

УДК 621.548

В. М. Зырянов, Л. Г. Лимонов, кандидаты техн. наук,
В. М. Роткин, Ю. Б. Соколовский, кандидаты техн. наук

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРАВЛЯЕМОЙ ЛОПАСТНОЙ ВЕТРОТУРБИНЫ С ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

Аннотация. Усовершенствованные ветровые энергетические установки с вертикальной осью вращения могут быть широко использованы в промышленных и бытовых установках, как альтернативные источники энергии. Предлагаемые методики расчета направлены на повышение эффективности работы ветровых энергетических установок.

Ключевые слова: ветротурбина, лопасть, крыло, воздушный поток, энергоэффективность, оптимизационная модель, численный эксперимент, техническое решение, лобовое сопротивление, циклический силовой момент

V. M. Ziryaynov, PhD., L. G. Limonov, PhD.,
V. M. Rotkin, PhD., U. B. Sokolovsky, PhD.

MATHEMATICAL MODEL OF INTERACTION DRIVEN BLADE WIND TURBINE WITH THE AIR FLOW

Abstract. For in-depth analysis of bladed wind turbine designed universal optimization model interaction adjustable blades (wing) with the air flow, applicable to a wide range of constructive and regime parameters. The model reflects the mechanism for converting the kinetic energy of the flow into a rotational movement of the turbine, assuming a superposition of action of the applied forces, and determines appropriate volumes taken from the flow of energy (power). Transformation of the kinetic energy of the flow into a rotational movement by means of the wind turbine mounted on a vertical shaft (axis) and provided with a blade mounted on the shaft (axis), which is located on the axis of symmetry of the blade. The blade has its own drive shaft, the blade carries out a reversal to regulate its interaction with the flow. The amount of energy, extracted from interacting with the blade of air flow, is applied to the forces on the blades of the moving blade. Similarly, is carried out cyclic power flow calculation. The results of this work in the long term make it possible to analyze the optimization model of the blade interaction with the air stream and to determine the kinematics of the blade, providing maximum removal of flow energy.

Keywords: wind turbine, blade, wing, air flow, energy efficiency, optimization model, numerical simulation, technical solution, drag, the cyclic power point

В. М. Зырянов, Л. Г. Лимонов, кандидаты техн. наук,
В. М. Роткин, Ю. Б. Соколовский, кандидаты техн. наук

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ КЕРОВАНОЇ ЛОПАТЕВОЇ ГІДРОТУРБИНИ З ПОВІТРЯНИМ ПОТОКОМ

Анотація. Вдосконалені вітрові енергетичні установки з вертикальною віссю обертання можуть бути широко використані в промислових і побутових установках, як альтернативні джерела енергії. Пропоновані методики розрахунку спрямовані на підвищення ефективності роботи вітрових енергетичних установок.

Ключові слова: вітротурбіна, лопасть, крило, повітряний потік, енергоефективність, оптимізаційна модель, чисельний експеримент, технічне рішення, лобовий опір, циклічний силовий момент

Введение. Известно распространенное ошибочное мнение, что вертикально-осевые управляемые ветротурбины (ВОВ) обладают меньшей энергоэффективностью, чем широко распространенные пропеллерные с горизонтальной осью (ПВГО).

Наиболее распространенные в настоящее время ПВГО пока не могут превысить по мощности 5-7 МВт, это ограничивает возможности снижения стоимости получаемой электроэнергии до конкурентоспособной

величины. Эффективно и целесообразно применять ПВГО в случаях, когда воздушный поток (ВП) имеет стабильные параметры (горизонтальное направление и скорость, в среднем, от 9 до 18 м/сек), но ПВГО создают помехи для электронных устройств и нарушают экологию. Известные экологичные конструкции [1], имеют сложную систему ориентации на направление ВП, и они должны иметь высокую точность поворота – чтобы не снижалась эффективность работы в условиях переменной силы и направления ВП.

