

22. Mutiso R. M., Winey K. I. Electrical properties of polymer nanocomposites containing rod-like nanofillers. *Progress in Polymer Science*, 2015, vol. 40, pp. 63–84. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2014.06.002.
23. Ore O. *Theory of graphs*. Providence, Rhode Island: American mathematical society, 1974. 270 p.
24. Stamatovic B., Trobec R. Data parallel algorithm in finding 2-D site percolation backbones. *Proceeding of the First International Workshop on Sustainable Ultrascale Computing Systems (NESUS 2014)*. Porto, Portugal; Madrid, Computer Architecture Communications, and System Group (ARCOS) University Carlos III, 2014, pp. 65–70.
25. Stauffer D., Aharony A. *Introduction to Percolation Theory*. 2nd ed., rev. London, Taylor & Francis, 2003. 180 p.
26. Tarasevich Yu. Yu., Lebovka N. I., Laptev V. V. Percolation of linear k-mers on a square lattice: From isotropic through partially ordered to completely aligned states. *Physical Review E*, 2012, vol. 86, 061116. DOI: 10.1103/PhysRevE.86.061116.
27. Tarasevich Yu. Yu., Lebovka N. I., Vodolazskaya I. V. et al. Anisotropy in electrical conductivity of two-dimensional films containing aligned nonintersecting rodlike particles: Continuous and lattice models. *Physical Review E*. 2018. Vol. 98, 012105. DOI: 10.1103/PhysRevE.98.012105.
28. Tarasevich Yu. Yu., Burmistrov A.S., Goltseva V.A., Gordeev I.I., Serbin V.I., Sizova A.A., Vodolazskaya I.V. and Zholobov D.A. Identification of current-carrying part of a random resistor network: electrical approaches vs. graph theory algorithms. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 955, 012021. DOI:10.1088/1742-6596/955/1/012021.
29. Toffoli T., Margolus N. *Cellular Automata Machines: A new environment for modeling*. Cambridge, Massachusetts; London, England: The MIT Press, 1987.
30. Torbert S. *Applied Computer Science*. 2nd ed. Springer, 2016. 279 p.
31. Trobec R., Stamatovic B. Analysis and classification of flow-carrying backbones in two-dimensional lattices. *Advances in Engineering Software*, 2017, vol. 103, pp. 38–45. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2015.11.002.
32. Wilson R. J. *Introduction to Graph Theory*. 4th ed. Edinburgh Gate, Harlow, Addison Wesley Longman Limited, 1998.
33. Yang Y., Zhou S., Li Y. Square++: Making a connection game win-lose complementary and playing-fair. *Entertainment Computing*, 2013, vol. 4, p. 105–113. DOI: 10.1016/j.entcom.2012.10.004.
34. Yin W.-G., Tao R. Algorithm for finding two-dimensional site percolation backbones. *Physica B: Condensed Matter*, 2000, vol. 279, pp. 84–86. DOI: 10.1016/S0921-4526(99)00675-4.
35. Yin W.-G., Tao R. Rapid algorithm for identifying backbones in the two-dimensional percolation model. *International Journal of Modern Physics C*, 2003, vol. 14, pp. 1427–1437. DOI: 10.1142/S0129183103005509.

УДК 621.548.4

РОТОР ДАРЬЕ И ОПТИМИЗИРОВАННЫЕ ВЕТРОТУРБИНЫ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Статья поступила в редакцию 23.02.2020, в окончательном варианте – 04.03.2020.

Роткин Владимир Михайлович, НТА «Экологический императив», 3321214, Израиль, г. Хайфа, ул. Герцль, 63 алэф,
кандидат технических наук, Ph.D, доцент, e-mail: ricensr@mail.ru

Соколовский Юлий Борисович, НТА «Экологический императив», 3321214, Израиль, г. Хайфа, ул. Герцль, 63 алэф,
кандидат технических наук, Ph.D, старший научный сотрудник, e-mail: sokol1937y@gmail.com

Азмухамедов Искандар Маратович, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, Татищева, 20а,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности, e-mail: iskander_agm@mail.ru

Рассматриваются возможности повышения энергопоказателей эффективности вертикально-осевых ветроэнергетических установок как альтернативных источников энергии. При значительном потенциале масштабирования вертикально-осевых ветротурбин научно-техническая информация о них в открытых источниках существенно ограничена. Предлагается методология оценки энергоэффективности ортогональных роторов на основе сравнительного анализа путем сопоставления расчетных моделей различных типов роторов с эталонной оптимизированной ветротурбиной. Методология представлена на примере анализа энергетического потенциала ротора Дарье. Адекватность методологии подтверждается практикой применения базовых аэродинамических зависимостей в расчетных моделях как в ветроэнергетике, так и в смежных отраслях. Модель взаимодействия воздушного потока с крыльчатой лопастью основана на допущении о суперпозиции лобовых сил и подъемной силы. Энергия, извлекаемая из взаимодействующего с лопастью воздушного потока, равна работе приложенных к лопасти сил на перемещении этой лопасти за полный оборот турбины. Исследование этой зависимости на экстремум даёт оптимальную конфигурацию лопастей. Расчетная модель

взаимодействия воздушного потока с ротором Дарье рассматривается на примере симметричной лопасти с круглой лобовой поверхностью и хвостовой поверхностью треугольного сечения. Динамическая ось, проходящая через лобовую точку и вершину хвостовой части, разделяет лопасть Дарье на две несимметричные части, образующие динамическое крыло с переменной подъемной силой. Коэффициенты отбора энергии и мощности воздушного потока определяются аналогично оптимизированной крыльчатой лопасти. Сравнительный анализ выполнен на основе аэродинамического взаимодействия рабочих органов установки с воздушным потоком с учетом эффекта рассеяния потока под воздействием рабочих органов как преграды. Сопоставительный расчет показывает, что при кратном превосходстве оптимизированной турбины по вращательному моменту мощность равномасштабной установки Дарье сопоставима с оптимизированной турбиной.

