

УДК 539.6: 621 548

Е. Р. Абрамовский**, С. В. Тарасов*, И. Ю. Костюков*, Н. Н. Лычагин**

**Институт транспортных систем и технологий «Трансмаг» НАН Украины*

***Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

РАСЧЕТ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ С КРИВОЛИНЕЙНЫМИ ЛОПАСТЯМИ

У даній роботі розрахована методика, представлена раніше в [1], застосована в параметричних розрахунках основних характеристик функціонування ортогональних вітродвигунів. Основна увага приділена аналізу впливу форми лопатів із криволінійною геометричною віссю на характеристики гелікоїдальних роторів. Представлено розрахункові дані для коефіцієнта потужності й коефіцієнта моменту в широкому діапазоні зміни значень геометричних параметрів. Отримані дані використовуються для порівняння характеристик і кількісної оцінки параметрів функціонування роторів із криволінійними лопатями.

Ключові слова: вітродвигун, ротор, гелікоїд, лопать, коефіцієнт потужності, коефіцієнт моменту.

В данной работе расчетная методика, представленная ранее в [1], применена в параметрических расчетах основных характеристик функционирования ортогональных ветродвигателей. Основное внимание уделено анализу влияния формы лопастей с криволинейной геометрической осью на характеристики геликоидальных роторов. Представлены расчетные данные для коэффициента мощности и коэффициента момента в широком диапазоне изменения значений геометрических параметров. Полученные данные могут быть использованы для сравнения характеристик и количественной оценки параметров функционирования роторов с криволинейными лопастями.

Ключевые слова: ветродвигатель, ротор, лопасть, геликоид, коэффициент мощности, коэффициент момента.

In a given work the calculation technique, which is presented earlier in [1], is applied to parametric investigation of basic characteristics of vertical axis wind turbines. The main attention is paid to analysis of the influence of curvilinear axis blade shape on the parameters of helicoidal rotors. The power and torque coefficients are obtained for the wide variety of geometrical characteristics of the considered blade shapes. The obtained data can be useful for comparative analysis of rotors having curvilinear blade.

Keywords: wind turbine, rotor, helicoidal blade, power coefficient, torque coefficient.

В научно-технической литературе по аэродинамике ветродвигателей увеличивается количество работ, посвященных ортогональным ветроустановкам средней и малой мощности. Среди них возрастает доля установок, использую-

ших роторы Дарье с лопастями геликоидальной формы. Фирмы-изготовители предлагают различные конструктивные варианты упомянутых ветродвигателей, к примеру, такие как установка *qr5* производства британской компании Quiet Revolution (рис. 1,*а*), многочисленные и активно рекламируемые ветродвигатели американской компании Urban Green Energy (рис. 1,*б*), а также продукты китайской фирмы TYPMAR Wind Energy Technology Co., Ltd (рис. 1,*в*).

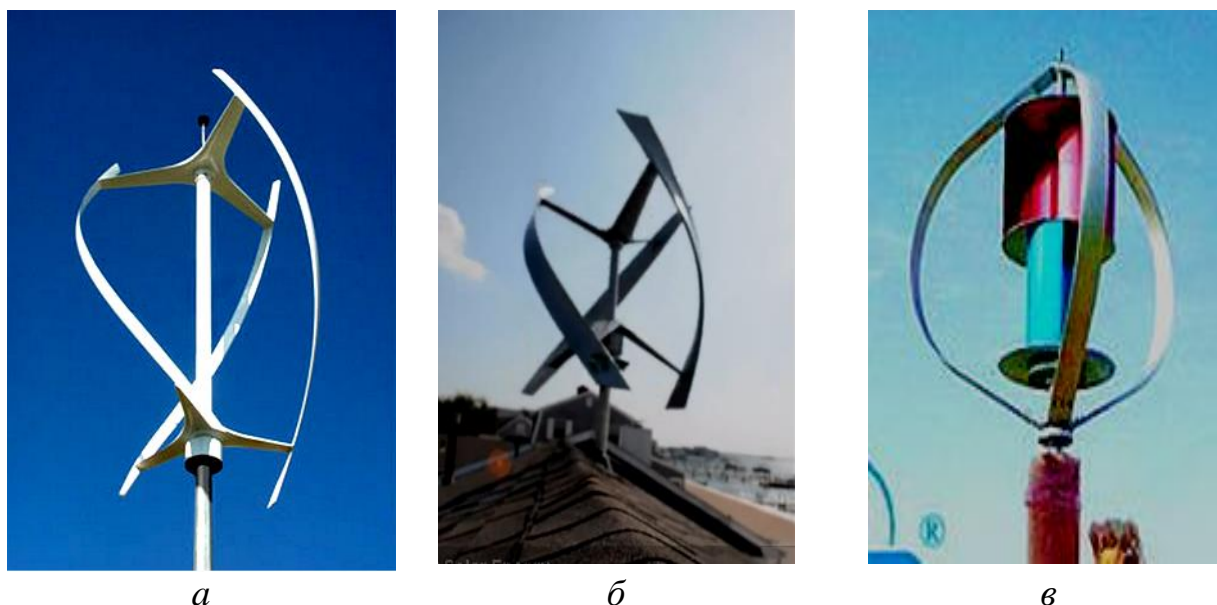


Рис. 1. Роторы действующих ветроустановок с криволинейными лопастями:
а – ветряк британской компании Quiet Revolution; *б* – ветряк компании Urban Green Energy (US); *в* – ветряк китайской фирмы TYPMAR Wind Energy Technology Co., Ltd.(Cp)

Расчетные данные для параметров функционирования таких ветряков получены различными методами [2–4], однако представленные численные результаты связаны с различными геометрическими и аэродинамическими исходными данными. Это затрудняет их сопоставление для количественной оценки влияния формы лопастей и других геометрических параметров конструкции на основные характеристики работы роторов с криволинейными лопастями.

Данная работа дополняет исследования авторов, начатые в работе [1], содержит большое количество расчетных вариантов и их сравнительный анализ, что позволяет оценить аэродинамическую эффективность роторов рассматриваемого класса.

Методика расчета выбрана наиболее простой, ограниченной рамками импульсной теории с однотрубной схемой течения. Окончательные расчетные соотношения по определению основных безразмерных параметров работы ротора сводятся к следующим соотношениям.