© Зырянов В.М., Лимонов Л.Г.,
Роткин В.М., Соколовский Ю.Б., 2016

Конструкция ВОВ (ротор Дарье) [2 – 3] (рис. 1) появилась позже ПВГО. Считалось, что здесь невозможно получить отношение максимальной окружной скорости лопастей к скорости ветра больше единицы. В то же время, мощность ВОВ может достигать 10-30 МВт. Они имеют ряд преимуществ относительно ПВГО: независимость функционирования от направления ВП, возможность перехода от консольного крепления ветротурбины и ее лопастей к двухопорному, возможность размещения потребителя энергии (электрогенератора, насоса) в основании ветроустановки, невысокие требования к высоте, прочности и жесткости опоры, простота конструкции лопастей, их меньшая материалоемкость, стоимость, уровень шумов [4].

Работа по усовершенствованию ВОВ (ротора Дарье) проведена в институте гидромеханики НАН Украины [5], ее результаты частично отражены в патенте [6]. Применение в ПВГО механизма управления положением лопастей позволяет значительно улучшить рабочие характеристики такой ПВГО [6 – 9].

Разработки последнего десятилетия показали, что ВОВ небольшой мощности могут успешно функционировать на крышах отдельных зданий. В ВОВ используется принцип лобового сопротивления, а также принцип подъемной силы крыла [8 – 9].

Постановка задачи. Для углубленного анализа работы ВОВ предлагается универсальная оптимизационная модель взаимодействия регулируемого положения лопасти (крыла) ВОВ с (ВП), применяется к широкому спектру конструктивных и режимных параметров.

Модель отражает механизм преобразования кинетической энергии ВП во вращательное движение ВОВ, исходя из допущения о суперпозиции действия приложенных сил, и определяет соответствующие объемы отбираемой из потока энергии (мощности).

Исследование воздействия ВП на симметричную плосковыпуклую лопасть – крыло по рис. 2 при упомянутом допущении позволяет рассмотреть универсальную задачу с использованием обоих указанных выше принципов, как в отдельности, так и совместно.

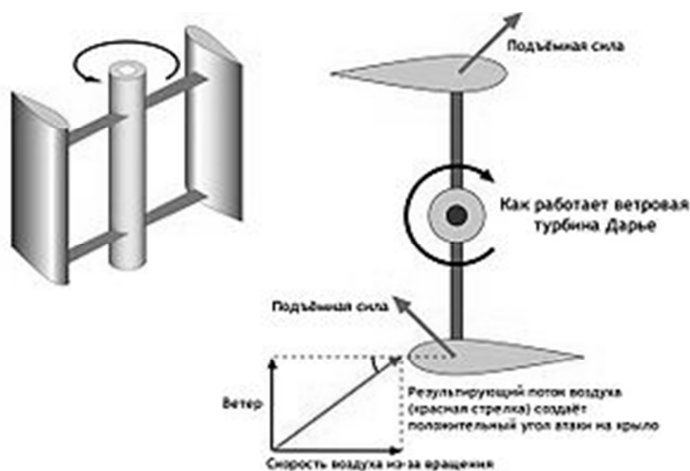


Рис. 1. Принцип действия ротора Дарье

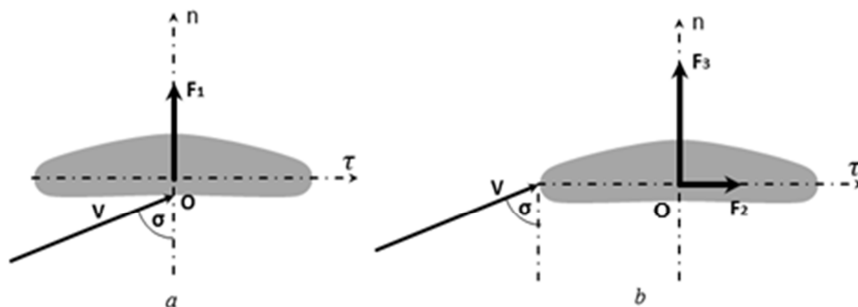


Рис. 2. Взаимодействие воздушного потока с плосковыпуклой лопастью:
 а – поперечное; б – продольное

Сила поперечного лобового воздействия воздушного потока на плоскую поверхность лопасти направлена по нормали On к поперечному сечению лопасти (рис. 2, а) и равна

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

Соответствующая поперечная подъемная сила отсутствует (симметрия лопасти).