Ключевые слова: ветровая турбина, лопасть, крыло, профиль, подъемная сила, лобовое сопротивление, ротор Дарье, оптимизация, энергоэффективность, сравнительный анализ

Графическая аннотация (Graphical annotation)



DARIER ROTOR AND OPTIMIZED WIND TURBINES: COMPARATIVE ANALYSIS

The article was received by the editorial board on 23.02.2020, in the final version – 04.03.2020.

Rotkin Vladimir M., NTA "Ecology Imperative", 63 Alef Herzl St., Haifa, 3321214, Israel, Ph.D., Associate Professor, e-mail ricentr@mail.ru

Sokolovsky Yuly B., NTA "Ecology Imperative", 63 Alef Herzl St., Haifa, 3321214, Israel, Ph.D., Senior Researcher, e-mail sokol1937y@gmail.com

Azhmukhamedov Iskandar M., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail iskander_agm@mail.ru

The possibilities of increasing the energy indicators of the efficiency of vertical-axis wind power plants as alternative energy sources are considered. With significant potential for scaling vertical-axis wind turbines, scientific and technical information about them in open sources is significantly limited. A methodology is proposed for assessing the energy efficiency of orthogonal rotors based on a comparative analysis by comparing design models of various types of rotors with a reference optimized wind turbine. The methodology is presented as an example of the analysis of the energy potential of the Darier rotor. The adequacy of the methodology is confirmed by the practice of using basic aerodynamic dependencies in design models, both in wind energy and in related industries. The interaction model of the airflow with the winged blade is based on the assumption of a superposition of frontal forces and lift. The energy extracted from the airflow interacting with the blade is equal to the work of the forces applied to the blade to move this blade for a full revolution of the turbine. Examination of this dependence by the extremum gives the optimal configuration of the blades. The calculation model of the interaction of the airflow with the Darier rotor is considered on the example of symmetrical blade with a circular frontal surface and a tail surface of a triangular section. The dynamic axis passing through the frontal point and the apex of the tail part divides the Darier blade into two asymmetric parts, forming a dynamic wing with variable lifting force. Energy and airflow power take-offs are determined similarly to an optimized winged blade. A comparative analysis is considered on the basis of the aerodynamic interaction of the working bodies of the installation with the airflow, taking into account the effect of scattering of the flow under the influence of the working bodies as an obstacle. A comparative calculation shows that with a multiple superiority of the optimized turbine in terms of torque, the power of the Darier equal-scale installation is comparable to the optimized turbine.

Key words: wind turbine, blade, wing, profile, lifting force, drag, Darier rotor, optimization, energy efficiency, comparative analysis

Введение. Для использования энергии ветра разработано множество типов ветроэнергетических установок (ВЭУ) [1–3, 5, 8]. Как правило, ВЭУ классифицируются по расположению оси ротора ветротурбины (горизонтально- или вертикально-осевые) а также ее ориентации по отношению к направлению воздушного потока – коллинеарные (ось параллельна воздушному потоку) или ортогональные (ось перпендикулярна потоку). Наиболее распространены ВЭУ традиционной компоновки – горизонтально-осевые коллинеарные (рис. 1а). В настоящее время они составляют более 90 % парка ВЭУ. По ним накоплен значительный опыт конструирования, изготовления и эксплуатации. Такие ВЭУ характеризуются применением передовых технологий, высокой энергоэффективностью. Однако, учитывая, что экономическая эффективность ветроэнергостанций зависит от мощности единичной ВЭУ, следует отметить, что потенциал масштабирования таких установок близок к исчерпанию. Кроме того, при больших скоростях оборотов они издают значительный шум, приводят к сокращению сроков использования подшипников роторов и пр.



Рисунок 1 – Основные типы ветроэнергетических установок: а – горизонтально-осевая; б – вертикально-осевая, ротор Дарье

Масштабы и опыт применения вертикально-осевых ВЭУ (рис. 1б) значительно ниже. Информация о показателях их энергоэффективности крайне противоречива, мало верифицированных данных о результатах исследований и испытаний подобных устройств [4, 9–12]. Традиционно считалось [8, 9], что энергоэффективность таких ВЭУ существенно уступает горизонтально-осевым. В то же время, производители этих установок в своих проспектах часто приводят показатели, не уступающие и даже превосходящие характеристики для горизонтально-осевых ВЭУ.

Независимо от указанных противоречий, многие специалисты и эксперты сходятся в том, что вертикально-осевые ВЭУ, в силу своей компоновки, обладают лучшими динамическими качествами (и, как следствие, показателями надежности), а также перспективами масштабирования (рис. 2).

В подавляющем большинстве действующих вертикально-осевых ВЭУ применяются нерегулируемые лопасти (рис. 1б, 2а), чаще всего роторы Дарье [1–3]. Применение регулируемых поворотных лопастей (рис. 2б, в) способно существенно повысить энергоэффективность ВЭУ [10, 12]. Однако это приводит к усложнению конструкции, которое становится экономически оправданным только с ростом мощности единичной ВЭУ.