Коэффициент мощности C_p и безразмерная скорость $\bar{V}_1 = V_1 / V_0$, средняя в рабочем сечении ротора, вычисляются по формулам, формально совпадающим с аналогичными соотношениями для классического ротора Дарье:

$$C_p(\lambda_1) = -\frac{\lambda\sigma}{2\pi\bar{S}_1} \int_0^1 \frac{\bar{r} \bar{V}_1^2}{\cos\gamma} d\bar{z} \cdot \int_0^{2\pi} \left(\frac{W}{V_1}\right)^2 C_{F_\mu} d\mu, \quad (1)$$

$$\bar{V}_1 = \frac{1}{1+G(\lambda_1)}, \quad (2)$$

где

$$G(\lambda_1) = \frac{\sigma}{8\pi\bar{S}_1} \int_0^1 \frac{d\bar{z}}{\cos\gamma} \int_0^{2\pi} \left(\frac{W}{V_1}\right)^2 C_{F_x} d\mu, \quad \lambda = \lambda_1 \bar{V}_1. \quad (3)$$

Здесь обозначено $\lambda_1 = \omega R_m / V_1$, $\lambda = \omega R_m / V_0$, $\bar{r} = r / R_m$, где R_m – наибольший радиус окружности вращения ротора (в среднем горизонтальном сечении), ω – частота вращения, γ – угол между касательной к оси лопасти и осью вращения ротора, $\sigma = 0,5lb / R_m$ – коэффициент заполнения ометаемой площади S_1 , $\bar{S}_1 = S_1 / (2R_m H)$, H – высота ротора.

Формулы для расчета коэффициента C_{F_μ} окружной и коэффициента C_{F_x} продольной сил F_μ и F_x , действующих на профиль лопасти, принимают соответственно вид

$$C_{F_\mu} = -C_T A_\delta + C_N A_{\beta\delta}, \quad C_{F_x} = C_T a - C_N a_\beta, \quad (4)$$

(F_x – сила в направлении свободного ветра).

В выражениях (4) обозначено

$$a = A \sin\mu + A_\delta \cos\mu, \quad a_\beta = A_\beta \sin\mu + A_{\beta\delta} \cos\mu. \quad (5)$$

В соотношении (4) C_T , C_N – коэффициенты продольной и нормальной компоненты аэродинамической силы:

$$C_T(\alpha) = C_x(\alpha) \cos\alpha - C_y(\alpha) \sin\alpha, \quad C_N(\alpha) = C_x(\alpha) \sin\alpha + C_y(\alpha) \cos\alpha. \quad (6)$$

В соотношении (5) C_x , C_y – коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы профиля лопасти в зависимости от угла атаки α .

Скорость движения воздуха W относительно подвижного профиля сводится к выражению

$$\frac{W}{V_1} = \frac{\sin\mu}{\cos\alpha} A + \frac{\cos\mu + \lambda_1 \bar{r}}{\cos\alpha} A_\delta, \quad \bar{b} = b / R. \quad (7)$$

Угол атаки определяется зависимостью:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{\sin \mu A_{\beta} + (\cos \mu + \lambda_1 \bar{r}) A_{\beta \delta}}{\sin \mu A + (\cos \mu + \lambda_1 \bar{r}) A_{\delta}}. \quad (8)$$

Влияние формы криволинейной лопасти проявляет себя только через коэффициенты, обозначенные здесь как $A, A_{\delta}, A_{\beta}, A_{\beta \delta}$. Расчетные соотношения для них приведены в работе [1] и связаны с уравнением геометрической оси лопасти. В безразмерных координатах это уравнение задается как уравнение линии, лежащей на винтовой поверхности:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= -\bar{r}(\bar{z}) \sin \theta, \quad \bar{y} = -\bar{r}(\bar{z}) \cos \theta, \\ \theta &= \theta_0 + \Delta \theta \cdot \bar{z}, \quad 0 \leq \bar{z} \leq 1. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь θ – текущая окружная координата профиля, а θ_0 – аналогичная координата для нижнего конца лопасти, $\Delta \theta$ – величина ее винтовой закрутки.

В данной работе для уравнения оси лопасти в меридиональной плоскости $\bar{r}(\bar{z})$ принято уравнение:

$$\bar{r}(\bar{z}) = \bar{R}_0 + 4(1 - \bar{R}_0)(\bar{z} - 0,5)^2, \quad \bar{R}_0 = R_0 / R_m, \quad (10)$$

где R_0 – радиус окружности вращения концов лопасти.

Для определения среднего значения коэффициента момента можно воспользоваться известным соотношением

$$C_m = C_p / \lambda. \quad (11)$$

Зависимость коэффициента вращающего момента одной лопасти от ее окружной координаты μ можно выразить как

$$C_m^{(k)}(\mu + \theta_0^{(k)}) = -\frac{HR\bar{b}}{S_1} \bar{V}_1^2 \int_0^1 \left(\frac{W}{V_1} \right)^2 \bar{r} C_{F\mu} \frac{d\bar{z}}{\cos \gamma}, \quad 0 \leq \mu \leq 2\pi. \quad (12)$$

В выражении (12) верхний индекс k указывает номер лопасти ротора в соответствии с угловой координатой $\theta_0^{(k)}$ положения ее нижнего конца.

Коэффициент момента $C_m(\mu)$ ротора, имеющего ℓ лопастей, получим, очевидно, как сумму:

$$C_m(\mu) = \sum_{k=1}^{\ell} C_m^{(k)}(\mu + \theta_0^{(k)}), \quad 0 \leq \mu \leq 2\pi. \quad (13)$$

Согласно приведенным соотношениям и уравнению (10), значения коэффициентов мощности $C_p(\lambda)$ и момента $C_m(\lambda)$ зависят от таких параметров, как σ , $\Delta \theta$. При переменном расстоянии от элементов лопасти до оси вращения к указан-

ным параметрам добавятся отношения R_0/R_m и R_m/H . Максимальное значение коэффициента мощности $C_{p\max}$ и значение коэффициента быстроходности λ_m , при котором это значение достигается, также будут зависеть от указанных параметров. Зависимость коэффициента вращающего момента $C_m(\mu)$ при фиксированном значении коэффициента λ , например, при $\lambda = \lambda_m$, кроме указанных величин зависит также от количества лопастей ℓ .

Для оценки влияния перечисленных параметров на основные характеристики ортогональной ветроустановки были рассмотрены расчетные варианты, в которых значения исходных данных варьировались в некоторых диапазонах. Коэффициент заполнения σ выбирался из промежутка $0,05 \leq \sigma \leq 0,35$, угол винтовой закрутки лопасти $\Delta\theta$ изменялся от 0° до 360° , радиус \bar{R}_0 принимал только два значения: $\bar{R}_0 = 1$ и $\bar{R}_0 = 0,5$, отношение R_m/H принято равным единице. Значение $\bar{R}_0 = 1$ соответствует лопасти, ось которой представляет собой отрезок винтовой линии (при $\Delta\theta=0$ получаем Н-ротор). Второе значение $\bar{R}_0 = 0,5$ дает лопасть параболической формы (при отсутствии закрутки). Она приближенно описывает некоторые конструкции ОВД, широко применяемые в ветроэнергетике. Аэродинамические коэффициенты C_x, C_y , в зависимости от углов атаки, брались для профиля NACA 0018 в диапазоне значений α от 0 до 180° [5]. Количество лопастей ℓ варьировалось от одной до трех.

