

УДК 621.311.245

UDC 621.311.245

**АНАЛИЗ ВЕТРОУСТАНОВОК ДЛЯ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ****ANALYSIS OF WIND TURBINES FOR ELEC-  
TRIC POWER STATIONS WITH LOW CAPAC-  
ITY**

Бабина Любовь Витальевна  
аспирантка кафедры энергетики  
*Азово-Черноморская государственная  
агроинженерная академия, Зерноград, Россия*

Babina Lyubov Vitalyevna  
postgraduate  
*Azov-Blacksea State Agroengineering Academy,  
Zernograd, Russia*

Проведен анализ ветроустановок для электростанций малой мощности. Рассмотрены достоинства и недостатки ветроустановок с вертикальной и горизонтальной осями вращения. Показана эффективность вертикально-осевых ветроустановок и определены области их применения

There were analyzed wind turbines for electric power stations with low capacity, considered advantages and disadvantages of wind turbines, which have vertical and horizontal rotation axes, demonstrated efficiency of vertical axial wind turbines and determined the fields of its application

Ключевые слова: ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ  
УСТАНОВКА, ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУК-  
ЦИЙ, ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ДО-  
СТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ, ОБЛАСТЬ  
ПРИМЕНЕНИЯ

Keywords: WIND POWER PLANT, CONSTRUC-  
TION FEATURES, OPERATION FEATURES, AD-  
VANTAGES AND DISADVANTAGES, APPLICA-  
TION FIELD

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) малой мощности предназначены для автономного и резервного электроснабжения.

Наибольшее распространение получили горизонтально-осевые ветроэнергетические установки, или, так называемые, пропеллерные установки (более 90 %), а их серийным выпуском занимаются более 100 фирм.

Первые промышленные ВЭУ были сконструированы в Дании в 1890 г. Вертикально-осевые ВЭУ были изобретены позже горизонтально-осевых пропеллерных (ротор Савониуса – в 1929 г., ротор Масгроува – в 1975 г., ротор Дарье был запатентован во Франции в 1925 г. и в США в 1926 г.) [1]. До недавнего времени главным недостатком вертикально-осевых ветроэнергетических установок ошибочно считалась невозможность получить быстроходность больше единицы (для горизонтально-осевых пропеллерных ВЭУ быстроходность возможна больше пяти). К недостаткам также относили: неравномерность крутящего момента, зависимость частоты вращения ветроколеса от скорости ветра и большая пусковая скорость ветра (около 15 м/с) [2].

Эти положения, верные только для тихоходных роторов, использующих различные сопротивления лопастей при их движении по ветру и против ветра, привели к неправильным теоретическим выводам – предельный коэффициент использования энергии ветра у вертикально-осевых ветроэнергетических установок ниже, чем у горизонтально-осевых пропеллерных. Ошибочный вывод, в свою очередь, способствовал тому, что этот тип ветроэнергетических установок почти 40 лет вообще не разрабатывался. Только в 60–70-х годах прошлого века сначала канадскими, а затем американскими и английскими специалистами было экспериментально доказано, что эти выводы неприменимы к роторам Дарье, использующим подъемную силу лопастей. Для этих роторов указанное максимальное отношение линейной скорости рабочих органов к скорости ветра достигает 6:1 и выше, а коэффициент использования энергии ветра практически на уровне горизонтально-осевых пропеллерных ВЭУ [2].

Вместе с тем, эксплуатация горизонтально-осевых ветроустановок выявила ряд неучтенных ранее недостатков. Например, горизонтально-осевые ветроэнергетические установки могут значительно уменьшать вырабатываемую электроэнергию при частой смене направления ветра [3]. В этой связи, все ветроэнергетические установки требуют более глубокого анализа, позволяющего максимально использовать их преимущества.