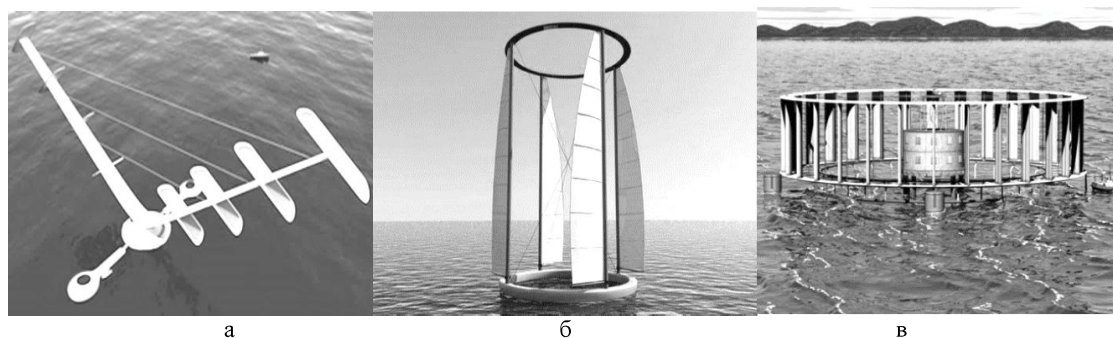


Рисунок 2 – Масштабные вертикально-осевые ветроустановки: а – со стационарно расположенными лопастями; б, в – с регулируемыми положениями лопастей

В настоящей работе возможности совершенствования вертикально-осевых ВЭУ рассматриваются путем сопоставления показателей энергоэффективности оптимизированной ортогональной турбины – вертикально-осевой ВЭУ, работающей в режиме оптимальной конфигурации лопастей, и неоптимизируемой установки на основе ротора Дарье. Оптимизированная турбина выступает, по существу, в качестве эталонного ортогонального ветродвигателя. Адекватность данной методологии подтверждается многолетней практикой применения базовых аэродинамических зависимостей в расчетных моделях как в ветроэнергетике, так и в смежных отраслях.

Оптимизированная ортогональная турбина. Модель взаимодействия воздушного потока с крыльчатой лопастью основана на допущении о суперпозиции лобовых сил и подъемной силы [12]. Профиль линейно-выпуклой крыльчатой лопасти симметричен относительно поперечной оси и ассиметричен относительно продольной.

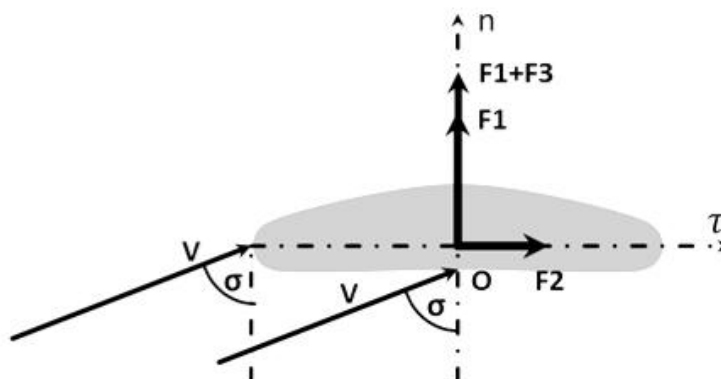


Рисунок 3 – Схема взаимодействия линейно-выпуклой лопасти с воздушным потоком

Сила поперечного лобового воздействия воздушного потока на плоское основание лопасти направлена по нормали On к поперечному сечению лопасти (рис. 3) и равна [6, 12]

$$F_1 = c_{fn} S_n \cos \sigma \frac{\rho V^2}{2}. \quad (1)$$

Соответствующая поперечная подъемная сила отсутствует в силу симметрии лопасти.

При продольном взаимодействии сила лобового воздействия направлена вдоль $O\tau$ и равна

$$F_2 = c_{f\tau} S_\tau \sin \sigma \frac{\rho V^2}{2}, \quad (2)$$

а подъемная сила – вдоль On и равна

$$F_3 = c_{l\tau} S_\tau \sin \sigma \frac{\rho V^2}{2}, \quad (3)$$

где $c_{fn}, c_{f\tau}$ – коэффициенты лобового сопротивления лопасти в поперечном (On) и продольном ($O\tau$) направлениях; $c_{l\tau}$ – коэффициент подъемной силы; S_n, S_τ – площади поперечного (ортогонального On) и продольного (ортогонального $O\tau$) сечений лопасти; σ – угол, образованный вектором относительной скорости потока с осью симметрии On ; ρ – плотность воздуха; V – относительная скорость воздушного потока.

Если соотношение скорости воздушного потока и линейной окружной скорости лопасти (рис. 4) задать параметром окружной скорости $k = Ve/Vo$, то угол $\sigma = (\vec{n}; \vec{V})$ определяется из соотношения

$$\cos(\vec{n}; \vec{V}) = \frac{\cos\varphi - k\sin(\varphi - \alpha)}{\sqrt{1 + k^2 + 2k\sin\alpha}} \quad (4)$$

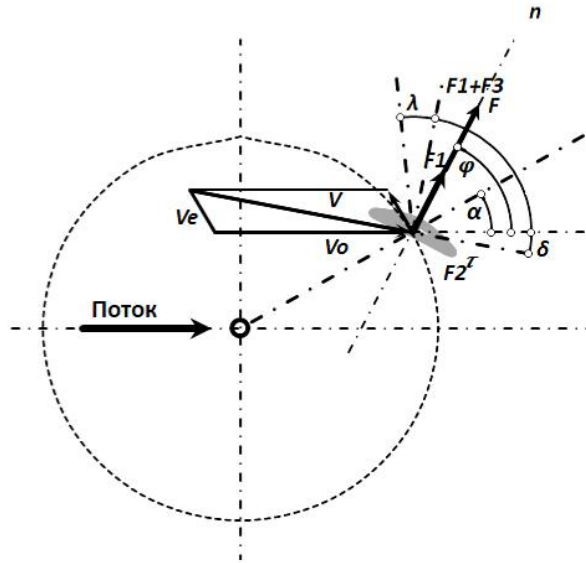


Рисунок 4 – Схема взаимодействия воздушного потока с регулируемой лопастью ортогональной ветротурбины. Углы ориентации: турбины – α , лопасти – φ

