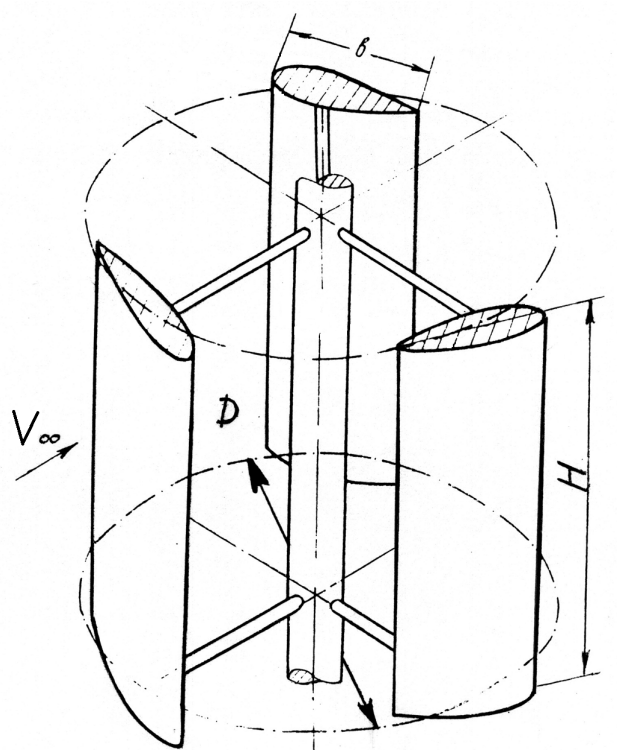

Схема ротора с вертикальной осью вращения: H – высота лопасти; D – диаметр; b – длина хорды лопасти; V – скорость ветра; $n = 3$ – количество лопастей; $p = (p_1, p_2, \ldots, p_k)$, где p_i ($i = 1...k$) – вид профиля лопасти

Алгоритм решения. Рассмотрим решение следующей задачи. По известным значениям мощности, скорости ветра, относительной хорды профиля (в долях радиуса), относительной величины половины высоты ветроколеса (в долях радиуса) необходимо рассчитать диаметр ветроколеса, частоту вращения, хорду профиля и высоту лопасти.

Метод расчета по импульсной модели [1] заключается в определении мощностной характеристики $C_P = f(Z)$ (зависимость коэффициента мощности C_P от быстроходности Z) и моментной характеристики $C_{\text{м}} = f(Z)$ (зависимость коэффициента момента $C_{\text{м}}$ от быстроходности Z). По полученным зависимостям определяют оптимальное значение быстроходности ветроколеса $Z_{\text{опт}}$, при котором обеспечиваются наибольшие значения коэффициентов мощности C_P и момента $C_{\text{м}}$.

Коэффициент вспомогательной быстроходности, равный отношению окружной скорости ротора $U = \omega R$ на радиусе R к скорости ветра V_1 в миделевом сечении

$$Z_b = \frac{\omega R}{V_1}$$

и задаваемый в виде некоторой последовательности чисел, больших единицы.

Промежуточные значения Z_b:

$$Z_b\left(KK\right)=Z_{b_H}+\left(Z_{b_k}-Z_{b_H}\right)\frac{KK-1}{n_{\text{всп}}-1}$$

где KK = 1, 2, …, $n_{\text{всп}}$; $Z_{b_{\text{н}}}$ – начальное значение вспомогательной быстроходности; $Z_{b_{\text{к}}}$ – конечное значение вспомогательной быстроходности; $n_{\text{всп}}$ – количество точек вспомогательной быстроходности.

Вспомогательное выражение

$$G=\frac{i_{\text{л}}\bar{b}}{16\pi}\int_0^1 d\bar{Z}\int_0^{2\pi}\left(\frac{W_{\text{проф}}^2}{V_1^2}\left(-C_n\sin\theta+C_t\right)\right)d\theta. \qquad (1)$$

Переменный азимутальный угол расположения профиля

$$\theta_i = iH_\theta,$$

где i = 0, 1, 2, …, n_θ; $H_\theta = 2\pi/n_\theta$ – шаг по углу; n_θ – количество шагов при численном интегрировании по углу (1).

