

Сравнительный анализ вертикальных ветротурбин

Ледерер Пётр Алексеевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
plederer25@gmail.com

Кочубей Даниил Сергеевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
kochubyay@sfedu.ru

Альтернативные методы производства электроэнергии в современном мире становятся всё более популярны. Ветроэнергетика является одной из самых производительных отраслей альтернативной энергетики. Промышленные ветроустановки чаще всего используют горизонтальный трёхлопастной ротор ветротурбины, однако существуют и другие конструкции ротора, в том числе и вертикальные. В работе рассмотрены основные виды вертикальных ветротурбин, разобраны плюсы и минусы каждой конструкции, а также представлены данные, полученные в ходе эксперимента.

Alternative methods of electricity generation in the modern world are becoming more and more popular. Wind energy is one of the most productive branches of alternative energy. Industrial wind turbines most often use a horizontal three-bladed wind turbine rotor, but there are other rotor designs, including vertical ones. The paper considers the main types of vertical wind turbines, analyzes the pros and cons of each design, as well as presents the experimental data obtained during the experiment.

Ключевые слова: Альтернативная энергетика, ветроэнергетика, вертикальные ветротурбины.

Keywords: alternative energy, wind energy, vertical wind turbines.

I. ВВЕДЕНИЕ

Основными преимуществами вертикальных ветроустановок над горизонтальными являются пониженная шумовая нагрузка и более низкие скорости ветра, которые требуются для эффективной выработки электроэнергии.

Горизонтальные ветрогенераторы выходят на "рабочие" обороты на скоростях ветра выше 6 м/с, в отличие от вертикальных аналогов способных вырабатывать электричество уже при 3–4 м/с.

Все существующие на данный момент вертикальные ветротурбины можно разделить на две группы по принципу действия: турбины типа Савониус так же называемые ротор сопротивления (Resistance runner), и турбины типа Дарье, принцип работы которой основан на подъёмной силе (Uplift runner), действующей на лопасти ротора.

На основе этих двух подходов создано большое количество различных конструкций вертикальных роторов. На рис. 1 представлены наиболее часто встречающиеся из них - обыкновенный Савониус, геликоидный Савониус, геликоидный Дарье и Н-образный Дарье. 3D моделирование роторов выполнено в САПР SolidWorks.

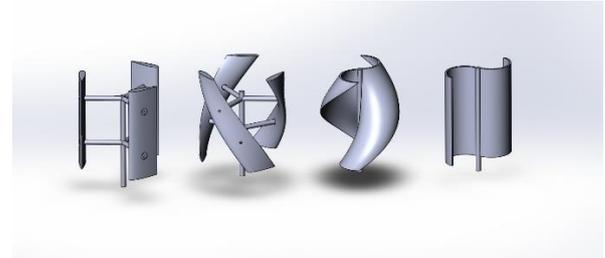


Рис. 1. «Популярные виды вертикальных роторов ветротурбин»

II. КОЭФФИЦИЕНТ БЫСТРОХОДНОСТИ

Одним из основных параметров ротора ветрогенератора является быстроходность, равная отношению линейной скорости лопасти к скорости набегающего ветряного потока. Другое название этого параметра - коэффициент быстроходности или коэффициент преобразования. Значение этого коэффициента для разных типов роторов представлена на рис. 2.

Ось ординат - коэффициент преобразования C_p , на оси абсцисс отношение скорости лопасти к скорости ветра [1]. Из представленного графика можно заметить, что ротор Савониуса является менее быстроходным чем ротор Дарье. Однако стоит отметить, что любой вертикальный ветрогенератор имеет меньший коэффициент быстроходности по сравнению с трёхлопастными горизонтальными ветрогенераторами.