Приложенные силы воздушного потока преобразуются к виду

$$F_1 = Fo\sqrt{1 + k^2 + 2k\sin\alpha} [\cos\varphi - k\sin(\varphi - \alpha)], \quad (5)$$

$$F_2 = s_2 Fo\sqrt{1 + k^2 + 2k\sin\alpha} [\sin\varphi + k\cos(\varphi - \alpha)], \quad (6)$$

$$F_3 = s_3 Fo\sqrt{1 + k^2 + 2k\sin\alpha} [\sin\varphi + k\cos(\varphi - \alpha)], \quad (7)$$

где

$$F_0 = c_{fn} S_n \rho V_0^2 / 2 \quad (8)$$

– приведенная сила действия потока (сила поперечного лобового действия, приложенная к неподвижной пластине со стороны нормально направленного потока),

$$s_2 = \frac{c_{f\tau} S_{\tau}}{c_{fn} S_n} \quad (9)$$

– приведенный коэффициент продольного лобового сопротивления,

$$s_3 = \frac{c_{l\tau} S_{\tau}}{c_{fn} S_n} \quad (10)$$

– приведенный коэффициент подъемной силы.

Соответственно, главный момент приложенных сил

$$M_{\alpha} = F_1 L \sin(\varphi - \alpha) - F_2 L \cos(\varphi - \alpha) + F_3 L \sin(\varphi - \alpha). \quad (11)$$

Величина энергии, извлеченной из взаимодействующего с лопастью воздушного потока за полный оборот турбины, равна работе приложенных к лопасти сил на перемещении этой лопасти, или работе момента этих сил на соответствующем угловом перемещении

$$A_0 = \int_0^{2\pi} M_{\alpha} d\alpha. \quad (12)$$

Функционирование ортогональной ветротурбины возможно только при определенном расположении лопастей по отношению к воздушному потоку. Анализ оптимизационной модели взаимодействия лопасти с воздушным потоком позволяет определить кинематику лопасти, обеспечивающую максимальный съем энергии воздушного потока.

Исследование зависимости $a_0(\varphi)$ на экстремум дает возможность выявить оптимальную ориентацию лопастей ортогональной ветротурбины, в зависимости от расположения их осей, то есть определить оптимальное соотношение $\varphi = \varphi(\alpha)$. Условие экстремума $da_{\alpha}/d\varphi = 0$ после дифференцирования и последующих преобразований дает соотношение

$$tg(2\varphi - \alpha) = \frac{(1 + k\sin\alpha) \pm \frac{s_3}{1 - s_2}}{k\cos\alpha} / (1 \mp \frac{1 + k\sin\alpha}{k\cos\alpha} \frac{s_3}{1 - s_2}). \quad (13)$$

Подстановка соответствующих значений φ дает оптимальные значения коэффициентов отбора энергии и мощности воздушного потока в зависимости от параметра окружной скорости k :

$$a(k) = A_0/2\pi F_0 L, \quad (14)$$

$$n(k) = ka(k). \quad (15)$$

Соответственно, усредненная за один оборот (циклическая) абсолютная величина отбора мощности воздушного потока

$$N = nF_0 V_0. \quad (16)$$

Ротор Дарье. Главное преимущество ротора Дарье – существенная простота конструкции, связанная с жестким креплением лопастей на радиальных штангах или непосредственно на оси ротора. Такое крепление полностью исключало бы возникновение вращательного момента ротора, если бы не особая форма применяемых лопастей (рис. 5).

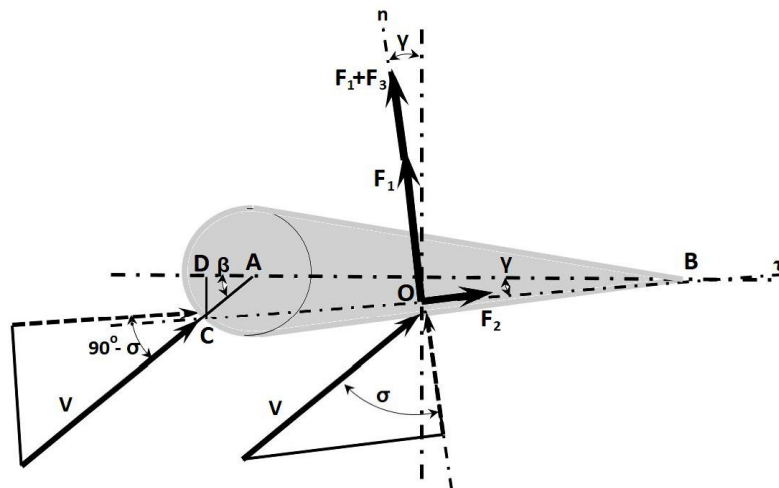


Рисунок 5 – Схема взаимодействия симметричной лопасти Дарье с воздушным потоком

Механизм и расчетная модель взаимодействия воздушного потока с ротором Дарье рассматривается на примере симметричной лопасти с лобовой поверхностью в виде кругового цилиндра радиуса $AC = r$ и хвостовой поверхностью треугольного сечения высотой $AB = b$ с основанием $2r$. Ось симметрии лопасти проходит через центр лобового сечения A и вершину B .