При продольном взаимодействии (рис. 2, б) 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

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

Здесь $c_{fn}, c_{f\tau}$ – 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 $O\tau$) сечения лопасти; σ – угол, образованный вектором относительной скорости ВП с осью симметрии On ; ρ – плотность воздуха; V – относительная скорость ВП.

Взаимодействие ВП с ветротурбиной

Преобразование кинетической энергии ВП во вращательное движение ветрогенератора, осуществляется с помощью турбины, установленной с возможностью вращения вокруг вертикального вала (оси) P и снабженной лопастью, установленной на валу (оси) O , находящемся на оси симметрии лопасти (рис. 3). Вал лопасти имеет собственный привод, осуществляющий разворот лопасти для регулирования ее взаимодействия с ВП.

Скорость ВП по отношению к лопасти определяется как векторная разность абсолютной скорости ВП \vec{V}_o и переносной (окружной) скорости движения оси лопасти \vec{V}_e при вращении вокруг оси турбины

$$\vec{V} = \vec{V}_o - \vec{V}_e \quad (4)$$

Учитывая, что векторы этих скоростей образуют угол $(\frac{\pi}{2} + \alpha)$, относительная скорость может быть рассчитана по теореме косинусов следующим образом:

$$V^2 = V_o^2 + V_e^2 - 2V_o V_e \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha). \quad (5)$$

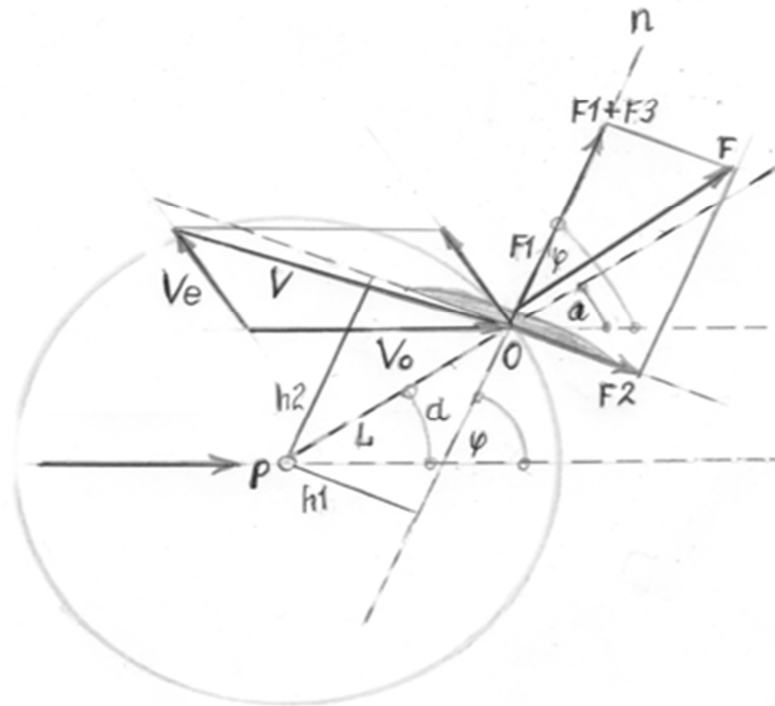


Рис. 3. Схема взаимодействия воздушного потока с лопастью ветротурбиной
 $L=OP$ – радиус ротора. Углы ориентации: α - турбины, φ - лопасти

Если соотношение абсолютной и переносной скоростей ВП задать параметром окружной скорости

$$k = Ve/Vo, \quad (6)$$

то

$$V^2 = V_0^2(1 + k^2 + 2k \sin \alpha). \quad (7)$$

Поскольку проекция относительной скорости на нормаль лопасти On равна разности соответствующих проекций абсолютной и переносной скоростей

$$V \cos(\vec{n}; \vec{V}) = Vo \cos(\varphi) - Ve \sin(\varphi - \alpha), \quad (8)$$