В качестве дополнительного расчетного варианта рассматривался также двухъярусный Н-ротор с двумя парами лопастей, смещенных на 90° по окружной координате относительно друг друга. Такой вариант можно рассматривать как частный случай ротора с криволинейными лопастями, соответствующими уравнению (9), но при разрывной зависимости угла θ от координаты \bar{z} . Таковую функцию можно записать, например, в виде:

$$\theta(\bar{z}) = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq \bar{z} \leq 0,5, \\ \Delta\theta, & \text{при } 0,5 < \bar{z} \leq 1. \end{cases} \quad (14)$$

В рассматриваемом случае в (14) следует положить $\Delta\theta = \pi/4$.

Результаты выполненных расчетов показаны на рис. 2–14.

На рис. 2 представлены зависимости наибольшего значения коэффициента мощности $C_{p\max}$ от коэффициента заполнения σ при различных значениях угла закрутки лопасти $\Delta\theta$. Они относятся к ротору с винтовыми лопастями ($\bar{R}_0 = 1$). Аналогичные зависимости для лопасти параболической формы ($\bar{R}_0 = 0,5$) приведены на рис. 3. В первом случае графики показывают наличие максимума при определенных значениях параметров σ и $\Delta\theta$. Видно, что этот максимум практически не изменяется и остается вблизи значения $0,43$. Однако с увеличением угла закрутки это значение достигается при меньших величинах коэффициента заполнения. Для параболической лопасти указанный максимум выражен крайне слабо и заметен только при небольших углах закрутки ($\Delta\theta \leq 45^\circ$).

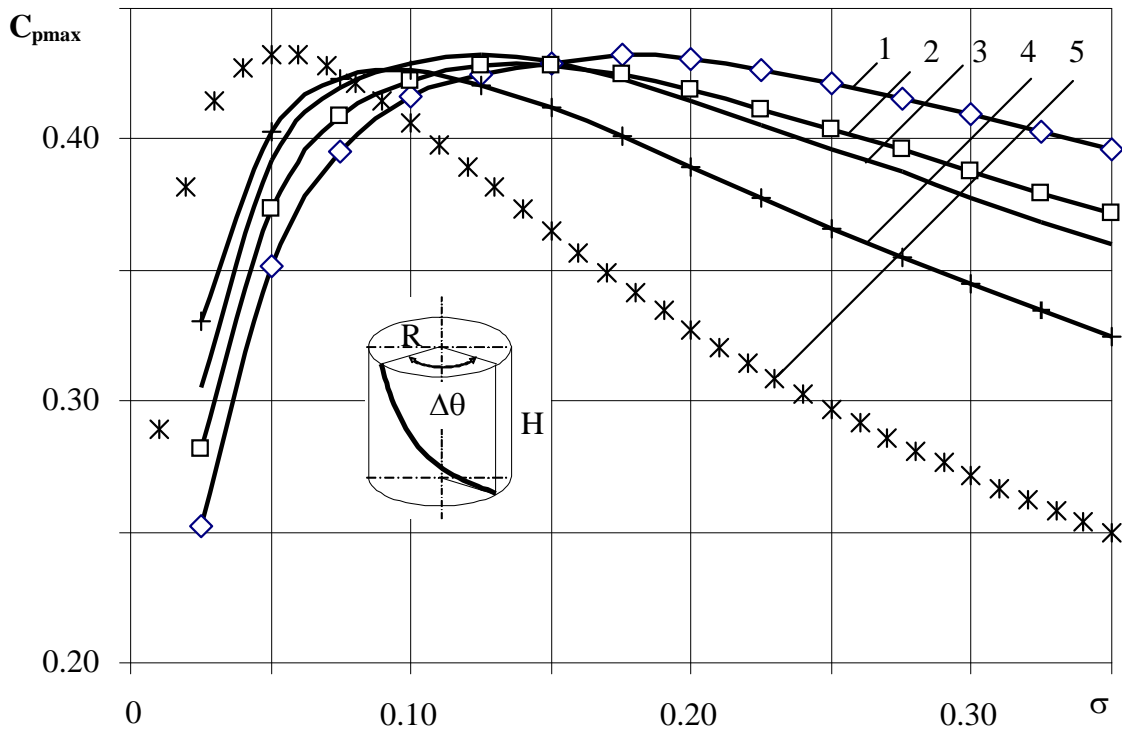


Рис. 2. Зависимости коэффициента мощности C_{pmax} от коэффициента заполнения σ в случае $R=const$:
 1 – $\Delta\theta = 0^\circ$; 2 – $\Delta\theta = 90^\circ$; 3 – $\Delta\theta = 120^\circ$; 4 – $\Delta\theta = 180^\circ$; 5 – $\Delta\theta = 360^\circ$

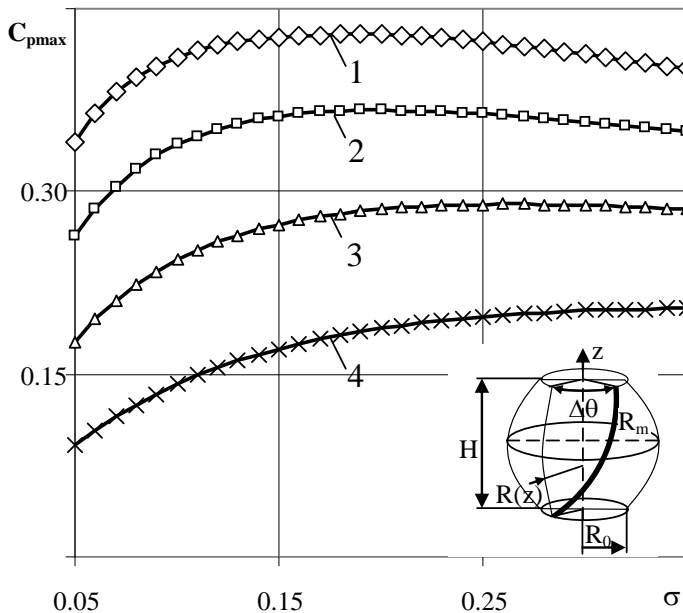


Рис. 3. Зависимости коэффициента мощности C_{pmax} от коэффициента заполнения σ в случае переменного радиуса R :
 1 – $\Delta\theta = 0^\circ$; 2 – $\Delta\theta = 30^\circ$; 3 – $\Delta\theta = 45^\circ$; 4 – $\Delta\theta = 60^\circ$