#### *Горизонтально-осевые ветроэнергетические установки*

Основной вращающей силой у колес этого типа является подъемная сила. Относительно ветра ветроколесо в рабочем положении может располагаться перед опорной башней или за ней. Наибольшая эффективность горизонтальных пропеллерных ветроэнергетических установок достижима только при условии обеспечения постоянной коллинеарности оси ветроколеса и направления ветра. Необходимость ориентации на ветер требует наличия в конструкции ветроэнергетической установки механизмов и систем ориентации на ветер для непрерывного слежения за ветровой обста-

новкой, поиска направления с максимальным ветровым потенциалом, поворота ветроколеса в этом направлении и его удержания в таком положении. При переднем расположении ветроколесо должно иметь аэродинамический стабилизатор или какое-нибудь другое устройство, удерживающее его в рабочем положении. При заднем расположении такого устройства не требуется, но башня частично затеняет ветроколесо и турбулизирует набегающий на него поток. При работе ветроколеса в таких условиях возникают циклические нагрузки, повышенный шум и флуктуации выходных параметров ветроустановки. Наличие в конструкции ветроэнергетической установки системы ориентации на ветер само по себе усложняет ветроагрегат и снижает его надежность (по данным опыта эксплуатации зарубежных ВЭУ этого типа до 13 % общего количества отказов приходится на системы ориентации).

При быстром изменении направления ветра, ветроколесо должно четко отслеживать эти изменения, но практически невозможно эффективно ориентировать ветроколесо при изменении направления ветра из-за запаздывания действия механизмов ориентации. Ветроэнергетические установки с горизонтальной осью вращения обеспечивают стабильную мощность, снимаемую с ветроколеса, при скорости ветра не меньше номинальной.

Однако практика использования автономных электростанций показывает, что реально вырабатываемая электроэнергия оказывается меньше расчетной, причем потери электроэнергии могут достигать 50 % [3]. Причиной этого является уменьшение мощности, а соответственно и энергии, передаваемой ветроколесом при изменении направления ветра даже при достаточной его скорости. Таким образом, ветроколесо не может мгновенно переориентироваться на новое (изменившееся) направление ветра, и за период переориентации мощность, снимаемая с ветроколеса, уменьшается. При частой смене направления ветра вертикально-осевые ветроэнергетические установки оказываются эффективнее горизонтально-осевых ветро-

установок, несмотря на более низкий коэффициент использования мощности ветра [3].

К конструктивным недостаткам ветроэнергетических установок с горизонтальной осью вращения относится то, что система ориентации разрывает жесткую связь между гондолой (корпусом ветроагрегата) и опорной башней горизонтально-осевой пропеллерной ВЭУ, что обуславливает появление автоколебаний и различий в частотных характеристиках подвижной и неподвижной частей конструкции, что, в конечном счете, снижает надежность и увеличивает амортизационные издержки.

#### *Вертикально-осевые ветроэнергетические установки*

Ветроколесо с вертикальной осью вращения вследствие своей геометрии при любом направлении ветра находится в рабочем положении. Эффективность работы вертикально-осевых ветроэнергетических установок принципиально не зависит от направления ветра, в связи с этим нет необходимости в механизмах и системах ориентации на ветер.

Теоретически доказано, что коэффициент использования энергии ветра идеального ветроколеса горизонтальных пропеллерных и вертикально-осевых установок равен 0.593. К настоящему времени достигнутый на горизонтальных пропеллерных ветроэнергетических установках коэффициент использования энергии ветра составляет 0.48. Проведенные экспериментальные исследования российских вертикально-осевых установок показали, что достижение значения 0.4–0.45 – вполне реальная задача. Таким образом, коэффициенты использования энергии ветра горизонтально-осевых пропеллерных и вертикально-осевых ветроэнергетических установок близки.

Преимуществом вертикально-осевых ветроэнергетических установок является возможность размещения генератора и мультипликатора на фун-

даменте установки и исключения угловой передачи крутящего момента. Это позволяет отказаться от мощной, вероятнее всего многоступенчатой угловой передачи крутящего момента, упростив требования к монтажепригодности оборудования (исключить ограничения по габариту и массе) и к условиям эксплуатации (отсутствие толчков и вибраций). При размещении оборудования на фундаменте значительно улучшаются условия его монтажа и эксплуатации, упрощается передача вырабатываемой электроэнергии.

Сравнение рассмотренных типов ветроэнергетических установок позволяет заключить следующее. В горизонтально-осевых пропеллерных ветроэнергетических установках избегают вводить угловую передачу и размещают оборудование во вращающейся гондоле. При этом неизбежны сложности в связи с повышением требований к монтажепригодности оборудования, условиям его эксплуатации, а также при организации подъема оборудования и его эксплуатации в верхнем положении. Немало трудностей вызывает и передача электроэнергии от вращающегося вместе с гондолой генератора. Для того чтобы избежать скручивания силовой шины, необходимо ограничивать поворот гондолы, вводить коллекторную передачу либо отсоединять и раскручивать шину. Во всех этих случаях в конструкцию ветроустановки вводятся дополнительные устройства, усложняющие ее.