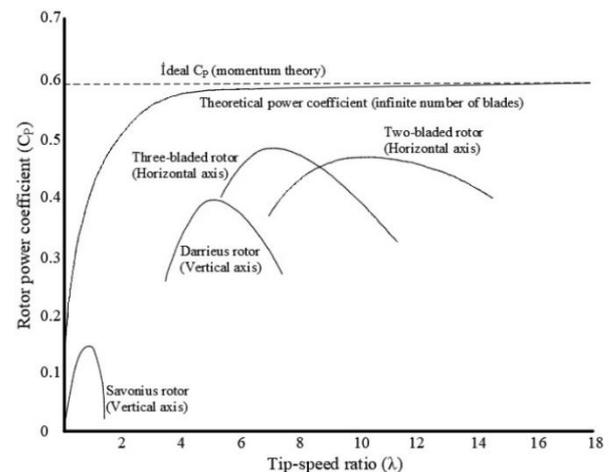


Рис. 2. «Популярные виды вертикальных роторов ветротурбин»

Так же можно обратить внимание на пунктирную линию с идеальным C_p . В 1919 году немецким физиком Альбертом Бецом доказано, что максимальное теоретически возможное значение C_p не может быть выше 59.3%, это значение называется предел Беца [2].

Доказательство выполняется через закон сохранения массы, справедливо следующее выражение (1):

$$m = \rho A_1 v_1 = \rho S v = \rho A_2 v_2 \quad (1)$$

где v_1 - скорость потока перед ротором, v_2 - скорость потока за ротором, v - скорость на гидравлическом силовом устройстве, ρ - плотность среды, S - площадь ротора, A - сечение потоков воздуха на входе и выходе из ротора.

По второму закону Ньютона, справедливо следующее выражение (2):

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = m \Delta u = \rho S v (v_1 - v_2) \quad (2)$$

Мощность можно рассматривать как работу силы, действующей со стороны ротора на поток воздуха или как потерю энергии воздушным потоком за единицу времени.

В дифференциальной форме работу, совершаемую силой, можно записать как (3):

$$dE = F dx \quad (3)$$

Мощность таким образом принимает вид (4):

$$P_1 = \frac{dE}{dt} = F \frac{dx}{dt} = F v \quad (4)$$

После замены F на найденное ранее выражение (2) для силы, получим следующее уравнение (5):

$$P_1 = \rho S v^2 (v_1 - v_2) \quad (5)$$

Мощность как потерю энергии воздушным потоком за единицу времени можно посчитать с помощью следующих выражений (6):

$$P_2 = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) \quad (6)$$

Формула мощности, после подстановки вместо m выражения (1), принимает следующий вид (7):

$$P_2 = \frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) \quad (7)$$

Так как мощности P_1 и P_2 равны справедливы выражения (8) и (9):

$$\rho S v^2 (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) \quad (8)$$

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \quad (9)$$

Выражение для мощности через кинетическую энергию имеет следующий вид (10):

$$E = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) \quad (10)$$

После раскрытия скобок и упрощения уравнение принимает следующий вид (11):

$$E = \frac{1}{4} \rho S v \left(1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right) \quad (11)$$

Теперь необходимо продифференцировать выражение (10) по $\frac{v_2}{v_1}$ при постоянных v_1 , S и приравняв полученное выражение к нулю. Находим экстремум при $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$. Подставляя этот результат в выражение (11), получим следующее выражение (12):

$$P_{max} = \frac{16}{27} * \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \quad (12)$$

Таким образом, $C_p = \frac{16}{27} = 0.593$ является максимальным теоретически возможным коэффициентом преобразования энергии в ветротурбине.

III. СРАВНЕНИЕ РОТОРА ТИПА САВОНИУС С РОТОРОМ ТИПА ДАРЬЕ

Как было отмечено ранее быстроходность ротора типа Савониус в несколько раз меньше, чем у ротора типа Дарье. В первую очередь это связано с принципом и особенностями работы этих турбин.