Тангенс угла атаки проекции относительной скорости на плоскость профиля для i-го шага по углу:

$$\operatorname{tg}\alpha_i=\frac{-\sin\theta_i\cos\delta_k}{Z_b\bar{r}_k+\cos\theta_i}.$$

По таблице аэродинамических характеристик профилей определяем угол атаки α, ближайший к углу α_i и находящийся от него справа.

Пусть номер найденного элемента α будет it.

Имеем элемент $\alpha(it)$, больший угла α_i, и предыдущий элемент $\alpha(it-1)$, меньший угла α_i.

Отметим, что если угол α_i больше всех, задаваемых элементов α, то номеру it присваивается номер последнего элемента, т. е. $it = n_{\text{табл}}$; если угол α_i меньше всех заданных элементов α, то номеру it присваивается номер первого элемента, т. е. $it = 1$.

С помощью линейной интерполяции определим коэффициенты C_{y_a} и C_{x_a}, соответствующие α_i. Рассмотрим три варианта номера it.

Точка с номером it не является номером начального и конечного элементов массива α:

$$C_{y_a i}=C_{y_a}\left(it-1\right)+DA_i\left(C_{y_a}\left(it\right)-C_{y_a}\left(it-1\right)\right);$$

$$C_{x_a i}=C_{x_a}\left(it-1\right)+DA_i\left(C_{x_a}\left(it\right)-C_{x_a}\left(it-1\right)\right),$$

где

$$DA_i=\frac{\alpha_i-\alpha_i\left(it-1\right)}{\alpha_i\left(it\right)-\alpha_i\left(it-1\right)}.$$

Точка с номером it соответствует крайней точке массива с номером 1:

$$C_{y_a i}=C_{y_a}\left(1\right)+DA_{1i}\left(C_{y_a}\left(2\right)-C_{y_a}\left(1\right)\right);$$

$$C_{x_a i}=C_{x_a}\left(1\right)+DA_{1i}\left(C_{x_a}\left(2\right)-C_{x_a}\left(1\right)\right),$$

где

$$DA_{1i}=\frac{\alpha_i-\alpha_i\left(1\right)}{\alpha_i\left(2\right)-\alpha_i\left(1\right)}.$$

Точка с номером *it* соответствует крайней точке массива с номером $n_{\text{табл}}$:

$$C_{y_a i} = C_{y_a}\left(n_{\text{табл}}\right) + DA_{2i}\left(C_{y_a}\left(n_{\text{табл}}\right) - C_{y_a}\left(n_{\text{табл}} - 1\right)\right);$$

$$C_{x_a i} = C_{x_a}\left(n_{\text{табл}}\right) + DA_{2i}\left(C_{x_a}\left(n_{\text{табл}}\right) - C_{x_a}\left(n_{\text{табл}} - 1\right)\right),$$

где

$$DA_{2i} = \frac{\alpha_i - \alpha_i\left(n_{\text{табл}}\right)}{\alpha_i\left(n_{\text{табл}}\right) - \alpha_i\left(n_{\text{табл}} - 1\right)}.$$

Здесь для крайних точек массива угла атаки α проводится экстраполяция по касательным к точечным кривым.

