



УДК 621.311.24

**МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВЕТРОТУРБИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ***С.Г. Обухов*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050 Томск, пр. Ленина, д. 30
Тел.: (3822) 564-210, факс: (3822) 563-501, e-mail: serob99@mail.ru

Заключение совета рецензентов: 20.02.11 Заключение совета экспертов: 24.02.11 Принято к публикации: 27.02.11

В статье рассматривается разработанный автором метод моделирования механических характеристик малых ветротурбин по данным их технической спецификации. Приводится подробное описание метода, пример его практического применения.

Ключевые слова: моделирование малых ветротурбин, аэродинамические и рабочие характеристики, математическая модель.

**METHOD OF SIMULATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF
SMALL WIND TURBINES***S.G. Obukhov*

National Research Tomsk Polytechnical University
30 Lenin str., Tomsk, 634050, Russia
Tel.: (3822) 564-210, fax: (3822) 563-501, e-mail: serob99@mail.ru

Referred: 20.02.11 Expertise: 24.02.11 Accepted: 27.02.11

In the article is considered a simulation method of mechanical characteristics of small wind turbine according to the data of their technical specification developed by the author. A detailed description of the method and a sample of its practical application are considered.

Keywords: simulation of small wind turbines, aerodynamic and performance characteristics, mathematical model.

Введение

При решении разнообразных технических задач, связанных с проектированием, исследованием рабочих режимов, оптимизацией параметров, технико-экономическим обоснованием использования ветроэнергетических установок (ВЭУ) и т.п., в настоящее время широко применяются методы математического моделирования. При этом важной составной частью комплексной модели ВЭУ является математическая модель ветротурбины, для построения которой большинство исследователей используют семейство ее механических характеристик.

Механические характеристики ветротурбины представляют собой функциональные зависимости

выходной механической мощности P_m и момента M_m от оборотов ветроколеса n при различных скоростях ветрового потока V и позволяют проводить исследования ее рабочих режимов в статике. Дополнив их уравнением движения ветроколеса, получаем полную динамическую модель ветротурбины, математическую запись которой можно представить в следующем виде:

$$P_m = f(V, n); \quad M_m = \frac{P_m}{\omega}; \quad J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_g, \quad (1)$$

где ω – угловая частота вращения ветроколеса; J – момент инерции ветродвигателя; M_g – механический момент ветрогенератора.

Механические характеристики ветротурбины определяются аэродинамическими параметрами ветроколеса, которые зависят от числа и формы лопастей, их положения в потоке ветра, а также используемой в ВЭУ системе аэродинамического регулирования.

В большинстве математических моделей ветротурбин, представленных в российских и зарубежных источниках [1, 2, 3], аэродинамические параметры ветроколеса изображаются в виде эмпирических зависимостей, определенных для конкретной модели ВЭУ по данным продувок в аэродинамической трубе или по результатам опытной эксплуатации. Данный подход позволяет получить достаточно качественную модель ветротурбины, однако для его практической реализации необходимо иметь данные об аэродинамических характеристиках ветроколеса, которые отсутствуют в технической спецификации. Применяемые методы моделирования не являются универсальными, так как не позволяют решать задачи построения математических моделей серийно выпускаемых ветротурбин, используя в качестве исходных данных только технические сведения, приведенные в паспорте на электроустановку.

Целью исследований является разработка универсального метода математического моделирования механических характеристик малых ветротурбин крыльчатого типа с горизонтальной осью вращения по данным их технической спецификации.

Исследования проведены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» по направлению «Новые и возобновляемые источники энергии».

Описание метода

В основу предлагаемого метода моделирования положена теория реального ветродвигателя профессора Г.Х. Сабинина [4] и результаты проведенных им экспериментальных исследований ветротурбин малой мощности.