то угол определяется из соотношения

$$\cos \sigma = \frac{\cos \varphi - k \sin(\varphi - \alpha)}{\sqrt{1 + k^2 + 2k \sin \alpha}}, \quad (9)$$

а приложенные силы ВП преобразуются к виду

$$F_1 = Fo \sqrt{1 + k^2 + 2k \sin \alpha} (\cos \varphi - k \sin(\varphi - \alpha)), \quad (10)$$

$$F_2 = s_2 Fo \sqrt{1 + k^2 + 2k \sin \alpha} (\sin \varphi + k \cos(\varphi - \alpha)), \quad (11)$$

$$F_3 = s_3 Fo \sqrt{1 + k^2 + 2k \sin \alpha} (\sin \varphi + k \cos(\varphi - \alpha)). \quad (12)$$

Здесь

$$F_0 = c_{fn} \frac{\rho V_0^2}{2} \quad (13)$$

– приведенная сила действия ВП, в качестве которой рассматривается сила поперечного лобового действия, приложенная к неподвижной пластине со стороны *нормально* направленного потока,

$$s_2 = \frac{c_{f\tau} S_\tau}{c_{fn} S_n} \quad (14).$$

– приведенный коэффициент продольного лобового сопротивления,

$$s_3 = \frac{c_{l\tau} S_\tau}{c_{fn} S_n} \quad (15),$$

– приведенный коэффициент подъемной силы.

Соответственно, главный момент приложенных сил

$$M_\alpha = F_1 L \sin(\varphi - \alpha) - F_2 L \cos(\varphi - \alpha) + F_3 L \sin(\varphi - \alpha), \quad (16)$$

где плечи моментов $H_1 = L \sin(\varphi - \alpha)$, $H_2 = L \cos(\varphi - \alpha)$.

Величина энергии, извлеченной из взаимодействующего с лопастью ВП, равна работе приложенных к лопасти сил на перемещении этой лопасти, или работе момента этих сил на соответствующем угловом перемещении

$$A_\alpha = \int_0^\alpha M_\alpha d\alpha. \quad (17)$$

С учетом полученных ранее выражений для текущих значений сил F_1 , F_2 и F_3 ,

$$k \sin(\varphi - \alpha)) \sin(\varphi - \alpha) - s_2 (\sin \varphi + k \cos(\varphi - \alpha)) \cos(\varphi - \alpha + s_3 (\sin \varphi + k \cos(\varphi - \alpha)) \sin(\varphi - \alpha)) d\alpha \quad (18)$$

При расчете энергии, в качестве масштаба целесообразно рассматривать *эффективную циклическую энергию* ВП - $A_3 = 2\pi FoL$, равную работе приведенной силы действия ВП на перемещение оси лопасти за полный оборот (цикл) турбины. Соответствующий коэффициент отбора энергии потока - ($a_\alpha = A_\alpha/A_3$)

$$a_\alpha = \frac{1}{2\pi} \int_0^\alpha \sqrt{1 + k^2 + 2k \sin \alpha} ((\cos \varphi - k \sin(\varphi - \alpha)) \sin(\varphi - \alpha) - s_2 (\sin \varphi + k \cos(\varphi - \alpha)) \cos(\varphi - \alpha) + s_3 (\sin \varphi + k \cos(\varphi - \alpha)) \sin(\varphi - \alpha)) d\alpha \quad (19)$$

Аналогично осуществляется расчет, а циклической мощности ВП. Средний отбор мощности N_0 за оборот турбины равен отношению соответствующей энергии A_0 ко времени оборота турбины $2\pi L/kVo$

$$N_0 = \frac{FoVo}{2\pi} k \int_0^\alpha \sqrt{1 + k^2 + 2k \sin \alpha} ((\cos \varphi - k \sin(\varphi - \alpha)) \sin(\varphi - \alpha) - s_2 (\sin \varphi + k \cos(\varphi - \alpha)) \cos(\varphi - \alpha) + s_3 (\sin \varphi + k \cos(\varphi - \alpha)) \sin(\varphi - \alpha)) d\alpha \quad (20)$$