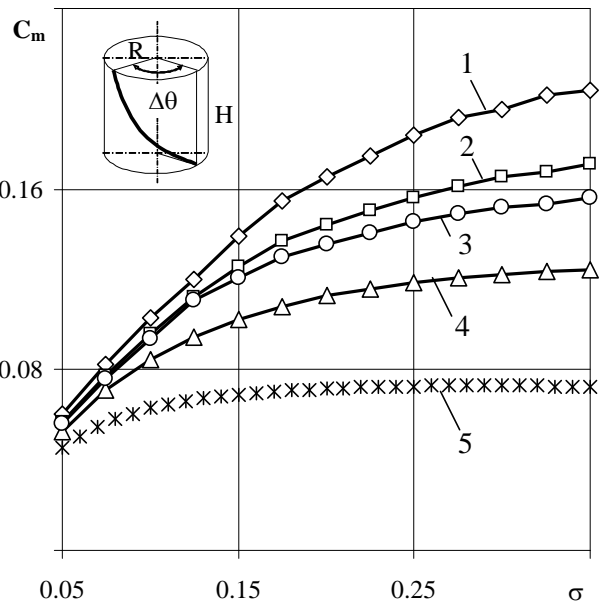


Рис. 4. Зависимости коэффициента крутящего момента C_m , при $\lambda=\lambda_m$ от коэффициента заполнения σ при различных углах закрутки $\Delta\theta$, ($R=const$):
 1 – $\Delta\theta = 0^\circ$; 2 – $\Delta\theta = 90^\circ$; 3 – $\Delta\theta = 180^\circ$;
 4 – $\Delta\theta = 120^\circ$; 5 – $\Delta\theta = 360^\circ$

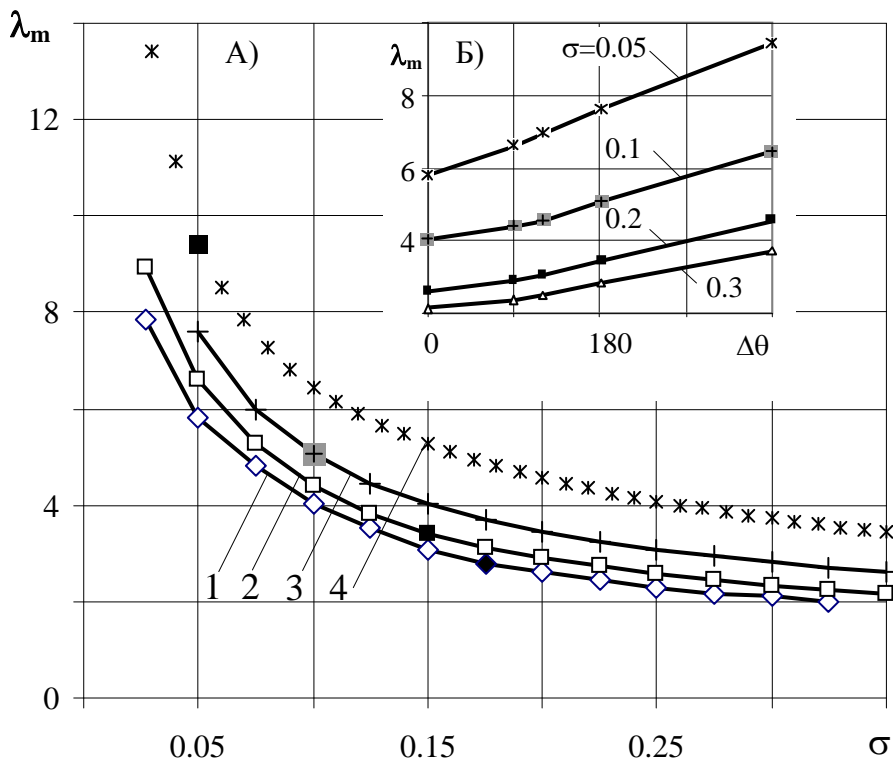


Рис. 5. Зависимости коэффициента быстроходности λ_m , при котором $C_p=C_{pmax}$, от коэффициента заполнения σ (А) и угла закрутки $\Delta\theta$ (Б) при $R=const$:
 1 – $\Delta\theta = 0^\circ$; 2 – $\Delta\theta=90^\circ$; 3 – $\Delta\theta = 180^\circ$; 4 – $\Delta\theta = 360^\circ$

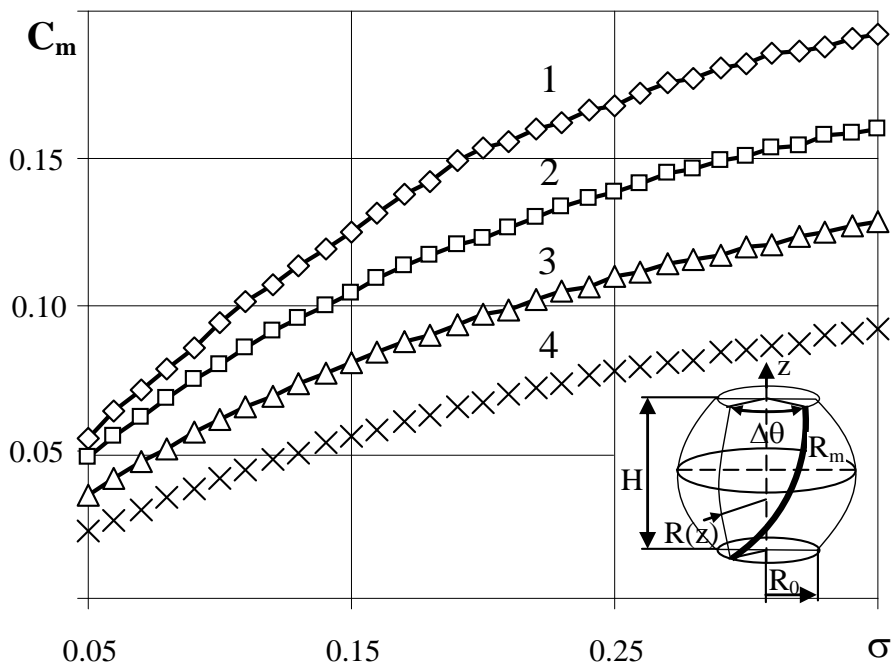


Рис. 6. Зависимости коэффициента момента C_m от коэффициента σ в случае переменного радиуса R ($R_m/R_0=0,5$):
 1 – $\Delta\theta = 0^\circ$; 2 – $\Delta\theta=30^\circ$; 3 – $\Delta\theta = 45^\circ$; 4 – $\Delta\theta=60^\circ$