Методика построения механических и аэродинамических характеристик

Механические характеристики ветродвигателя $P_m = f(V, n)$ получают из его аэродинамической характеристики $C_p = f(Z)$, задавая значениями быстроходности Z от нуля до синхронной Z_0 . Определив соответствующие заданному числу модулей Z коэффициенты использования энергии ветра C_p , значения выходной механической мощности ветроколеса P_m можно рассчитать по выражению

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3, \quad (2)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; R – радиус ветроколеса, м.

Обороты ротора ветроколеса n связаны с быстроходностью Z и скоростью ветра V следующим соотношением:

$$n = \frac{30ZV}{\pi R}. \quad (3)$$

Анализ аэродинамических характеристик ветродвигателей с горизонтальной осью вращения, полученных эмпирическим путем, позволяет сделать вывод о том, что все они имеют подобную форму и могут быть с хорошей точностью аппроксимированы с помощью двух парабол – квадратичной и кубической [5]. Правая ветвь характеристики $C_p = f(Z)$ аппроксимируется квадратичной параболой с вершиной в точке A (рис. 1) и определяет численные значения C_p в пределах быстроходности от нормальной Z_n до синхронной Z_0 ($Z_n \leq Z \leq Z_0$):

$$C_p = C_{p_max} - \frac{C_{p_max}}{(Z_0 - Z_n)^2} (Z - Z_n)^2, \quad (4)$$

где C_{p_max} – максимальный коэффициент использования энергии ветра.

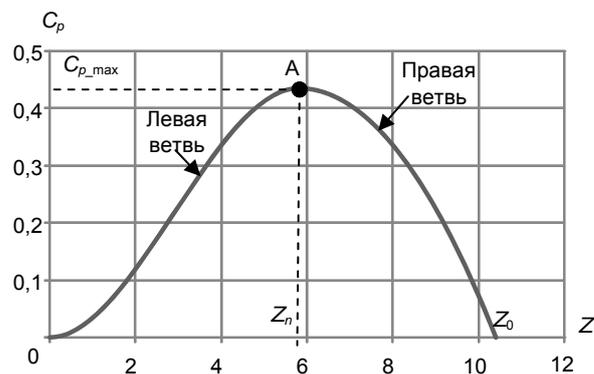


Рис. 1. Типичная аэродинамическая характеристика ветротурбины с горизонтальной осью вращения
Fig. 1. Typical aerodynamic characteristic of horizontal-axis wind turbine

Левая ветвь аэродинамической характеристики соответствует значениям быстроходности $Z \leq Z_n$ и может быть аппроксимирована кубической параболой:

$$C_p = C_{p_max} \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^2 \left[-2 \left(\frac{Z}{Z_n} \right) + 3 \right]. \quad (5)$$

Численные значения Z_n , Z_0 и C_{p_max} , входящие в выражения (4) и (5), зависят от параметра σ_{per} , который представляет собой суммарную относительную хорду профилей на периферии ветроколеса и связан с шириной кончика лопасти b_{per} и числом лопастей i соотношением

$$\sigma_{per} = \frac{i b_{per}}{R}. \quad (6)$$

Зависимости σ_{per} от Z_n и Z_0 от σ_{per} достаточно точно аппроксимируются выражениями [5]

$$\sigma_{per} = \frac{Z_n - 18,58}{30,78 - 12,74Z_n}; \quad (7)$$

$$Z_0 = \frac{188,93\sigma_{per} + 20,62}{28,22\sigma_{per} - 1}. \quad (8)$$

Для построения реальной аэродинамической характеристики конкретной ветротурбины необходимо определить численные значения C_{p_max} , Z_n и Z_0 .

Анализ рабочей характеристики ВЭУ

Предлагаемый метод моделирования основан на допущениях, что углы заклинивания лопастей малых ветротурбин остаются неизменными вплоть до номинальной скорости ветра V_{nom} , а нормальная быстроходность ветроколеса Z_n соответствует максимально возможному для данного профиля лопасти коэффициенту использования энергии ветра C_{p_max} .