Передача крутящего момента на уровень фундамента связана с введением длинного трансмиссионного вала, однако обусловленное этим усложнение конструкции вполне компенсируется преимуществами нижнего размещения оборудования, даже в том случае, если вал будет послередукторным, то есть быстроходным. При доредукторном (тихоходном) исполнении длинный вал особых конструктивных усложнений не требует.

В горизонтальных пропеллерных ветроэнергетических установках удачно используются достижения авиационной техники, в частности в об-

ласти проектирования лопастей, систем управления углами их установки, трансмиссий. Следовательно, есть все основания полагать, что эти установки достаточно отработаны и их надежности может быть дана высокая оценка. Тем не менее, очевидно, что после отработки конструкции вертикально-осевые ветроэнергетические установки обещают более высокую надежность. Основаниями для такого вывода являются значительное упрощение их конструкции, снижение уровня требований к изготовлению трансмиссий, упрощение условий монтажа и эксплуатации и т. п. Это обусловлено следующими особенностями вертикально-осевых установок: отсутствие механизмов и систем управления поворотом гондолы на ветер, размещение генератора и мультипликатора на фундаменте, отсутствие необходимости в устройствах и системах управления углом установки лопастей, отсутствие проблем с передачей электроэнергии от генератора.

Тихоходные вертикально-осевые ветроэнергетические установки, с точки зрения воздействия на окружающую среду, имеют следующие преимущества перед быстроходными горизонтальными пропеллерными:

- все уровни аэродинамических и инфразвуковых шумов гораздо ниже;
- меньше теле- и радиопомехи;
- меньше радиус разброса обломков лопастей в случае их разрушения и менее вероятно саморазрушение;
- ниже вероятность столкновения лопастей с птицами.

Вертикально-осевые ветроэнергетические установки наиболее эффективны при малой (до 10кВт) мощности.

Рассмотрим наиболее совершенные типы вертикально-осевых ветроустановок.

#### *Ротор Савониуса*

Конструкция ротора Савониуса приведена на рисунке 1. Вращающий момент возникает при обтекании ротора Савониуса потоком воздуха за

счет разного сопротивления выпуклой и вогнутой частей ротора Савониуса.

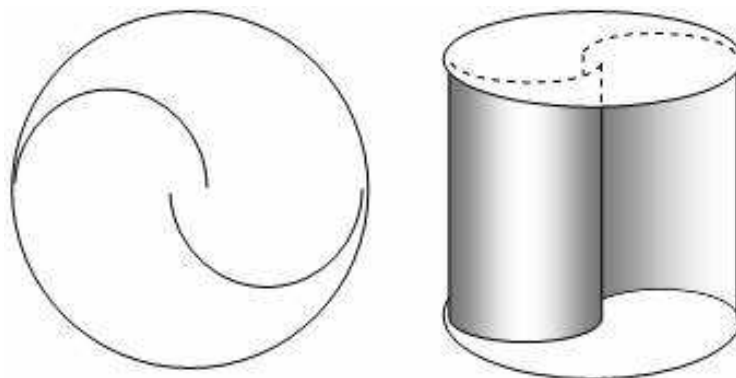


Рисунок 1 – Ротор Савониуса

Преимуществами ветроэнергетической установки этого типа являются низкий уровень шума, небольшая занимаемая площадь, отличная работа на малых ветрах (3–5 м/сек.). Поскольку это ротор с вертикальной осью вращения, то он не нуждается в устройствах ориентирования на ветер, что значительно упрощает конструкцию – ветроколесо отличается исключительной простотой. Однако эта турбина является самой тихоходной, и, как следствие, имеет очень низкий коэффициент использования энергии ветра – всего 0,18–0,24 и КПД 17–18 %.

#### *Ротор Дарье*

Ротор Дарье представляет собой симметричную конструкцию, состоящую из двух и более аэродинамических крыльев, закрепленных на радиальных балках (рис. 2).