Квадрат проекции относительной скорости ветра на плоскость профиля $W^2_{\text{проф}}$, деленный на квадрат скорости ветра V_1^2 в миделевом сечении:

$$Z^2_{bb_i} \equiv \left(\frac{W^2_{\text{проф}}}{V_1^2}\right)_i = (Z_b \overline{r_k} + \cos\theta_i)^2 + \sin^2\theta_i \cos^2\delta_k.$$

Коэффициенты компонент аэродинамических сил, действующих на профиль в направлении хорды профиля и нормали к ней (в плоскости профиля), такие:

$$C_{t_i} = -C_{y_a i}\sin\alpha_i + C_{x_a i}\cos\alpha_i;$$

$$C_{n_i} = C_{y_a i}\cos\alpha_i + C_{x_a i}\sin\alpha_i.$$

Коэффициент вспомогательной быстроходности

$$Z = Z_b \frac{1 + \overline{V}_2}{2},$$

где

$$\overline{V}_2 = \frac{1 - G}{1 + G},$$

Для прямых вертикальных лопастей (угол наклона лопастей $\delta = 0$) коэффициент мощности вычисляется по интегралу

$$C_P = \frac{i_{\text{л}}\overline{b}\left(1 + \overline{V_2}\right)^3 Z_b}{32\pi}\int_0^{2\pi}\left(-\frac{W^2_{\text{проф}}}{V_1^2}\overline{r}\, C_t\right)d\theta, \qquad (2)$$

где $i_{\text{л}}$ – количество лопастей; $\overline{b}$ – относительная хорда профиля в долях наружного радиуса, о. е.; $\overline{V_2}$ – относительная скорость вниз по потоку, о. е.; Z_b – вспомогательная быстроходность; $\overline{r}$ – относительный радиус; C_t – коэффициент аэродинамических сил, действующих в направлении хорды профиля; θ – азимутальный угол.

Коэффициент момента связан с коэффициентом мощности соотношением

$$C_{\text{м}} = \frac{C_P}{Z}.$$

Определяем точку пересечения точечной кривой $C_P(Z)$ с осью абсцисс (если последняя точка лежит выше оси абсцисс, то экстраполируем последний участок кривой с помощью прямой). Назовем абсциссу точки пересечения $Z_{\max}$:

$$Z_{\max} = Z_{n-1} - C_{P_{n-1}} \frac{\left(Z_n - Z_{n-1}\right)}{\left(C_{P_n} - C_{P_{n-1}}\right)},$$

где n и n – 1 – номера последней и предпоследней точек кривой $C_P = C_P(Z)$. Считая, что абсцисса рабочей точки лежит в интервале ($Z_{\text{опт}}$, $Z_{\max}$), где $Z_{\text{опт}}$ – абсцисса максимальной точки кривой $C_P(Z)$, задаемся некоторым положительным числом K_z, меньшим единицы, и определяем

$$Z_{\text{р.т}} = Z_{\text{опт}} + \left(Z_{\max} - Z_{\text{опт}}\right) K_z ,$$

где K_z обычно выбирают в пределах 0,15 … 0,3. Определяются номера точек кривой $C_P(Z)$, абсциссы которых образуют интервал, содержащий $Z_{\text{р.т}}$.

Пусть это будут номера k – 1 и k. Тогда с помощью линейной интерполяции ордината рабочей точки

$$C_{P_{\text{р.т}}} = C_{P_{k-1}} + \left(C_{P_k} - C_{P_{k-1}}\right) \frac{\left(Z_{\text{р.т}} - Z_{k-1}\right)}{\left(Z_k - Z_{k-1}\right)}.$$

Для прямых вертикальных лопастей по формуле (2) получаем

$$S = 4Rh = 4R^2\overline{h} = D^2\overline{h} ,$$

где

$$\overline{h} = \frac{h}{R},$$

отсюда

$$D = \sqrt{\frac{N}{Cp\dfrac{\rho V^3}{2}\overline{h}\eta_{\text{общ}}}}.$$

Частота вращения колеса, об/мин,

$$n_{\text{об}} = \frac{60 Z_{\text{р.т}} V}{D\pi}.$$

Хорда профиля лопасти постоянна по высоте лопасти. Задаем относительную хорду в долях радиуса колеса (для изогнутых лопастей – в долях максимального радиуса R):

$$b = \overline{b}R .$$

В результате использования данного алгоритма находим значения вектора геометрического параметра ротора X^*, который обеспечивает заданную мощность N.