Для нахождения численного значения C_{p_max} нужно по имеющейся в технической спецификации рабочей характеристике ВЭУ $P_{wt} = f(V)$ построить в тех же осях графическую зависимость коэффициента использования энергии ветра C_p от скорости набегающего на ветроколесо воздушного потока V (рис. 2), рассчитав ее по выражению

$$C_p = \frac{2P_{wt}}{\eta_{wt} \rho \pi R^2 V^3}, \quad (9)$$

где η_{wt} – полный коэффициент полезного действия ветродвигателя (с учетом КПД генератора и трансмиссии); P_{wt} – выходная электрическая мощность ВЭУ (Вт).

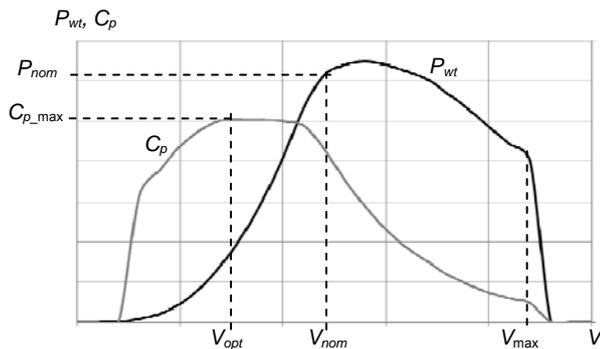


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования энергии ветра, полученная из рабочей характеристики ВЭУ
Fig. 2. Dependence of the wind energy efficiency obtained from performance characteristic of wind mill

По построенному графику определяется значение оптимальной скорости ветра V_{opt} , соответствующее нормальной быстроходности Z_n , номинальная выходная электрическая мощность P_{nom} и номинальная скорость ветра V_{nom} , которые обычно

соответствуют точке начала аэродинамического регулирования (точка перегиба кривой мощности), и максимальная рабочая скорость ветра V_{max} , при которой ветродвигатель останавливают.

Расчет аэродинамических параметров

Величина коэффициента использования энергии ветра C_p в режиме нормальной быстроходности определяется коэффициентом торможения воздушного потока e , обратным качеством крыла μ и величиной нормального числа модулей Z_n . Все эти величины являются взаимозависимыми, и их прямое аналитическое определение невозможно.

Для количественной связи неизвестных параметров используются формулы для расчета потерь ветроколеса.

В ветродвигателях выделяют четыре группы потерь. Для удобства вычислений расчетные формулы для определения потерь ветродвигателей выражены в отвлеченных единицах, для чего в обозначениях введены горизонтальные черточки сверху.

1. *Концевые потери* – это потери, которые возникают за счет образования вихрей, сходящих с концов лопастей:

$$\overline{P}_j = \frac{e}{1-e} \left[\frac{8\sqrt{1+(1-e/Z)^2}}{(1+e)iZ} - \frac{1}{\sqrt{1+(iZ/\pi(1-e/2))^2}} \right]. \quad (10)$$

2. *Профильные потери* – это потери, которые вызываются трением струй воздуха о поверхность крыла и зависят только от профиля лопастей:

$$\overline{P}_p = 2\mu \left[\frac{1-e}{Z} + \frac{Z}{3(1-e)} \right]. \quad (11)$$

3. *Потери на кручение струи* за ветряком равны живой силе тангенциальных скоростей уходящей струи:

$$\overline{P}_s = \frac{C_{pi} \eta^2}{2Z^2} \ln \frac{R}{r_0}. \quad (12)$$

4. *Потери поверхности*, происходящие вследствие неполного использования всей ометаемой площади ветроколеса:

$$\overline{P}_s = (r_0/R)^2, \quad (13)$$

где r_0 – расстояние от оси ветроколеса до начала лопасти (м).

Приведем основные уравнения для определения некоторых величин, входящих в выражения (10)-(13).