Центр лобового взаимодействия лопасти с потоком определяется как точка C , в которой вектор скорости потока направлен по нормали к лобовой поверхности лопасти. При этом прямая CB , проходящая через лобовую точку и вершину хвостовой части, образует динамическую ось, разделяющую лопасть на две несимметричные части, образующие динамическое крыло с переменной подъемной силой

$$c_{l\tau} = c_{l\tau 0} \sin^2 \beta. \quad (17)$$

Эксцентриситет динамической оси определяется углом γ , который зависит от направления воздушного потока по отношению к лопасти. Соответственно, сила нормального лобового сопротивления F_1 и подъемная сила F_3 направлены по нормали, перпендикулярно динамической оси лопасти, и образуют с вектором скорости потока угол

$$\sigma = 90^\circ - \beta + \gamma. \quad (18)$$

С учетом особенностей конфигурации ротора Дарье (рис. 6) силы взаимодействия потока с лопастями рассчитываются по формулам

$$F_1 = F_0 \sqrt{1 + k^2 + 2k \sin \alpha} [\cos(\alpha + \gamma) - k \sin \gamma], \quad (19)$$

$$F_2 = s_2 F_0 \sqrt{1 + k^2 + 2k \sin \alpha} [\sin(\alpha + \gamma) + k \cos \gamma], \quad (20)$$

$$F_3 = s_3 F_0 \sqrt{1 + k^2 + 2k \sin \alpha} [\sin(\alpha + \gamma) + k \cos \gamma], \quad (21)$$

где угол γ определяется соотношением (рис. 5)

$$\operatorname{tg} \gamma = (r/b) \sin \beta / ((r/b) \cos \beta + 1), \quad (22)$$

а угол β , образуемый вектором скорости с осью симметрии лопасти, связан с углом поворота ротора соотношением

$$\sin \beta = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 + k^2 + 2k \sin \alpha}} \quad (23)$$

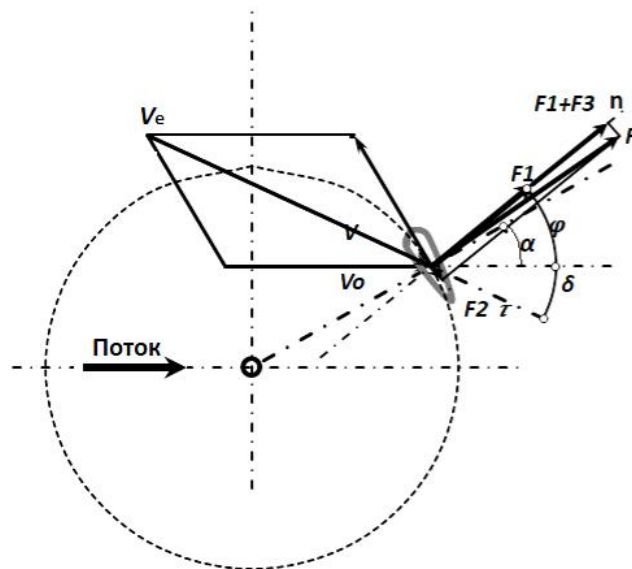


Рисунок 6 – Схема взаимодействия воздушного потока со стационарной лопастью Дарье. Углы ориентации: турбины – α , лопасти – φ

Главный момент, по аналогии с регулируемым ротором, определяется выражением

$$M_\alpha = F_1 L \sin \gamma - F_2 L \cos \gamma + F_3 L \sin \gamma. \quad (24)$$

Циклический момент, коэффициенты отбора энергии и мощности воздушного потока и циклическая величина отбора мощности также определяются аналогично, с использованием расчетных выражений (14)–(16).

Вопросы внешнего регулирования для ротора Дарье не актуальны, в связи со стационарным размещением и конфигурацией рабочих органов. Однако в существенно узком диапазоне происходит саморегулирование силового воздействия потока на лопасть за счет варьирования динамического эксцентриситета.

Сравнительный анализ энергоэффективности ротора Дарье и оптимизированной ветротурбины. Результаты расчетов показателей энергоэффективности – коэффициентов отбора энергии и мощности потока (рис. 7) показывают, что по максимальной доле извлекаемой мощности ротор Дарье кратно уступает оптимизированной ветротурбине.

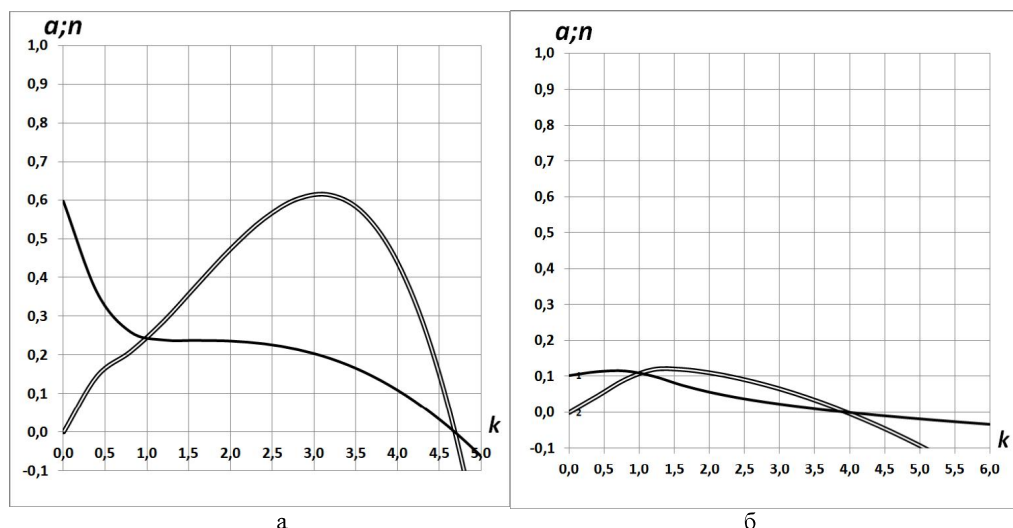


Рисунок 7 – Зависимости удельной мощности ветроустановки (двойные линии) и вращательного момента (обычные линии) от оборотной скорости ротора: а – регулируемые лопасти; б – ротор Дарье

Однако при оценке и сравнительном анализе энергоэффективности ВЭУ недостаточно рассматривать аэродинамическое взаимодействие рабочих органов установки с воздушным потоком, поскольку эта модель не учитывает эффект рассеяния воздушного потока под воздействием преграды в виде ВЭУ. Необходима расчетная методика, позволяющая осуществлять взаимное приведение параметров: с одной стороны, из энергетической модели идеальной ВЭУ, с другой – из оптимизационной модели взаимодействия рабочих органов ВЭУ с воздушным потоком, и получение совместимых (равновесных) показателей.