Для решения поставленной оптимизационной задачи зададимся высотой лопасти, а на остальные параметры наложены ограничения: $b_{\min} \le b \le b_{\max}$ – длина хорды лопасти, $D_{\min} \le D \le D_{\max}$ – диаметр, $n_{\min} \le n \le n_{\max}$ – количество лопастей, $p = (p_1, p_2, \ldots, p_k)$, где p_i ($i = 1...k$) – вид профиля лопасти. Для каждого из этих параметров задается шаг: Δb, ΔD, Δn. С помощью дискретного перебора результатов расчёта выбираем те геометрические параметры, при которых достигается максимальная мощность N.

Пример. Зададимся высотой лопасти H = 8 м, а на остальные параметры наложим ограничения: $0{,}1 \le b \le 0{,}5$ м, $2 \le D \le 8$ м, $2 \le n \le 4$ шт., p = (NACA0006, NACA0009, NACA0012,

NACA0015, NACA0018, NACA0021). Зададим шаг для каждого параметра: Δb=0,1 м, ΔD = 0,5 м, Δn = 1 шт. Зададим значение момента трогания $M_{тр_{зад}}$ = 550 Н·м. В результате использования предложенного в работе алгоритма имеем следующие геометрические параметры ротора соответствующие максимальной мощности ВЭУ: длина хорды лопасти b = 0,5 м, диаметр D = 8 м, количество лопастей n = 3 шт., вид профиля лопасти – NACA0015, мощность N = 1138 Вт и момент трогания $M_{тр}$ = 531 Н·м.

Выводы. Предложенный алгоритм автоматизированного проектирования обеспечивает построение ВЭУ с наилучшими электрическими характеристиками при эксплуатации ВЭУ в условиях присутствия малых ветров со скоростью менее 5 м/с.

Список литературы

1. *Абрамовский Е. Р.* Аэродинамика ветродвигателей / Е. Р. Абрамовский, С. В. Городько, Н. В. Свиридов. – Д.: Днепр. гос. ун-т, 1987. – 219 с.
2. *Фатеев Е. М.* Ветродвигатели и ветротурбины / Е. М. Фатеев – М.: Сельхозгиз, 1957. – 544 с.
3. *Яковлев А. И.* Прогнозирование мощностных и моментных характеристик ветроколеса с вертикальной осью вращения и различными аэродинамическими профилями рабочих лопатей / А. И. Яковлев, М. А. Затучная, И. Г. Головчинер, А. А. Зайкин // Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразование энергии. – Х., 1997. – С. 111 – 115.
4. *Кравец А. С.* Характеристики авиационных профилей / А. С. Кравец – М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1939. – 213 с.
5. *Кривцов В. С.* Неисчерпаемая энергия: учеб.: в 4-х кн. Ветроэлектрогенераторы / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т ХАИ; Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т. – Кн.1. – 2003. – 400 с.
6. *Кривцов В. С.* Неисчерпаемая энергия: учеб.: в 4-х кн. Ветроэнергетика / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т ХАИ, Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т. – Кн.2. – 2004. – 519 с.

В. М. Синєглазов, С. С. Альошкін, А. В. Кульбака

Автоматизоване проектування вітроенергетичних установок з вертикальною віссю обертання

Розроблено алгоритм автоматизованого проектування вітроенергетичних установок з вертикальною віссю обертання, яка забезпечує досягнення максимальної потужності за мінімального моменту зрушення. Запропонований алгоритм базується на використанні імпульсной моделі вітроколеса з вертикальною віссю обертання.

V. M. Sineglazov, S. S. Aloshkin,A. V. Kulbaka

Computer-aided design wind turbines with vertical axis of rotation

An algorithm for automated design of wind turbines with vertical axis of rotation ensures achievement of maximum power with minimal moment of the pick-up. The proposed algorithm is based on a pulsed rotor model with a vertical axis of rotation.