Выбор в качестве масштаба приведенной (эффективной) мощности ВП $N_3 = FoVo$ дает простое соотношение, связывающее циклические значения коэффициентов отбора энергии и мощности ВП

$$n_0 = ka_0. \quad (21)$$

Соответственно, усредненная за оборот абсолютная величина мощности ВП

$$N_0 = n_0 F_0 V_0.$$

Заключение. Результаты данной работы позволяют провести анализ оптимизационной модели взаимодействия лопасти с ВП и определить кинематику лопасти, обеспечивающую максимальный съём энергии потока.

Список использованной литературы

1. Патент RU 3558256, C2, F03D, 1/06 jп. Цилиндрическая ветротурбина / Гуревич В. А., Соколовский Ю. Б., Соколовский А. Ю., Фролов Е. А. Бюллетень № 18. Опубликовано 20.09.2015.

2. Патент RU 2347104, C2, F03D 3/06. Ротор ветряной установки с вертикальной осью / Грахов Ю. В., Кривоспитский В. П., Максимов В. Ф., Соломин Е. В., Ричард Холстед, Глен Дахлбакка. Бюллетень № 11. Опубликовано 20.02.2009.

3. Ротор Дарье. – URL: <https://ru.wikipedia.org> (дата доступа 10.05.2010).

4. Соколовский Ю. Б. Современные ветроэнергетические установки (обзор) / Ю. Б. Соколовский, А. Ю. Соколовский // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – № 4. – С. 17 – 21. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, Vol. 2, No. 4, pp. 17 – 21

5. Соколовский Ю. Б. О применении ветровых энергетических установок / Ю. Б. Соколовский, Л. Г. Лимонов, А. Ю. Соколовский // *Электротехнические и компьютерные системы*, – Одесса : Наука и техника – 2014. – № 16 (92). – С. 7 – 15.

6. Каян В. П. Оптимизация рабочих характеристик полномасштабного макета ветроротора Дарье с прямыми управляемыми лопастями / В. П. Каян, А. Г. Лебедь // *Прикладна гідромеханіка*. – К. : – 2010. – Т. 12. – С. 75-79

7. Патент Украины № 16097А на корпусную модель, МПК F03D 3/00, F03D. Ветро-силовая установка / Каян В. П. Довгий С. О., Бойко П. М., Лебідь О. Г. Бюллетень № 7. Опубликовано 07.06.2006. – 174 с.

8. Соколовский Ю. Б. Оптимизационная математическая модель энергоэффективности высокоскоростной ветроэнергетической установки с плоскими лопастями / Ю. Б. Соколовский, В. М. Роткин // *Вестник Дома ученых г. Хайфы*. – 2015 – Т. XXXV. – С. 59 – 64.

9. Патент RU 2484296 C2 F03D 3/00. Ветровая энергетическая установка / Соколовский Ю. Б., Гуревич В. А. Бюллетень № 6. Опубликовано 03.08.2011.

10. Решение о выдаче патента на изобретение № 2014146593, F03D 3/06. Способ преобразования кинетической энергии потока во вращательное движение крыла и установка для осуществления этого способа / Гуревич В. А., Соколовский Ю. Б., Соколовский А. Ю., Фролов Е. А. (19.11.2014) и (10.03.2016).

Получено 30.05.2016

References

1. Gurevch V.A., Sokolovsky Y.B., Sokolovsky A.Y., and Frolov E.A. *Cilindricheskaya vetroturbina* [The Cylindrical wind Turbine] Patent RU 3558256, C2, F03D, 1/06 in 20.09.2015 (In Russian).