Учитывая сохранение массы воздуха, значения его массовых расходов (M) и скоростей (V) в начале (индекс «0») и в конце (индекс «1») потока взаимно пропорциональны:

$$M1/M0 = V1/V0 = d, \quad (25)$$

где $d \leq 1$ – коэффициент пропорциональности, определяющий степень замедления (рассеяния) воздушного потока. Выражение для коэффициента использования энергии ветра (КИЭВ), в соответствии с формулой Н.Е. Жуковского [7, 12] для идеальной ВЭУ,

$$\eta = 1/2(1 + d)(1 - d^2). \quad (26)$$

Максимальный КИЭВ достигается при $d = 1/3$ и составляет $\eta_{\max} = 16/27 = 0,593$.

В теории идеальной ВЭУ его мощность рассчитывается как

$$N_{\eta} = (1 + d)(1 - d^2)S_0\rho V_0^3/4, \quad (27)$$

где S_0 – площадь ортогонального сечения активной зоны, рассчитываемая как площадь сечения ветроколеса (ветроротора), перпендикулярного вектору воздушного потока. С другой стороны, мощность, извлекаемая K лопастями ветроколеса (ротора) из потока воздуха [12], составляет

$$N_n = nc_{fn}KS_n\rho V_0^3(1 + d)^3/16. \quad (28)$$

Сопоставление (приравнивание) значений мощности N_n и N_{η} дает равновесное значение коэффициента рассеяния потока

$$d^* = (4S_0 - nc_{fn}KS_n) / (4S_0 + nc_{fn}KS_n), \quad (29)$$

а последующая подстановка в (22) – приведенное (равновесное) значение КИЭВ.

Результат действия эффекта рассеяния потока представлен на рисунке 8. С одной стороны, углы, образуемые векторами приложенных сил с радиальными штангами, существенно больше в оптимизированной турбине, что способствует увеличению крутящего момента. С другой стороны, распределение скоростей набегающего потока показывает значительное снижение скорости потока из-за рассеяния воздуха, что снижает величину приложенных к лопасти сил. Совместное действие этих факторов частично компенсирует преимущество оптимизированной турбины по отношению к ротору Дарье.

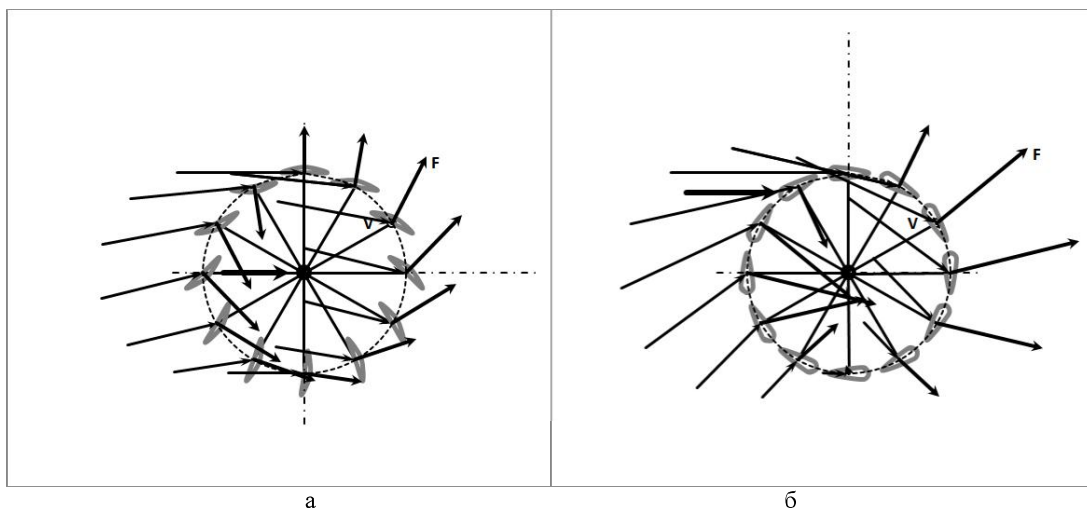


Рисунок 8 – Распределение относительных скоростей потока и сил его воздействия на регулируемые (а) и стационарные (б) лопасти

Результаты сопоставительных расчетов оптимизированной установки с регулируемыми лопастями и установки с ротором Дарье, при одинаковых габаритах ветротурбин и одинаковых скоростных параметрах ветра, представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Примерный расчет параметров для оптимизированной ВЭУ

Параметр	Обозначение	Формула	Значение
Плотность воздуха, кг/м ³	ρ	Относительная константа	1,20
Коэффициент лобового сопротивления.	c_{fn}	Относительная константа	1,33
КПД генератора, 0...1	η_g	Относительная константа	0,870
КПД электронного инвертора 0...1	η_i	Относительная константа	0,850
Предельный КИЭВ ветроустановки, 0...1	η_{max}	Относительная константа	0,593
Коэффициент окружной скорости/	k	Заданное значение	2,00
Скорость ветра, м/сек	V_0	Заданное значение	11
Внешний диаметр ротора, м.	D	Заданное значение	3,00
Высота ротора (лопасти), м.	H	Заданное значение	3,00
Ширина лопасти.	B	Заданное значение	1,50
Число лопастей.	K	Заданное значение	3
Площадь лопасти.	S_n	$S_n=HB$	4,50
Ометаемая площадь ветроустановки, м ²	S_0	$S_0=HD$	9,00
Массовый расход воздуха через ометаемую	M_0	$M_0=\rho S_0 V_0$	119
Мощность воздушного потока, Вт	E	$E=M_0 V_0^2/2$	7187
Коэффициент отбора мощности потока.	n	Расчетная модель	0,25
Равновесный коэффициент замедления потока	d^*	$d^*=(4S_0-ncfnKS_n)/(4S_0+ncfnKS_n)$	0,778
КИЭВ ветроустановки	η_t	$\eta_t=(1+d^*)(1-d^{*2})/2$	0,351
КПД ветроустановки	η	$\eta=\eta_g\eta_i\eta_t$	0,259
Мощность установки, кВт.	N	$N=E\eta/1000$	1,86
Удельная мощность установки, кВт/м ² .	n_s	$n_s=N/S_0$	0,21
Потери давления потока в ветродвигателе, Па	f	$f=(1-d^{*2})\rho V_0^2/2$	28,63