Одним из факторов уменьшающим быстроходность ротора Савониуса является то, что при совершении оборота, лопасть вследствие оказываемого сопротивления от набегающего воздушного потока начинает тормозить вращение [3]. Иллюстрация этого процесса представлена на рис. 3.

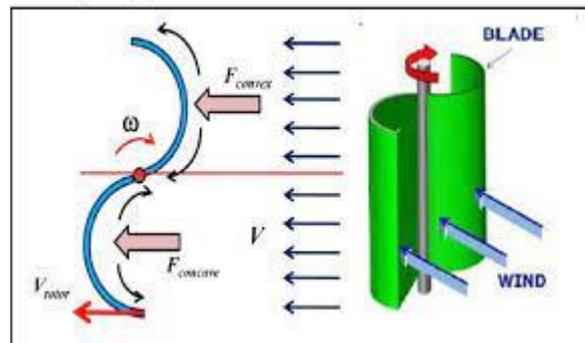


Рис. 3. Принцип работы ветрогенератора с ротором Савониус

Низкий КПД ветрогенераторов, использующих в своей основе исключительно ротора Савониуса, обуславливает низкую популярность таких энергоустановок. Использование промышленных установок на основе ротора Савониуса нецелесообразно.

В то же время роторы типа Дарье, поддерживают своё вращение за счёт подъёмной силы, появляющейся благодаря тому, что лопасти ротора выполнены в форме крыла. Наиболее часто для вертикальных ветроустановок используются следующие профили крыла: NACA 0030, NACA 0021, NACA 0020 и NACA 0018 [4]. Внешний вид некоторых популярных профилей крыла используемых в вертикальных ветрогенераторах представлен на рис. 4.

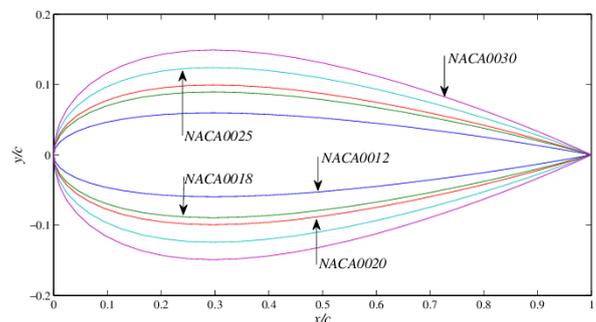


Рис. 4. Внешний вид различных профилей крыла

Одним из наиболее распространённых типов роторов Дарье является H-образный ротор, представленный на рис. 5. Одним из его преимуществ перед другими видами является относительная простота изготовления и характерная для роторов Дарье быстроходность.



Рис. 5. H-образный ротор Дарье

H-образный ротор Дарье имеет популярную модификацию - геликоидный ротор Дарье. В отличие от H-образного геликоидный оказывает меньшие нагрузки на основание ветряка, благодаря чему издаёт меньше шума, однако из-за сложности производства готовые решения, построенные на базе геликоидных роторов Дарье не популярны.

У роторов Дарье есть один существенный минус, такие ветротурбины не могут самостоятельно начать вращение при слабом ветре (2–3 м/с).

Для устранения этого эффекта на центральной оси ветрогенератора размещается миниатюрный ротор Савониуса, заставляющий установку начать вращение [5]. Пример такой конструкции представлен на рис. 6.

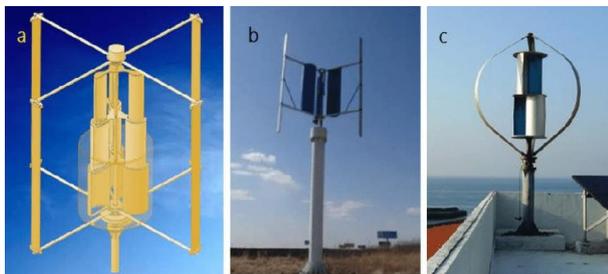


Рис. 6. Ротор Дарье со стартовым ротором Савониуса внутри

IV. ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА, ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ЛОПАСТЕЙ НА МОЩНОСТЬ ВЕТРОУСТАНОВКИ

Увеличение количества лопастей пропорционально уменьшает скорость вращения ротора ветроустановки, вследствие чего уменьшается выработка электроэнергии. Поэтому на практике вертикальные ветрогенераторы с количеством лопастей больше 3 используются редко.