Коэффициент торможения воздушного потока e определяется по формуле:

$$e = v_1/V, \quad (14)$$

где v_1 – потеря скорости воздушного потока в сечении ветроколеса; V – набегающая на ветроколесо скорость ветра.

Обратное качество крыла μ определяется как отношение коэффициента лобового сопротивления C_x к коэффициенту подъемной силы C_y :

$$\mu = C_x / C_y. \quad (15)$$

Обратное качество крыла современных лопастей ветродвигателей находится в диапазоне от 0,01 до 0,04. Меньшие значения соответствуют быстроходным установкам; для тихоходных многолопастных двигателей качество крыла не столь существенно, в связи с чем требования к аэродинамическому качеству профиля являются не столь жесткими.

Идеальный коэффициент использования энергии ветра по Г.Х. Сабину определяется следующим выражением:

$$C_{pi} = 4e \frac{1-e}{1+e}. \quad (16)$$

Относительный коэффициент полезного действия ветроколеса (средний для всего радиуса) выражается следующей формулой:

$$\eta = \frac{1-\mu Z_u}{Z_u + \mu} Z_u, \quad (17)$$

где $Z_u = \operatorname{ctg} \beta \cong \frac{Z}{1-e}$ – число относительных модулей; β – угол между плоскостью вращения ветроколеса и направлением воздушного потока, набегающего на крыло (град).

При вычислении выражений (12), (13) значения радиусов ветроколеса можно подставлять в относительных единицах. Если величина r_0 точно неизвестна (обычно $r_0 \approx 0,2R$), то ее приближенно можно определить по фотографии ветродвигателя.

Полезная механическая мощность, развиваемая ветродвигателем, определяется за вычетом потерь из мощности идеального ветроколеса P_i :

$$P_m = P_i [1 - \overline{P}_j - \overline{P}_p - \overline{P}_{ts} - \overline{P}_s]. \quad (18)$$

Так как потери мощности в ветродвигателе выражены в относительных единицах, выражение (18) можно использовать и для определения реального коэффициента использования энергии ветра ветроколесом:

$$C_p = C_{pi} [1 - \overline{P}_j - \overline{P}_p - \overline{P}_{ts} - \overline{P}_s]. \quad (19)$$

Зафиксировав численное значение μ , произвольно выбранное из его возможного диапазона изменения, и решив оптимизационную задачу на максимум по определению C_p , искомыми переменными в которой являются e и Z_n , можно определить максимальное значение коэффициента использования энергии ветра:

$$C_p = f(e, Z_n) \Rightarrow \max \text{ при } \mu = \text{const}. \quad (20)$$

Для расчета используются выражения (10)-(13), (16), (17) и (19).

Если полученное в результате решения оптимизационной задачи численное значение C_p не совпадает со значением $C_{p, \max}$, определенным по графику (рис. 2), величину μ нужно изменить и повторить расчеты.

Конечным результатом решения задачи являются численные значения Z_n , e и μ , определенные по данным технической спецификации ветроколеса.

Расчет и построение механических характеристик

По известным численным значениям $C_{p, \max}$ и Z_n с использованием выражений (7), (8) и (4), (5) определяется действительная аэродинамическая характеристика моделируемого ветродвигателя, после чего можно построить семейство его механических характеристик.

Механические характеристики ветротурбины строятся индивидуально для каждого из трех возможных режимов работы ветродвигателя, которые необходимо предварительно определить по данным технической спецификации.

1. При скоростях ветра меньше номинальной $V < V_{\text{ном}}$ рабочие характеристики строятся прямым пересчетом действительной аэродинамической характеристики ветродвигателя с использованием выражений (2) и (3).

2. В области регулирования ветродвигателя ($V_{\text{ном}} < V < V_{\text{max}}$) для каждой расчетной скорости ветра предварительно необходимо определить угол отклонения γ оси вращения ветроколеса от направления ветра (или угол установки профиля лопасти), а затем рассчитать соответствующие им рабочие характеристики.