2. Grahov Y.V. Krivospisky V.P., Maximov V.F., Solomin E.V., Richard Holsted, and Glen Dahlbaka. *Rotor vetryanoy ustanovki s vertikalnoy osiu* [Wind Turbine Rotor with a Vertical axis], Patent RU 2347104, C2, F03D 3/06 (20.02.2009) (In Russian).

3. Rotor Darie. (In Russian), Available at: URL: <https://ru.wikipedia.org> (Accessed 10.05.2010).

4. Sokolovskiy Y.B., and Sokolovskiy A.Y. *Sovremennye vetroenergeticheskie ustanovki (obzor)* [Modern wind Turbines (review)], (2015), *Elektrotehnika: Setevoy Elektronniy Nauchniy Jurnal*, No. 4, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, (2015), Vol. 2, No. 4 (In Russian).

5. Sokolovskiy Y.B. Limonov L.G., and Sokolovskiy A.Y. *O primenenii vetrovih energeticheskikh ustanovok* [On the Application of wind Power Plants], (2014), *Elektrotehnicheskie I Komputerniye Sistemi*, Odessa, Ukraine, *Nauka I Tehnika*, No.16 (92) (In Russian).

6. Kayan V.P., and Lebed A.G. Optimizaciya rabochih karakteristik polnomasshtabnogo maketa vetrorotora Datiye s pryamimi upravleniyemimi lopastyami [Optimization of full-scale mock Performance Vetrorotora Durries Straight Blades Controlled], (2010), *Prikladna Gidpomehanika*,. Kiev, Ukraine, Vol 12 (In Russian).

7. Kayan V.P., Dovgiy S.O., Boyko P.M., and Lebed O.G. Vitposilova ustanovka, [Wind Power Plant], (2006), Patent Ukraine No. 16097A on coring model, MPK F03D 3/00, F03D, 07.06.2006, No.7, 174 p. (In Russian).

8. Sokolovsky Y.B., and Rotkin V.M. Optimizacionnaya matematicheskaya model energoefektivnosti visokoskorostnoy vetroenergeticheskoy ustanovki s ploskimi lopastyami [The Optimization Mathematical Model of high Efficiency wind Power Plant with flat Blades], (2015), *Vestnik Doma Uchenih g. Haifa*, Vol. XXXV, pp. 59 – 64 (In Russian).

9. Sokolovskiy Y.B., and Gurevich V.A. Vetrovaya energeticheskaya ustanovka [Wind Power Installation], (2011), Patent RU 2484296 C2 F03D 3/00 (03.08.2011) (In Russian).

10. Gurevitch V.A., Sokolovsky Y.B., Sokolovsky A.Y., and Fpolov E.A. Sposob preobrazovaniya kineticheskoy energii potoka vo vraschatelnoye dvigeniye krila I ustanovka dlya osuschestvleniya etogo sposoba [Method of Converting the Kinetic Energy of the Stream into a Rotary Movement of the wing and Apparatus for Carrying out this Method] *Zayavka s Pologitelnim Resheniyem*, No. 2014146593, F03D 3/06 (19.11.2014), The Decision to Grant a Patent for the Invention (10.03.2016) (In Russian).



Зырянов

Вячеслав Михайлович,
канд. техн. наук Новосибирского
государственного тех-
нич. ун-та.
Россия, 630073,
г. Новосибирск. пр.
К.Маркса, 20
E-mail: zvmov@ngs.ru



Лимонов

Леонид Григорьевич,
канд. техн. наук.
главный специалист
отдела ЧАО «Тяжпро-
мавтоматика».
Украина, 61072. Харь-
ков, Пр. Науки, 56.
E-mail:
lgl@tpa5.com.ua



Роткин

Владимир Михайло-
вич, канд. техн. наук
член Научного совета
Дома ученых г. Хайфа,
Израиль, 35157.
ул.Юд.Ламед.
Перес,20
E-mail:
ricentr@mail.ru



Соколовский

Юлий Борисович,
канд. техн. наук,
член Научного совета
Дома ученых г. Хайфа,
Израиль, 33301,ул.
Юд. Ламед. Перес, 20
E-mail:
sokol1937y@gmail.com