Рисунок 2 – Ротор Дарье

На каждое крыло, движущееся относительно потока, действует подъемная сила, величина которой зависит от угла между векторами скорости потока и мгновенной скорости крыла. Максимального значения подъемная сила достигает при ортогональности данных векторов. Ввиду того, что вектор мгновенной скорости крыла циклически изменяется в процессе вращения ротора, момент силы, развиваемый ротором, также является переменным. Поскольку для возникновения подъемной силы необходимо движение крыльев, ротор Дарье характеризуется плохим самозапуском. Самозапуск улучшается в случае применения трех и более лопастей, но и в этом случае требуется предварительный разгон ротора.

Ротор Дарье относится к ветроприемным устройствам, использующим подъемную силу, которая возникает на выгнутых лопастях, имеющих в поперечном сечении профиль крыла. Ротор имеет сравнительно небольшой начальный момент, но большую быстроходность, в силу этого – относительно большую удельную мощность, отнесенную к его массе или стоимости.

Работа ротора Дарье не зависит от направления потока. Следовательно, турбина на его основе не требует устройства ориентации. Ротор Дарье характеризуется высоким коэффициентом быстроходности при ма-



лых скоростях потока и высоким коэффициентом использования энергии потока: площадь, ометаемая крыльями ротора, может быть достаточно большой.

К недостаткам ротора Дарье относятся: плохой самозапуск, низкая механическая прочность, повышенный шум, создаваемый при работе.

Наиболее технологичным является H-образный ротор Дарье (рис. 3).

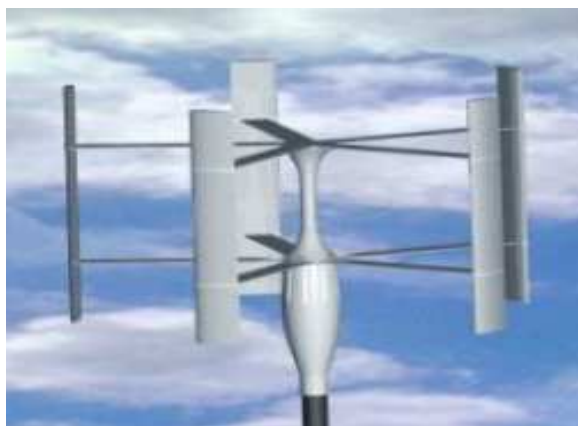


Рисунок 3 – Ротор H-Дарье

Ротор состоит из одной или более лопастей аэродинамического профиля. Установка такого типа является быстроходной (коэффициент быстроходности  $\geq 3$ ), КПД достигает 0,38. Ротор H-Дарье отличается пониженным уровнем шума и полным отсутствием инфразвука. Ветроэнергетическая установка этого типа имеет простую конструкцию и характеризуется высокой степенью надежности.

На основании проведенного анализа можно сделать следующий **вывод**. Вертикально-осевые ветроустановки конструктивно являются более простыми и обладают еще рядом преимуществ перед горизонтально-осевыми ветроустановками. Однако коэффициент использования мощности ветра и КПД у них пока еще несколько ниже, что приводит к увеличению габаритов, а в некоторых случаях и к увеличению материалоемкости. Вместе с тем при использовании вертикально-осевых ветроустановок в автономном режиме или в качестве резервных источников электроэнергии этот недостаток нивелируется. Это объясняется тем, что в автономном или

резервном варианте ветроэлектростанции работают на нагрузку через аккумулятор, который работает в буферном режиме. Кроме того, в этом случае (буферное аккумулирование электроэнергии), можно снизить требования к качеству выходного напряжения и применить упрощенные конструктивные решения задач преобразования ветрового потока в механическую энергию вращения вала (например, нерегулируемые лопасти и т.п.). При этом требуемое качество электроэнергии в канале электроснабжения может быть обеспечено стандартными устройствами преобразования электрической энергии (например, источниками бесперебойного питания типа UPS) с аккумуляторной батареей соответствующей емкости.

#### Список литературы

1. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии; Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Соломин Е.В. Ветроэнергетические установки ГРЦ-Вертикаль // Альтернативная энергетика и экология. 2010 № 1. С. 10–15.
3. Воронин С.М., Бабина Л.В. Работа ветроустановки при изменении направления ветра // Альтернативная энергетика и экология. 2010 № 1. С. 98–100.
4. Беляков П.Ю., Доильницын В.В., Гончаров В.Н., Сапронов Н.В. Математическое моделирование ветроэнергетической установки с ротором циклоидного типа // Прикладные задачи электромеханики, энергетике, электроники: Труды межвузовской студенческой научно-технической конференции; Воронежский государственный технический университет. Воронеж, 2001.