3. Для защиты ВЭУ от механических повреждений при скоростях ветра больше максимальной рабочей скорости $V > V_{\text{max}}$ ветродвигатель останавливают, соответственно, $P_m = 0$.

Необходимость учета рабочего режима ВЭУ определяется тем обстоятельством, что при скоростях ветра больше номинальной производители ветроустановок применяют разнообразные системы регулирования ветроколеса, обеспечивающие сохранность электроустановки и рациональную выработку электрической энергии.

Надо отметить, что с целью максимального упрощения конструкции и снижения стоимости большинство производителей не используют в малых ВЭУ системы активного регулирования, характерные для энергоустановок большой мощности, в которых регулирование оборотов ротора производится за счет изменения угла установки лопастей электрическим или гидравлическим приводом.

В малой ветроэнергетике для регулирования ветродвигателей используют регуляторы, которые изменяют угол установки лопастей под действием центробежных сил, и системы регулирования, у которых изменение положения лопастей или всего ветроколеса производится под действием силы ветра.

В качестве примера рассмотрим систему регулирования, в которой стабилизация выходной мощности ВЭУ производится за счет увода ротора в косой поток при помощи боковой «лопаты», размещенной на головке ветродвигателя за ветроколесом, или за счет смещения оси вращения ветроколеса от вертикальной оси поворота головки ветряного двигателя.

Данные системы регулирования обеспечивают относительно невысокую точность стабилизации частоты вращения (погрешность до 20-30%), однако их отличает максимальная простота и высокая надежность благодаря применению неповоротных лопастей. Кроме того, эта система регулирования обеспечивает автоматическую буревую защиту, так как при больших скоростях ветра ротор ветроколеса разворачивается на 90 градусов и останавливается.

Экспериментальными исследованиями Г.Х. Сабина устанавлено, что выходная мощность ветротурбины P_m при выводе ее из-под ветра изменяется пропорционально кубу косинуса угла γ отклонения оси вращения ветроколеса от направления воздушного потока:

$$P_m = P_{m\gamma=0} \cos^3 \gamma; C_p = C_{p\gamma=0} \cos^3 \gamma. \quad (21)$$

Обозначив $P_{mn} = P_{m\gamma=0}$ и $C_{pn} = C_{p\gamma=0}$, получим

$$P_m = P_{mn} \cos^3 \gamma. \quad (22)$$

Кроме того, экспериментальные исследования показали, что кривая $\cos \gamma$ практически совпадает с кривой зависимости синхронной быстроходности ветроколеса Z_0 от угла γ , то есть можно считать:

$$Z_0 = Z_{0n} \cos \gamma. \quad (23)$$

При постоянной скорости ветра быстроходность Z изменяется пропорционально угловой скорости ветроколеса ω , соответственно:

$$\omega = \omega_n \cos \gamma; n = n_n \cos \gamma. \quad (24)$$

Для обеспечения постоянства частоты вращения ветроколеса ω и механической мощности P_m при скоростях ветра V больше номинальной V_{nom} систему регулирования ветротурбин стремятся спроектировать таким образом, чтобы ветродвигатель разворачивался на такой угол γ , при котором выполняется условие

$$P_m = P_{mn} \frac{V^3}{V_{nom}^3}. \quad (25)$$

С учетом выражения (22) получим

$$\cos \gamma = \frac{V_{nom}}{V}. \quad (26)$$

Отметим, что аэродинамические характеристики ветродвигателей, оснащенных центробежными регуляторами, практически идентичны рассмотренным выше, с той лишь разницей, что строятся они

не в зависимости от угла разворота ветроколеса, а от угла установки профиля лопасти. Это позволяет использовать одни методы для моделирования ветротурбин с различными системами регулирования.