Взаимное расположение ширина и толщина лопастей играют важную роль при проектировании ветрогенератора.

Так как в разной местности среднегодовая скорость ветра может значительно отличаться для эффективной работы установки конструкционные параметры ротора необходимо выбирать, основываясь на среднегодовой выработке электроэнергии, а не на основании максимальной пиковой мощности.

В местах со среднегодовой скоростью ветра в 3–4 м/с оптимальнее всего использовать ротор Дарье с соотноше-

нием сторон $\frac{H}{D}$, где H – высота лопасти ротора, а D – диаметр ротора равным 0.55. При этом длина лопасти должна лежать в диапазоне от 0.297–0.378 м. [6]

V. ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЕТРОУСТАНОВКИ

Моделирование вертикальных ветроустановок в силу их относительной непопулярности по сравнению с горизонтальными конкурентами является нетривиальной задачей.

Для этих целей можно использовать САЕ такие, как Ansys fluent или Solidworks Flow Simulation. Помимо этого, существуют специализированные программы для моделирования ветротурбин различной формы, в том числе и вертикальных. К одной из таких систем относится программа с открытым исходным кодом QBlade. С помощью этого ПО можно провести анализ смоделированной ветротурбины, узнать теоретический коэффициент преобразования, мощность установки, а также момент, который сможет развить ротор [7]. Иллюстрация процесса симуляции в Qblade представлена на рис. 7

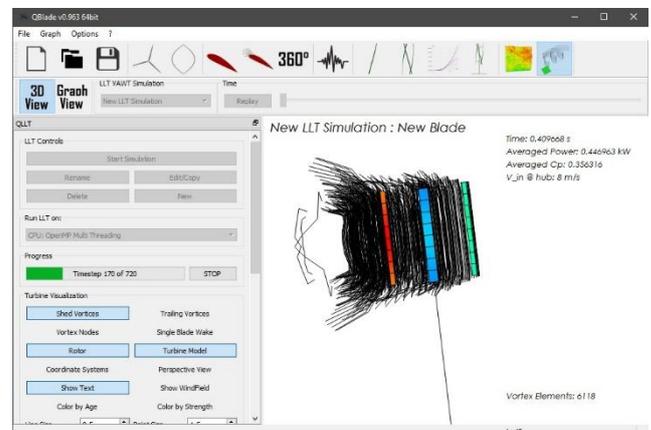


Рис. 7. Процесс симуляция ветротурбины в Qblade

VI. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РОТОРЫ

Для проверки теории было принято решение создать миниатюрную азротрубу и продуть в ней следующие виды вертикальных ветротурбин:

1. Дарье H-образный
2. Дарье геликоидный
3. Савониус обыкновенный
4. Савониус геликоидный

Азротруба представляет из себя фанерный короб. Скорость ветра внутри азротрубы фиксировалась с помощью немеханического анемометра, работающего по принципу hot-wire, закреплённого внутри трубы.

В ходе эксперимента с помощью геркона фиксировалось количество оборотов, которые совершает ротор за одну секунду, а также с помощью закреплённого снизу электродвигателя были получены значения силы тока на разных скоростях вращения. Внешний вид установки представлен на рис. 8.



Рис. 8. Внешний вид экспериментальной установки

Опрос датчиков и запись данных происходили в автоматическом режиме с помощью созданного на базе отладочной платы Arduino устройства. Полученные данные с Arduino передавались на компьютер для последующей обработки. Принципиальная схема устройства представлена на рисунке 9.

