

УДК 621.48

Перспективы развития ветроэнергетических установок с ортогональным ротором

Д.Н. Горелов¹, В.П. Кривоспицкий²

¹*Омский филиал Института математики СО РАН,*

²*ООО “ГРЦ-Вертикаль”, Миасс, Челябинская область*

Анализируются полученные ранее экспериментальные данные по исследованию энергетических характеристик и возможности самозапуска ротора Дарье. Эти результаты использованы при проектировании новых двухъярусных ветроэнергетических установок с прямыми лопастями. Натурные испытания двух вариантов конструкции показали перспективность разработки ветроэнергетических установок с ротором Дарье. При разумном проектировании они не требуют каких-либо устройств для ориентации и запуска ротора, мало чувствительны к порывам ветра и могут иметь высокий уровень энергетических характеристик, не уступающий лучшим образцам установок пропеллерного типа.

В настоящее время в ветроэнергетике основное место занимают горизонтально-осевые ветроэнергетические установки (ВЭУ) пропеллерного типа. Для таких ВЭУ накоплен огромный опыт проектирования и эксплуатации, а в современных конструкциях ВЭУ реализованы последние достижения науки и техники. Дальнейшее совершенствование ВЭУ пропеллерного типа является проблематичным, и нужен поиск альтернативных путей развития ветроэнергетики. Наиболее перспективным путем, по оценкам специалистов [1, 2], является разработка вертикально-осевых ВЭУ с ортогональным ротором, у которого ветровой поток направлен перпендикулярно оси вращения. Такие ВЭУ появились сравнительно недавно. В 1929 г. Савониус предложил ротор с S-образными лопастями, а Дарье в 1931 г. — с изогнутыми. В 1975 г. Масгроув видоизменил ротор Дарье, заменив искривленные лопасти прямыми. Вращающий момент на роторе Савониуса возникает за счет разности сил сопротивления на S-образных лопастях. Коэффициент использования энергии потока для такого ротора не превышает 20 %, что тормозит его практическое применение.

Механизм образования вращающего момента на роторах Дарье–Масгроува иной. На вращающиеся лопасти этих роторов действует пульсирующий поток, аналогичный потоку вокруг машущего крыла [3]. Такой поток создает на лопастях силы тяги, которые вращают ротор. Коэффициент использования энергии ветра для ортогональных роторов с прямыми лопастями может быть выше 40 %, не уступая лучшим горизонтально-осевым ВЭУ пропеллерного типа.

Главная особенность ортогональных роторов — независимость их работы от направления ветрового потока. Это позволяет существенно упростить конструкцию ВЭУ, отказываясь от сложных и малонадежных систем ориентации, необходимых для ВЭУ пропеллерного типа. Другая важная особенность ортогонального ротора с прямыми лопастями — относительно низкая степень быстроходности.

Число быстроходности для таких роторов (отношение окружной скорости лопастей к скорости ветрового потока) на рабочих режимах в 2-3 раза ниже, чем у ВЭУ пропеллерного типа. Это позволяет существенно расширить диапазон скоростей ветра, при которых ВЭУ может работать с максимальным использованием энергии ветра. Положительным фактором является и возможность установки генератора на одном валу с ротором. С другой стороны, эксплуатация ВЭУ с ортогональным ротором выявила ряд проблем, требующих своего решения. Было обнаружено, что для роторов с прямыми лопастями возникают проблемы с запуском. Поэтому до сих пор для запуска таких роторов устанавливаются вспомогательные пусковые устройства, обычно ротор Савониуса. Серьезные проблемы возникают и с ограничением числа оборотов ротора, что необходимо, в первую очередь, для снижения уровня центробежных нагрузок на лопасти. Кроме того, для ряда действующих ВЭУ получен относительно низкий коэффициент полезного действия, что породило стойкое представление о малой эффективности ортогональных роторов с прямыми лопастями. Решение этих и других проблем потребовало проведения всесторонних исследований вертикально-осевых ВЭУ с прямыми лопастями, которые интенсивно ведутся во многих странах с начала 80-х годов. Такие исследования проводятся и в Сибирском отделении РАН. Некоторые результаты этих исследований и их практическая реализация в конкретных конструкциях ВЭУ представлены в настоящей статье.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОТОРА

Прежде всего выясним возможный уровень энергетических характеристик ортогональных ВЭУ с прямыми лопастями. Этот уровень определяется величиной коэффициента использования энергии потока $c_p = M\omega/P_f$ (M — аэродинамический момент, вращающий ротор, ω — круговая частота вращения ротора, P_f — мощность ветрового потока в поперечном сечении ротора). Для горизонтально-осевых ВЭУ пропеллерного типа этот коэффициент ограничен значением $c_p = 0,593$, соответствующим идеальному пропеллеру. Для реальных ВЭУ пропеллерного типа коэффициент использования энергии ветра много ниже и лежит обычно в пределах $0,3 < c_p < 0,45$. Крутящий аэродинамический момент для таких ВЭУ создается подъемными силами, действующими на лопасти, а аэродинамический расчет успешно проводится в рамках модели стационарного движения жидкости. Однако для ортогонального ротора с прямыми лопастями ситуация оказывается много сложнее. Аэродинамический расчет в рамках модели стационарного течения в большинстве случаев не позволяет правильно предсказать величину крутящего аэродинамического момента и коэффициента использования энергии потока [2]. Причина кроется в существенной нестационарности и сложной структуре течения около вращающегося ротора. Теоретическое исследование таких течений чрезвычайно сложно и дает ограниченное представление о механизме взаимодействия вращающегося ротора с потоком. Поэтому основной информационной базой при проектировании ортогональных роторов является модельный эксперимент. Наиболее полные экспериментальные данные представлены в работах [4, 5]. Исследовалось влияние на коэффициент использования энергии потока c_p геометрических параметров ротора и лопастей, числа быстроходности, угла установки лопастей, числа Рейнольдса и других параметров. Наибольшее значение коэффициента c_p зафиксировано на уровне $c_p = 0,45$. В частности, установлено существенное влияние на коэффициент c_p относительной толщины профиля лопасти [4]. Максимальное значение c_p достигалось при относительной толщине профиля равной 15–20 %. Следует отметить, что именно такую толщину профиля имеет хвостовой плавник

дельфина, коэффициент полезного действия которого как движителя может быть близок к 1. Такое же высокое значение КПД может иметь и машущее крыло. Аналогия между машущим крылом и ортогональным ротором позволяет сделать предположение, что коэффициент использования энергии потока у ортогонального ротора может быть выше, чем у идеального пропеллера. Для проверки этого предположения, с учетом оптимальных данных работ [4, 5], была изготовлена модель трехлопастного одноярусного ротора, которая затем испытана в гидроканале [6]. Предположение о возможности работы ортогонального ротора с высокой эффективностью подтвердилось. Для идеального ротора (без траверс) получено значение $c_p = 0,72$, которое выше предельного значения коэффициента использования энергии потока для горизонтально-осевых ВЭУ пропеллерного типа. Дальнейшие исследования в этом направлении [7] подтвердили результаты работы [6], но показали существенное отличие идеального ротора без траверс от реального ротора с траверсами. В реальном роторе вращающий аэродинамический момент и, соответственно, коэффициент использования энергии потока оказались много ниже. Причиной тому являются силы сопротивления, действующие на траверсы. В свете этих результатов можно сделать вывод, что основной резерв в повышении эффективности ортогонального ротора с прямыми лопастями состоит в совершенствовании траверс.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАПУСКА

Не менее важна проблема запуска ортогонального ротора с прямыми лопастями. На рабочем режиме, когда ротор вращается в ветровом потоке, лопасти ротора обтекаются пульсирующим потоком. В результате на лопасти действуют силы тяги, создающие вращающий аэродинамический момент. Но для выхода на рабочий режим ротор следует раскрутить. Принудительная закрутка с помощью специального устройства малопривлекательна. Создание такого устройства и обеспечение его работы требуют дополнительных материальных затрат, утяжеляют ВЭУ и портят ее общий дизайн. Идеальной конструкцией является ВЭУ с ротором, способным самостоятельно раскрутиться без специального пускового устройства. При порывистом ветре ротор обычно не остается неподвижным, а поворачивается на некоторый угол. При определенном сочетании таких порывов наблюдалась даже закрутка ротора с выходом на рабочий режим. Тенденция к закрутке ротора растет с увеличением числа лопастей. Помогает закрутке и переход от одноярусного ротора к двухъярусному. Для выяснения возможности самостоятельного запуска ротора были проведены экспериментальные исследования моделей двухъярусного ротора с двумя и тремя лопастями в каждом ярусе [7].

Ярусы ротора были сдвинуты на угол 90 градусов. Варьировались ширина (хорда) лопастей и частота вращения ротора. Эксперимент проводился в гидроканале Новосибирской академии водного транспорта, глубина и ширина которого были существенно больше размеров моделей. Результаты эксперимента показали возможность самостоятельного запуска двухъярусного ротора как с двумя, так и с тремя лопастями в каждом ярусе при достаточно большой ширине лопастей. При этом максимальное значение коэффициента использования энергии потока $\max c_p$ достигалось для определенной ширины лопасти, связанной с числом лопастей в каждом ярусе n_b коэффициентом $\sigma = bn_b/D$ (b — ширина лопасти, D — диаметр ротора). В частности, для $n_b = 2$ максимальное значение c_p достигалось при $\sigma = 0,28$ и для идеального ротора оказалось равным $\max c_p = 0,6$. При уменьшении ширины лопасти происходит падение как $\max c_p$, так и способности ротора к самостоятельному запуску. С увеличением же ширины лопасти запуск улучшается, но

значение $\max c_p$ становится меньше. Другая особенность увеличения ширины лопасти — уменьшение числа быстроходности, при котором достигается $\max c_p$.