Если стабилизация частоты вращения моделируемой ВЭУ в области регулирования осуществляется с погрешностью ($n \neq \text{const}$, $P_m \neq \text{const}$), то при неизменных коэффициентах полезного действия генератора и мультипликатора для определения значений $\cos \gamma$ можно использовать следующее выражение:

$$\cos \gamma = \sqrt[3]{P_{wt}/P_{wtn}} \frac{V_n}{V}, \quad (27)$$

где V , P_{wt} – текущие значения скорости ветра и соответствующей ей выходной мощности ВЭУ, определенные по рабочей характеристике; V_n , P_{wtn} – значения скорости ветра и мощности, соответствующие точке начала регулирования (обычно $V_n = V_{nom}$, $P_{wtn} = P_{nom}$).

Расчет механических характеристик ветротурбины в зоне регулирования в этом случае следует проводить по выражениям

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \cos^3 \gamma; \quad (28)$$

$$n = \frac{30ZV}{\pi R} \cos \gamma \quad (29)$$

В качестве примера на рис. 3 представлены механические характеристики ветротурбины ВЭУ-2000 номинальной мощностью $P_{wt} = 1500$ Вт, полученные по предлагаемому методу моделирования.

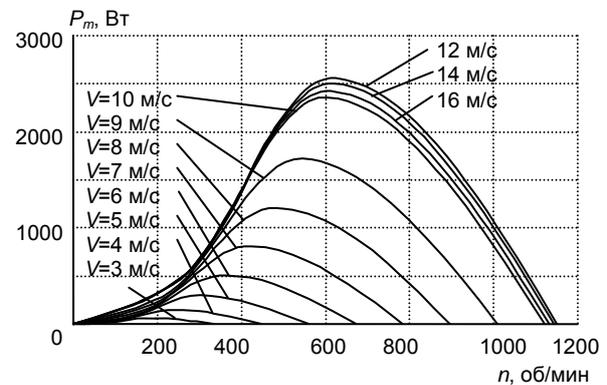


Рис. 3. Семейство механических характеристик ветротурбины ВЭУ-2000

Fig. 3. Family of mechanical characteristics of the wind turbine of wind mill-2000

Для практического использования полученных результатов рабочие характеристики ветротурбины необходимо представить в виде численных массивов, обработка которых при помощи специализированных инструментальных средств прикладных математических программ (например, Matlab) позволяет получить полноценную математическую модель.

Заключение

Предлагаемый метод моделирования малых ветротурбин был протестирован на ряде ВЭУ различного типоразмера и с разным числом лопастей и показал удовлетворительные результаты. Результаты моделирования хорошо согласуются с теоретической аэродинамикой и не противоречат экспериментальным характеристикам современных ветродвигателей.

Предлагаемый метод моделирования достаточно прост в использовании, при этом в нем учитываются конструктивные и геометрические особенности моделируемых ветродвигателей, что выгодно отличает его от аналогов.

Основным инструментом исследования сложных технических систем в настоящее время является математическое моделирование, соответственно, представленный выше метод может найти практическое применение в малой ветроэнергетике при проведении разнообразных научных исследований, связанных с оптимизацией режимов работы ветроэнергетических установок.

Список литературы

1. Gyulai F. Mathematical models for dynamic study of wind turbines. Proceedings of the 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timisoara, Romania, October 21–22, 2004, P. 287–290.
2. Neammanee B., Sirisumrannukul S., Chatratana S. Development of a wind turbine simulator for wind generator testing // International Energy Journal 8 (2007). P. 21–28.
3. Boukhezzar B., Siguerdidjane H. Nonlinear control of variable speed wind turbines without wind speed measurement. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005 Seville, Spain, December 12–15, 2005. TuB21.4, P. 3456–3461.
4. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. М.: Сельхозгиз, 1948.
5. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т (ХАИ); Севастополь: Севастоп. нац. техн. ун-т, 2004.