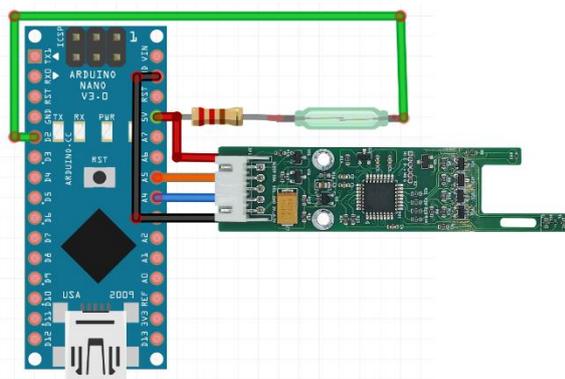


Рис. 9. Принципиальная схема устройства

С результатами эксперимента можно ознакомиться в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Название ротора	Усреднённые данные с датчиков		
	Оборотов в секунду	Сила тока	Скорость ветра
Дарье Н-образный	1	12мА	12 м/с
Савониус обыкновенный	4	70 мА	12 м/с
Дарье геликоидный	2	24 мА	12 м/с
Савониус геликоидный	5	90 мА	12 м/с

Проведённый нами эксперимент не подтвердил выдвинутых гипотез, скорость вращения и мощность роторов типа Савониус оказалась выше, чем у ротора Дарье.

Основной причиной такого результата является несовершенство конструкции Н-образного и Геликоидного роторов. Как было сказано ранее соотношение размеров лопастей к общему радиусу и высоте установки является крайне важным параметром, который необходимо учитывать при проектировании ветротурбин такого типа.

Ещё одной возможной причиной неудачного эксперимента является недостаточная жёсткость моделей роторов.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены основные виды вертикальных роторов ветрогенераторов, сделаны выводы о перспективности использования каждого из них.

Наиболее перспективным и экономически целесообразным является Н-образный ротор Дарье. Легкость производства и высокий КПД делают такой вариант установки наиболее выгодным.

В ходе дальнейшей работы планируется создать полноразмерный прототип ветроэнергетической установки и провести его испытания в реальных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abdullah Muratoglu, Muhammed sungur demir Numerical Analyses of a straight bladed vertical axis Darrieus wind turbine: verification of dms algorithm and Qblade code // European Journal of Technic – DOI:10.36222/ejt.643483
2. Manwell, J. F. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application / J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers. — Chichester, West Sussex, UK : John Wiley & Sons Ltd., February 2012. — P. 92–96. — ISBN 9780470015001.
3. Frederikus Wenehenubuna, Andy Saputraa, Hadi Sutantoa An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades // 2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA 2014 – DOI: 10.1016/j.egypro.2015.03.259
4. N. C. Batista, Rui Melicio, João Matias, João P. S. Catalão Self-start performance evaluation in Darrieus-type vertical axis wind turbines: Methodology and computational tool applied to symmetrical airfoils // Renewable energy power quality journal 2011 – DOI:10.24084/repqj09.302
5. Palanisamy Mohan Kumar, Krishnamoorthi Sivalingam, Srikanth Narasimalu, Teik-Cheng Lim A Review on the Evolution of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine: Small Wind Turbines // Journal of Power and Energy Engineering 2019 – DOI:10.4236/jpee.2019.74002
6. Alessandro Bianchini, Giovanni Ferrara, Lorenzo Ferrari Design guidelines for H-Darrieus wind turbines: Optimization of the annual energy yield // Energy Conversion and Management volume 89, 1 January 2015, Pages 690-707 – DOI: j.enconman.2014.10.038
7. Amani Altmimi, Mustafa Alaskari, Oday I. Abdullah, Ahmed Alhamadani Design and Optimization of Vertical Axis Wind Turbines Using QBlade // Applied System Innovation, October 2021 – DOI: 10.3390/asi4040074