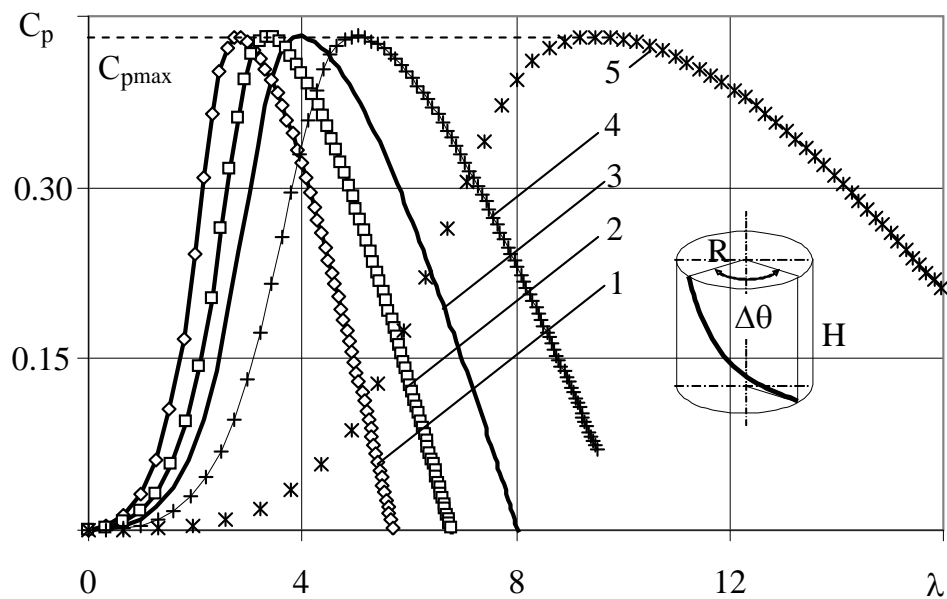


Рис. 7. Зависимости $C_p(\lambda)$ для значений параметров $\Delta\theta$ и σ , обеспечивающих наибольшее C_{pmax} , при $R=const$:
 1 – $\Delta\theta=0^\circ$, $\sigma=0,175$; 2 – $\Delta\theta=90^\circ$, $\sigma=0,15$; 3 – $\Delta\theta=120^\circ$, $\sigma=0,125$;
 4 – $\Delta\theta=180^\circ$, $\sigma=0,1$; 5 – $\Delta\theta=360^\circ$, $\sigma=0,05$

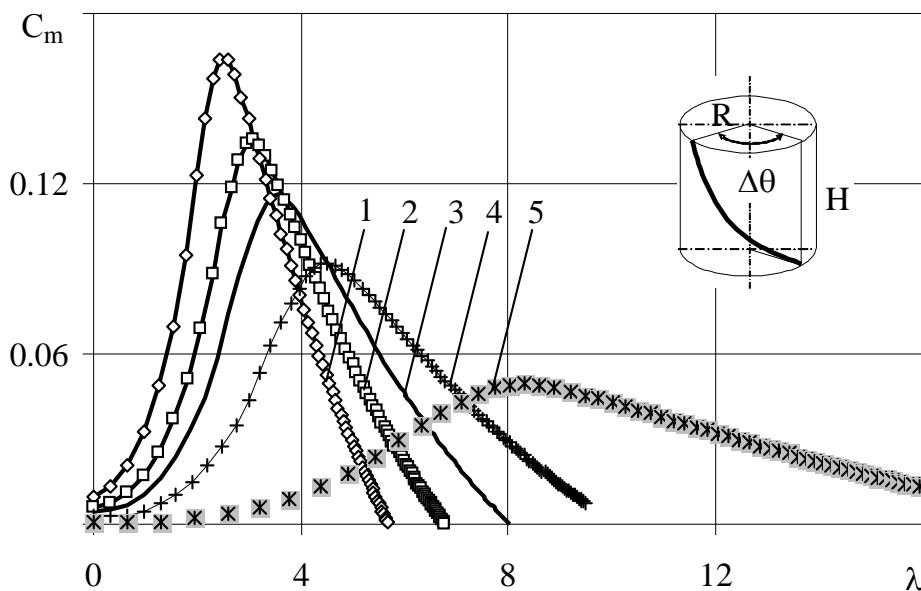


Рис. 8. Зависимости коэффициента крутящего момента от коэффициента быстроходности для выбранных значений параметров $\Delta\theta$ и σ , ($R=const$):
 1 – $\Delta\theta=0^\circ$, $\sigma=0,175$; 2 – $\Delta\theta=90^\circ$, $\sigma=0,15$; 3 – $\Delta\theta=120^\circ$, $\sigma=0,125$;
 4 – $\Delta\theta=180^\circ$, $\sigma=0,1$; 5 – $\Delta\theta=360^\circ$, $\sigma=0,05$

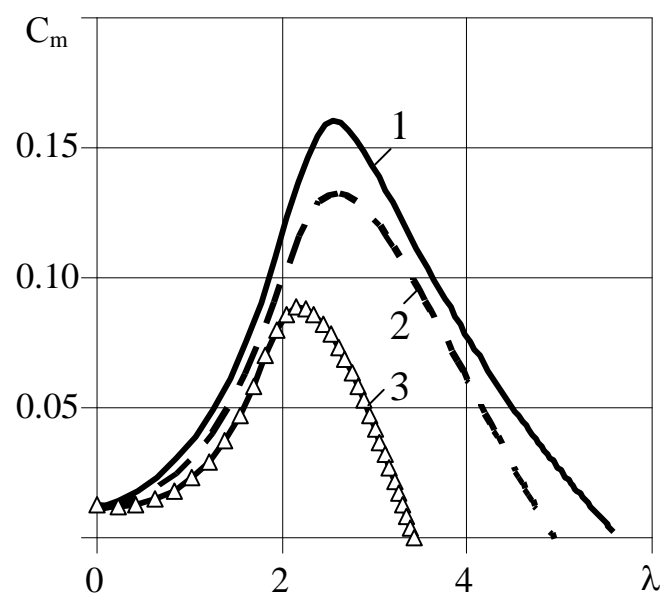
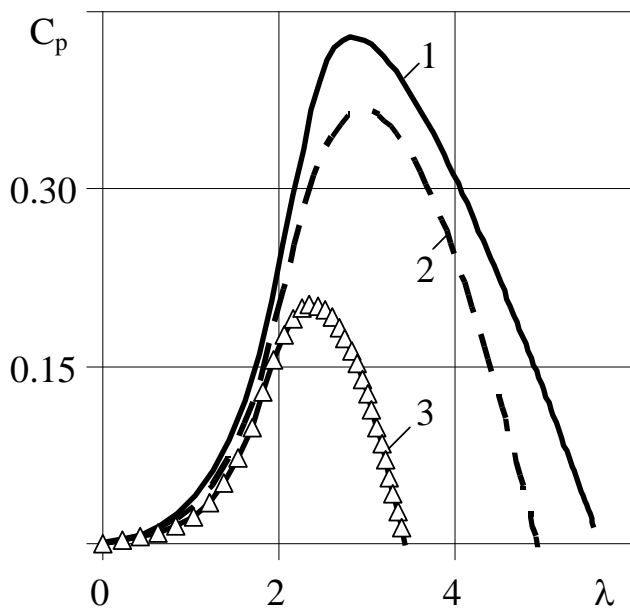


Рис. 9. Зависимости $C_p(\lambda)$ для значений $\Delta\theta$ и σ , доставляющих наибольшее C_{pmax} в случае

$R_m/R_0=0,5$:

1 – $\Delta\theta=0^\circ$, $\sigma=0,2$; 2 – $\Delta\theta=30^\circ$, $\sigma=0,2$;

3 – $\Delta\theta=60^\circ$, $\sigma=0,3$

Рис. 10. Зависимости $C_m(\lambda)$ для значений $\Delta\theta$ и σ , доставляющих наибольшее C_{pmax}

в случае $R_m/R_0=0,5$:

1 – $\Delta\theta=0^\circ$, $\sigma=0,2$; 2 – $\Delta\theta=30^\circ$, $\sigma=0,2$;

3 – $\Delta\theta=60^\circ$, $\sigma=0,3$

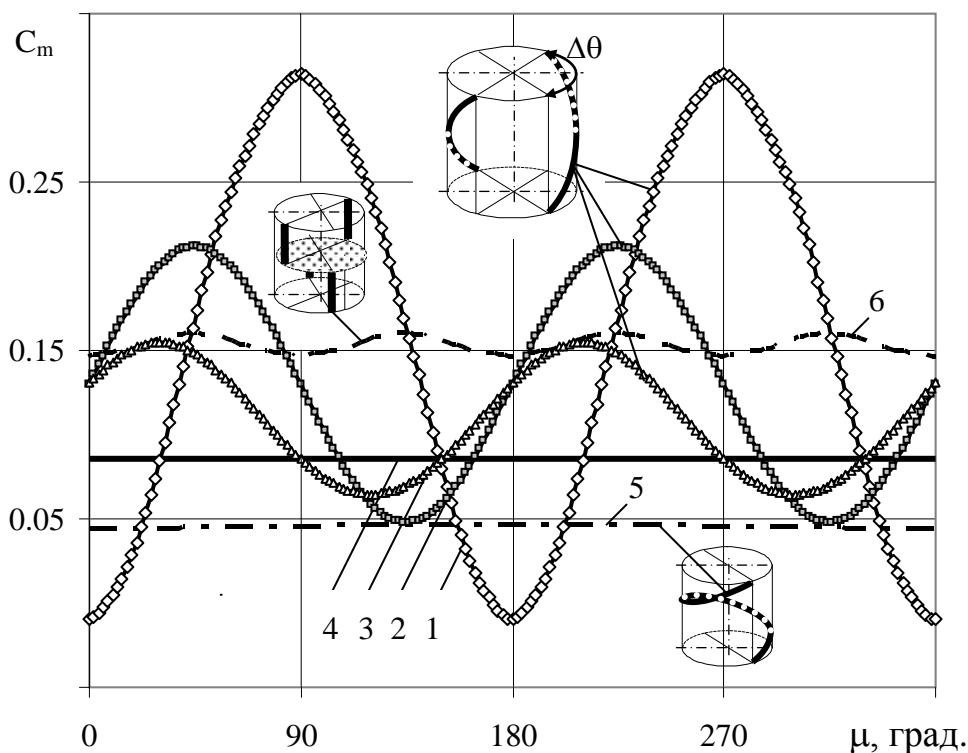


Рис. 11. Зависимости коэффициента крутящего момента от коэффициента быстроходности для выбранных значений параметров $\Delta\theta$ и σ , ($R=const$):

1 – $\Delta\theta=0^\circ$, $\sigma=0,175$; 2 – $\Delta\theta=90^\circ$, $\sigma=0,15$; 3 – $\Delta\theta=120^\circ$, $\sigma=0,125$;

4 – $\Delta\theta=180^\circ$, $\sigma=0,1$; 5 – $\Delta\theta=360^\circ$, $\sigma=0,05$ (одна лопасть) ;

6 – $\Delta\theta=0^\circ$, $\sigma=0,175$; (двухъярусный Н-ротор)

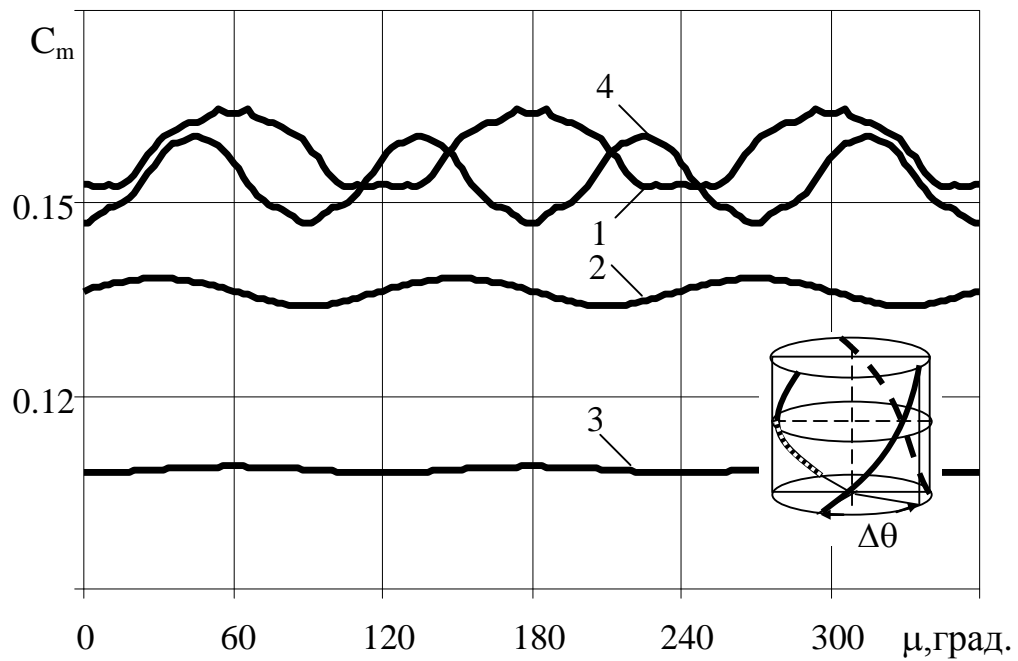


Рис. 12. Изменения коэффициента крутящего момента в зависимости от окружной координаты μ для трехлопастного ротора в случае $R_m/R_0=1$:
 1 – $\Delta\theta=0^\circ$; $\sigma=0,175$; 2 – $\Delta\theta=60^\circ$, $\sigma=0,15$; 3 – $\Delta\theta=120^\circ$, $\sigma=0,125$;
 4 – двухъярусный при $\Delta\theta=90^\circ$, $\sigma=0,175$