РАЗРАБОТКА И НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВЭУ

Рекомендации работ [6, 7] использовались при проектировании новых двухъярусных вертикально-осевых ВЭУ в ООО «ГРЦ-Вертикаль» (г. Миасс, Челябинская обл.). Были спроектированы две ВЭУ мощностью 1 и 3 кВт. Установка мощностью 1 кВт имеет четыре лопасти по две в каждом ярусе. Ярусы развернуты относительно друг друга на 90 градусов. Каждая лопасть состоит из трех участков: горизонтального, вертикального и наклонного. При этом лопасти верхнего яруса являются зеркальным отражением нижнего. Это позволило получить конструкцию, в которой роль траверс играют горизонтальные и наклонные участки лопастей (рис. 1). Диаметр ротора 2,3 м, высота 3 м. Были изготовлены и испытаны в натуральных условиях четыре ротора с симметричными лопастями с относительной толщиной профиля 16, 18, 20 и 22 %. Лучшие результаты получены для 20- и 22-процентных профилей.

ВЭУ мощностью 3 кВт выполнена в двух вариантах: по 4-лопастной схеме (по 2 лопасти в каждом ярусе) и 6-лопастной схеме (по 3 лопасти в каждом ярусе). Наиболее удачной оказалась 6-лопастная схема. В этом случае ярусы развернуты относительно друг друга на 60 градусов, концы лопастей соединены кольцевым бандажом, а траверсы расположены только в средней плоскости ротора (рис. 2). Две установки мощностью 1 кВт каждая и одна мощностью 3 кВт (6-лопастная) были установлены и испытаны в США (Rohnert Park, штат Калифорния, фирма «Empire Magnetics»). При испытаниях проводились измерения скорости ветра, число оборотов ротора и снимаемая с генератора мощность. Было установлено,



Рис. 1. 4-лопастная двухъярусная ВЭУ мощностью 1 кВт.



Рис. 2. 6-лопастная двухъярусная ВЭУ мощностью 3 кВт.

что в установке мощностью 1 кВт ротор запускался при скорости ветра 2,4–2,6 м/с, а коэффициент полезного действия достигал 34–36 %.

Установка мощностью 3 кВт показала несколько лучшие результаты: запуск ротора возникал при скорости 1,6–2 м/с, ротор практически равномерно вращался при порывах ветра, а коэффициент полезного действия достиг 39–40 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали перспективность разработки ветроэнергетических установок с ортогональным ротором типа Дарье–Масгроува. Эти установки работают при любом направлении ветрового потока, не требуя каких-либо устройств ориентации, мало чувствительны к порывам ветра на рабочем режиме, при разумном проектировании могут самостоятельно запускаться и иметь высокий уровень энергетических характеристик, не уступающий лучшим образцам ВЭУ пропеллерного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галась М.И., Дымковец Ю.П., Акаев Н.А., Костюков И.Ю. О целесообразности создания вертикально-осевых ветроэлектрических установок мегаваттного класса // Энергетическое строительство. — 1991. — № 3. — С. 33–37.
2. Турян К.Дж., Стрикленд Дж.Х., Берг Д.Э. Мощность ветроэлектрических агрегатов с вертикальной осью вращения // Аэрокосмическая техника. — 1988. — № 8. — С. 105–121.
3. Горелов Д.Н. Проблемы аэродинамики ветроколеса Дарье // Теплофизика и аэромеханика. — 2003. — Т. 10, № 1. — С. 47–51.
4. Баклушин П.Г., Вашкевич К.П., Самсонов В.В. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик ортогональных крыльчатых ветроколес // Сб. науч. тр. Гидропроекта. — 1988. — Вып. 129. — С. 98–105.
5. Иванов И.И., Иванова Г.А., Перфилов О.Л. Модельные исследования роторных рабочих колес ветроэнергетических станций // Сб. науч. тр. Гидропроекта. — 1988. — Вып. 129. — С. 106–113.
6. Горелов Д.Н., Кузьменко Ю.Н. Экспериментальная оценка предельной мощности ветроколеса с вертикальной осью вращения // Теплофизика и аэромеханика. — 2001. — Т. 8, № 2. — С. 329–334.
7. Горелов Д.Н., Вьюгов В.В., Кривоспицкий В.П. Экспериментальное исследование двухъярусного ротора Дарье // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12, № 2. — С. 243–248.

Статья поступила в редакцию 14 августа 2007 г.