Примечание. КИЭВ – главный сравнительный показатель энергоэффективности

Таблица 2 – Примерный расчет параметров для ВЭУ с ротором Дарье

Параметр	Обозначение	Формула	Значение
Плотность воздуха, кг/м ³	ρ	Относительная константа	1,20
Коэффициент лобового сопротивления.	c_{fn}	Относительная константа	1,33
КПД генератора, 0...1	η_g	Относительная константа	0,870
КПД электронного инвертора 0...1	η_i	Относительная константа	0,850
Предельный КИЭВ ветроустановки, 0...1	η_{max}	Относительная константа	0,593
Коэффициент окружной скорости/	k	Заданное значение	2,00
Скорость ветра, м/сек	V_0	Заданное значение	11
Внешний диаметр ротора, м.	D	Заданное значение	3,00
Высота ротора (лопасти), м.	H	Заданное значение	3,00
Ширина лопасти.	B	Заданное значение	1,50
Число лопастей.	K	Заданное значение	3
Площадь лопасти.	S_n	$S_n=HB$	4,50
Ометаемая площадь ветроустановки, м ²	S_0	$S_0=HD$	9,00
Массовый расход воздуха через ометаемую	M_0	$M_0=\rho S_0 V_0$	119
Мощность воздушного потока, Вт	E	$E=M_0 V_0^2/2$	7187
Коэффициент отбора мощности потока.	n	Расчетная модель	0,12
Равновесный коэффициент замедления потока	d^*	$d^*=(4S_0-ncfnKS_n)/(4S_0+ncfnKS_n)$	0,887
КИЭВ ветроустановки	η_t	$\eta_t=(1+d^*)(1-d^{*2})/2$	0,201
КПД ветроустановки	η	$\eta=\eta_g\eta_i\eta_t$	0,149
Мощность установки, кВт.	N	$N=E\eta/1000$	1,07
Удельная мощность установки, кВт/м ² .	n_s	$n_s=N/S_0$	0,12
Потери давления потока в ветродвигателе, Па	f	$f=(1-d^{*2})\rho V_0^2/2$	15,47

Примечание. КИЭВ – главный сравнительный показатель энергоэффективности

Из результатов расчетов видно, что, несмотря на 5–6-кратное преимущество оптимизированной турбины по аэродинамическим показателям (рис. 7), мощность равномасштабной установки Дарье достигает 60 % от оптимизированной турбины. При этом потери напора воздушного потока в роторе Дарье почти вдвое меньше.

Заключение. Учитывая ограниченную доступность и противоречивость данных о результатах исследований, испытаний и эксплуатации вертикально-осевых ортогональных ВЭУ, применение метода сравнительного анализа на основе верифицированных расчетных моделей ветротурбин дает дополнительные возможности для оценки эффективности и потенциала использования подобных устройств. Предварительная оценка простого в изготовлении и эксплуатации ротора Дарье, в сравнении с эталонной оптимизированной турбиной, показывает, что его энергопоказатели вполне сопоставимы с эталоном, а низкое аэродинамическое сопротивление свидетельствует о потенциале повышения энергоэффективности. Для более точной оценки потенциала такой ветротурбины нужно проведение многофакторного численного эксперимента на основе полученной расчетной методики.

Библиографический список

1. Ветроэнергетика / под ред. Д. де Рензо. – Москва : Энергоатомиздат, 1982. – 271 с.
2. Возобновляемые источники энергии. Теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика / З. А. Стычинский, Н. И. Воропай. – Otto-von-Guericke-Universitat, Magdeburg, 2010. – 203 с.
3. Гордон В. В. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии / В. В. Гордон, В. Е. Губин, А. С. Матвеев. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 294 с.
4. Зырянов В. М. Математическая модель взаимодействия управляемой лопастной ветротурбины с воздушным потоком / В. М. Зырянов, Л. Г. Лимонов, Ю. Б. Соколовский, В. М. Роткин // Электротехнические и компьютерные системы. – 2016. – № 23 (99). – С. 33–38.
5. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия. Книга 1. Ветроэнергогенераторы / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : ХАИ, 2003. – 382 с.
6. Мхитарян А. М. Аэродинамика : учебник / А. М. Мхитарян. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : ЭКОЛИТ, 2012. – 448 с.
7. Окулов В. Л. Идеальный ветряк с конечным числом лопастей / В. Л. Окулов, Ж. Н. Соренсен // Доклады академии наук / Институт им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. – 2008. – Т. 420, № 4. – С. 428–483.
8. Соколовский Ю. Б. Современные ветроэнергетические установки (обзор) / Ю. Б. Соколовский, А. Ю. Соколовский // Электротехника. – 2015. – Т. 2, № 4. – С. 27–38.
9. Соколовский Ю. Б. Ветровые энергетические установки / Ю. Б. Соколовский // Вестник дома ученых. – Хайфа (Израиль), 2014. – Vol. 32. – С. 80–87.
10. Rotkin V. Energy efficiency of bladed wind turbine. Optimization model / V. Rotkin, Y. Sokolovsky // Journal Scientific Israel – Technological Advantages. – 2016. – Vol. 18, № 2. – С. 45–61.
11. Rotkin V. New variants of wind energy plants / V. Rotkin, Y. Sokolovsky, A. Sokolovsky, E. Frolov // Scientific Israel – Technological Advantages. – 2016. – Vol. 18, № 4. – P. 39–50.
12. Sokolovsky Y. Theoretical and technical basis for the optimization of wind energy plants / Y. Sokolovsky, V. Rotkin. – Lulu Press, Inc., USA, 2017. – 160 p.