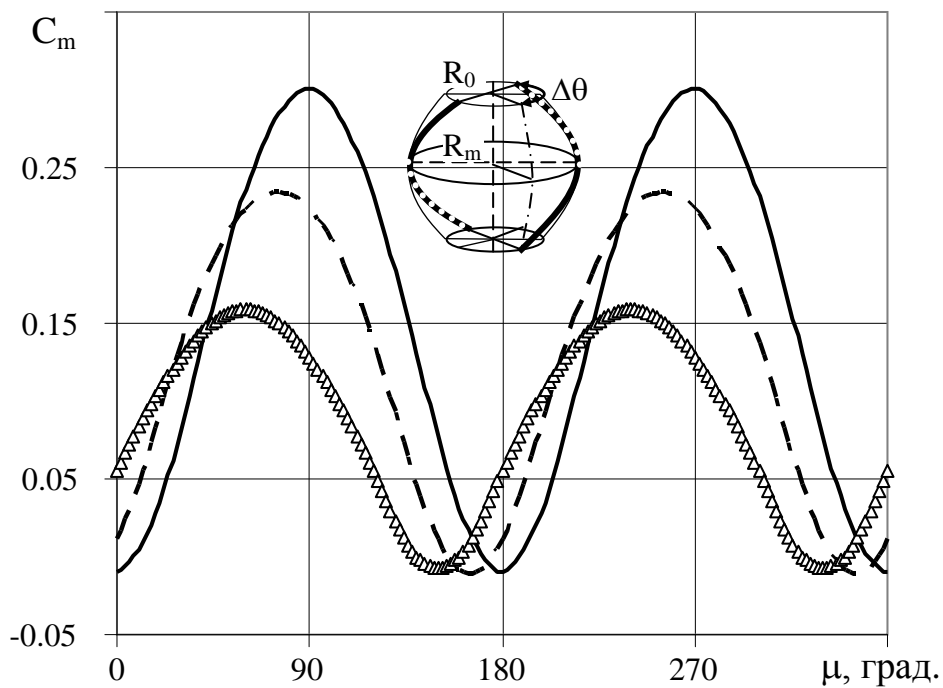


Рис. 13. Зависимости коэффициента крутящего момента C_m от окружной координаты μ для двухлопастного ротора в случае $R_m/R_0=0,5$:
 1 – $\Delta\theta=0^\circ$; $\sigma=0,2$; 2 – $\Delta\theta=30^\circ$, $\sigma=0,2$; 3 – $\Delta\theta=60^\circ$, $\sigma=0,3$

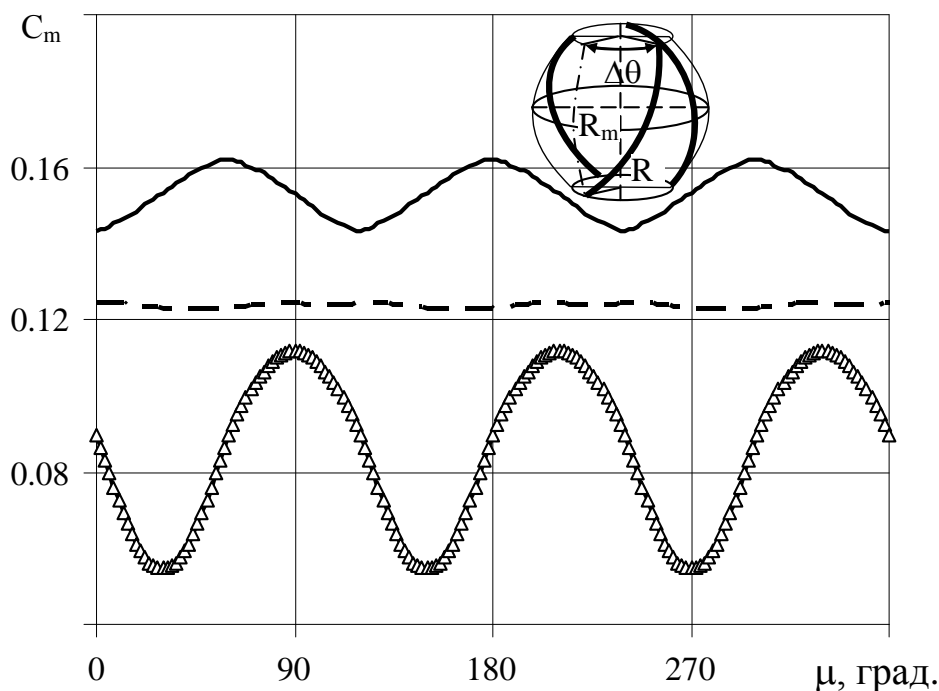


Рис. 14. Зависимости коэффициента крутящего момента C_m от окружной координаты μ для трехлопастного ротора в случае $R_m/R_0=0,5$:

1 – $\Delta\theta=0^\circ$; $\sigma=0,2$; 2 – $\Delta\theta=30^\circ$, $\sigma=0,2$; 3 – $\Delta\theta=60^\circ$, $\sigma=0,3$

Величина $C_{p\max}$ монотонно уменьшается при увеличении угла $\Delta\theta$ (рис. 3). При значении $\Delta\theta=60^\circ$ она приближается к значению 0,2 лишь при значительном увеличении коэффициента заполнения σ .

Изменения коэффициента быстроходности λ_m , при котором коэффициент мощности достигает максимального значения $C_{p\max}$, показано на рис. 5. для случая $\bar{R}_0 = 1$. Из графиков видно, что это изменение имеет монотонный характер и приводит к значительному уменьшению величины λ_m при увеличении коэффициента σ в выбранном диапазоне (рис. 5,А). При увеличении угла закрутки указанный параметр, напротив, увеличивает свои значения (рис. 5,Б).

Аналогичные сравнения в поведении среднего коэффициента крутящего момента представлены на рис. 4, 6. Здесь представлены значения момента C_m , достигаемые также при $\lambda = \lambda_m$, хотя они не являются максимальными. Из рисунков видно, что коэффициент момента, в отличие от коэффициента мощности, изменяется монотонно и значительно больше по величине в выбранном диапазоне значений параметров σ , $\Delta\theta$. Увеличение коэффициента C_m происходит при выборе больших значений коэффициента заполнения и меньших величинах угла закрутки. Сопоставление расчетных данных для указанных коэффициентов показывает, что стремление сохранить значение $C_{p\max}$ за счет подбора параметров σ , $\Delta\theta$ неизбежно приводит к уменьшению коэффициента крутящего момента. Это уменьшение возрастает с увеличением угла закрутки $\Delta\theta$ и особенно сильно проявляется для параболической лопасти (рис. 6).

На рис. 7–14 представлены расчетные данные, полученные для фиксированных значений параметров σ , $\Delta\theta$. В рамках данной работы выбор этих параметров произведен из условия достижения наибольшего значения $C_{p\max}$.

На рис. 7, 8 показаны характерные зависимости $C_p(\lambda)$, $C_m(\lambda)$ в случае винтовых лопастей ($\bar{R}_0 = 1$). Из графиков видно, как увеличение угла закрутки и одновременное уменьшение коэффициента заполнения влияет на увеличение быстроходности геликоидального ротора. Замечательно, что при таком увеличении расширяется также диапазон значений коэффициента λ , при котором коэффициент мощности мало отличается от своего максимального значения. Однако при этом коэффициент момента ротора значительно падает (кривая 5 на рис. 8).

Графики аналогичных зависимостей для ротора с параболической осью лопасти ($\bar{R}_0 = 0,5$) показаны на рис. 9, 10. Для них характерно значительное уменьшение значений обоих коэффициентов при незначительном изменении величины λ_m . Такое поведение основных характеристик функционирования делает малопривлекательным практическое применение роторов с лопастями указанной формы. В связи с этим ветряки, предлагаемые фирмой TUPMAR Wind Energy Technology (рис. 1,в), трудно признать рациональными с аэродинамической точки зрения.

В представленных выше сравнениях не участвует количество лопастей ротора. Влияние этого параметра показано на рис. 11–14. Здесь приведены графики среднего по высоте ротора коэффициента крутящего момента за один его оборот (формулы (12), (13)). Данные зависимости соответствуют значению коэффициента быстроходности, равному значению λ_m . Это значение однозначно связано со значениями параметров σ , $\Delta\theta$, указанными под рисунками.

На рис. 11 сравниваются коэффициенты крутящего момента для двухлопастного ротора с винтовыми лопастями ($\bar{R}_0 = 1$) при различных величинах угла закрутки (кривые 1–4). Видно, что при значении $\Delta\theta = 180^\circ$ колебания момента полностью исчезают, однако при этом величина момента, как среднего, так и текущего, значительно снижается.

Аналогичное поведение в указанных зависимостях проявляется также и для трехлопастного ротора (рис. 12), но с более значительным сглаживанием момента. Можно отметить, что в данном случае винтовая закрутка лопастей малоэффективна, поскольку колебания момента незначительны и для Н-ротора, но среднее значение момента у него выше, чем у геликоидального. С этой точки зрения трехлопастные ветряки, показанные на рис. 1,а, рис. 1,б, явно не рациональны с точки сохранения величины крутящего момента.

На рис. 13, 14 представлены аналогичные зависимости $C_m(\mu)$ для ротора с параболическими лопастями ($\bar{R}_0 = 0,5$). Диапазон изменения угла закрутки $\Delta\theta$ здесь вынужденно ограничен. Поэтому сглаживающее воздействие этого параметра на крутящий момент значительно скромнее, чем в случае, когда $\bar{R}_0 = 1$. Указанный фактор проявляет себя как в двухлопастном, так и в трехлопастном

вариантах. Данное сопоставление усиливает упомянутую выше аэродинамическую неэффективность лопастей с ненулевой кривизной по высоте ротора.

Заслуживает внимания вариант двухлопастного Н-ротора с разбивкой на два одинаковых яруса, о котором упомянуто выше (формула (14)). Зависимости $C_p(\lambda)$, $C_m(\lambda)$ для средних значений этих коэффициентов в данном варианте совпадут с кривыми 1, показанными на рис. 2, 4, 5, 7, 8. Однако окружное изменение крутящего момента значительно сглаживается по сравнению с одноярусным ротором, причем без изменения среднего значения момента. Это свойство делает двухъярусное исполнение Н-ротора более привлекательным по сравнению с геликоидальными роторами в тех случаях, когда требование к вращающему моменту на валу генератора имеет решающее значение. В случаях, когда малые значения указанного момента допустимы, привлекает внимание однолопастной ротор с винтовой закруткой лопасти на полный оборот. Он обеспечивает значение $C_{p\max} \approx 0,43$ и имеет широкий рабочий диапазон по значениям коэффициента быстроходности λ (рис. 7, кривая 5). Одновременно с этим обеспечивается равномерность в окружном изменении крутящего момента (рис. 11, кривая 5).

Таким образом, полученные результаты и их сравнительный анализ позволяют сделать следующие выводы:

1. Геликоидальные роторы обеспечивают сглаживание крутящего момента и сохраняют аэродинамическую эффективность по коэффициенту мощности только при определенных значениях коэффициента заполнения и углов закрутки.
2. Винтовая закрутка параболической лопасти неэффективна как в отношении сглаживания крутящего момента, так и по значениям коэффициента мощности.
3. Эффективность винтовой закрутки лопастей снижается при увеличении их количества.
4. Двухъярусный Н-ротор обладает большей эффективностью, чем геликоидальный.
5. Полученные результаты позволяют рассматривать задачу по определению геометрических параметров, обеспечивающих как необходимую гладкость зависимости $C_m(\mu)$, так и минимальные отклонения средних значений коэффициентов мощности и момента от заданных (максимальных) значений.

Библиографические ссылки

1. Тарасов С. В. Методики расчета характеристик ортогонального ветродвигателя с геликоидальными лопастями / С. В. Тарасов, И. Ю., Костюков, Н. Н. Лычагин / Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: *зб. науков. праць*. – Д.: Пороги, 2012. – Т. XIII. – С.110–126.

2. Ciuperca R. Dezvoltarea modelului aerodinamic al rotorului eolian elicoidal cu ax vertical (REEV)/Meridian Ingineresc nr. 4/2008: Publicatie tehnico-stiintifica si aplicativa– Ch.: Ed. U.T.M., 2008.– p. 62-67. – ISSN 1683–853X.
3. Gorlov A.M. Limits of the Turbine Efficiency / A. M., Gorlov, A. N. Gorban', V. M. Silantyev // Journal of Energy Resources Technology. – December 2001, Vol. 123, pp.311–317.
4. Bostan I. Theoretical aerodynamic analyses of airfoils for use on small wind turbines and selection of optimal profiles for wing of helical wind turbine functional model (Part I, II) / I. Bostan, V. Dulgheru, R. Ciuperca // International Scientific Conference Modern Technologies, Quality, Restructuring, TCMR–2006, Jassy [LII vol.]. – P. 1281–1288.
5. Абрамовський Є. Р. Аеродинаміка вітровадигунів (Aerodynamic theory of wind turbines) / Є. Р. Абрамовський .– Д.: Наука і освіта, 2008. – 162 с.

Надійшла до редколегії 12.04.2013

УДК 533.6:621.548

Е. Р. Абрамовский*, С. В. Тарасов**, И. Ю. Костюков**, Н. Н. Лычагин*

**Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

***Институт транспортных систем и технологий «Трансмаг» НАН Украины*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ РАЗНОГО ТИПА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Проведено порівняльний аналіз характеристик кількох типів вертикально-осьових вітровадигунів, пристосованих до використання на забудованій міській території. Кожен із вітровадигунів, який буде встановлено на покрівлі будівель, передбачається використовувати як локальне джерело енергії. Показано, що при низьких швидкостях вітру, які характерні для забудованої міської території, двоярусний ротор Савоніуса і Н-ротор Дар'є мають певні переваги перед іншими типами вітровадигунів.

Ключові слова: вітровадигун, ротори Савоніуса і Дар'є, гелікоїдальний ротор, міська територія.

Предлагается сравнительный анализ характеристик нескольких типов вертикально-осевых ветродвигателей, приспособленных для использования в застроенной