References

1. Renzo de D. (ed.). *Vetroenergetika* [Wind power]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1982. 271 p.
2. Stychinskiy Z. A., Voropay N. I. *Vozobnovlyayemye istochniki energii. Teoreticheskie osnovy, tekhnologii, tekhnicheskie kharakteristiki, ehkonomika* [Renewable energy sources. Theoretical Foundations, Technologies, Technical Specifications, Economics]. Otto-von-Guericke-Universitat, Magdeburg, 2010. 203 p.
3. Gordon V. V., Gubin V. E., Matveev A. S. *Netraditsionnye vozobnovlyayemye istochniki energii* [Unconventional renewable energy sources]. Tomsk, Publishing House of the Tomsk Polytechnic University, 2009. 294 p.
4. Zyryanov V. M., Limonov L. G., Sokolovskiy Yu. B., Rotkin V. M. *Matematicheskaya model vzaimodeystviya upravlyaemoy lopastnoy vetroturbiny s vozдушным potokom* [A mathematical model of the interaction of a driven blade wind turbine with an airstream]. *Elektrotekhnicheskie i kompyuternye sistemy* [Electrical and Computer Systems], 2016, no. 23 (99), pp. 33–38.
5. Krivtsov V. S., Oleynikov A. M., Yakovlev A. I. *Neischerpaemaya energiya: Kniga 1. Vetroenergogeneratory* [Inexhaustible energy: Book 1. Wind power generators]. Kharkiv, Kharkiv Aviation Institute, 2003. 382 p.
6. Mkhitaryan A. M. *Aerodinamika: uchebnyk* [Aerodynamics: textbook], 2nd ed., rev. and add. Moscow, EKOLIT Publ., 2012. 448 p.
7. Okulov V. L., Sorensen Zh. N. *Idealnyy vetryak s konechnym chislom lopastey* [An ideal windmill with a finite number of blades]. *Doklady akademii nauk, Institut im. S.S. Kutateladze Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences Institute named after S.S. Kutateladze of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences], 2008, vol. 420, no. 4, pp. 428–483.
8. Sokolovskiy Yu. B. *Sovremennyye vetroenergeticheskie ustanovki (obzor)* [Modern wind power plants (review)]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no. 4, pp. 27–38.

9. Sokolovskiy Yu. B. Vetrovye energeticheskie ustanovki [Wind power plants]. *Vestnik doma uchenykh* [Bulletin of the House of Scientists]. Haifa (Israel), 2014, vol. 32, pp. 80–87.

10. Rotkin V., Sokolovsky Y. Energy efficiency of bladed wind turbine. Optimization model. *Journal Scientific Israel- Technological Advantages*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 45–61.

11. Rotkin V., Sokolovsky Y., Sokolovsky A., Frolov E. New variants of wind energy plants. *Journal Scientific Israel – Technological Advantages*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 39–50.

12. Sokolovsky Y., Rotkin V. *Theoretical and technical basis for the optimization of wind energy plants*. Lulu Press, Inc., USA, 2017. 160 p.

DOI 10.21672/2074-1707.2020.49.4.121-131

УДК 004:9

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ПРЕДНАЗНАЧЕННАЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКИ: СИНТЕЗ ЧИСЛА ГРАДАЦИЙ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ

Статья поступила в редакцию 28.01.2020, в окончательном варианте –16.02.2020.

Крюкова Елена Сергеевна, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, адъюнкт, e-mail: e.krukovaab9@yandex.ru

Параицук Игорь Борисович, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, доктор технических наук, профессор, e-mail: shchuk@ Rambler.ru

Показано место электронных библиотек в информационно-образовательном пространстве и системе образования России. Охарактеризованы особенности математической модели, предназначенной для оценки качества электронной библиотеки. Рассмотрены этапы алгоритма отыскания минимально-допустимых значений приращений (числа градаций) переменных состояния, описывающих динамику изменения значений показателей качества электронной библиотеки, а также поиска оптимальных временных интервалов их дискретизации. Предложен алгоритм определения оптимального числа градаций пространств состояния для построения модели электронной библиотеки. Алгоритм учитывает требования к точности (величине отклонения) значения критерия оценки качества, к устойчивости основных оперативно-технических показателей электронной библиотеки относительно возмущающих воздействий, а также текущие требования пользователя к математической сложности оценки качества объекта такого класса. Сформулированы аналитические выражения для нахождения допустимой погрешности оценивания значения l -го показателя качества, коэффициента чувствительности и временного интервала дискретизации компонент векторного показателя качества электронной библиотеки. Предложенные подходы позволяют сформулировать достоверную (адекватную задачам управления) математическую модель в интересах оценки качества электронной библиотеки, открывают новые возможности для моделирования состояний библиотек и прогнозирования их качества, углубляют наши представления о математической природе процесса смены состояний сложных управляемых информационно-технических систем и процессов.

Ключевые слова: электронная библиотека, пространство состояний, показатель качества, оценивание, математическая модель, процесс смены состояний, марковская цепь, уравнение состояния, уравнение наблюдения, минимальное число градаций, переменные состояния, погрешность, временные интервалы дискретизации, требования к точности моделирования, управление качеством