

Моделирование ряда модификаций перспективной ветроэнергетической установки вихревого типа, использующих направляющие воздушный поток структуры различных топологий

В.А. Костюков, А.М. Маевский, Д.Д. Павленко

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Вводится представление о направляющих структурах директорного и рефлекторного типов, способствующих формированию воздушных потоков, заданным образом способствующих увеличению некоторой целевой величины ветроэнергетической установки, например, механической мощности на валу её ротора. Эти структуры могут быть практически использованы для усиления крутящего момента на валу ротора за счет увеличения полезной интерференции его со статором. Выработаны сферы применения этих направляющих структур для создания различных аэродинамических эффектов, таких, как увеличение сечения взаимодействия ветрового потока с ротором, гашение паразитной турбулентности на кромке статора и др.

На базе этих понятий предложены, аэродинамически проанализированы и подкреплены соответствующими численными расчетами два варианта модернизации конструкции перспективной вихревой ветроэнергетической установки, рассмотренной в предыдущих работах авторов. В результате этого, во-первых, было подтверждено представление о типах и характере влияния на крутящий момент ротора установки указанных направляющих структур. Во-вторых, выбран наиболее оптимальный вариант модернизации ротора, который позволил увеличить мощность на его валу в среднем на 45% по отношению к соответствующей мощности для конструкции ВЭУ с исходной формой ротора в рабочем диапазоне скоростей ветра от 1 до 12 м/с.

Материалы статьи могут быть использованы для проектирования оптимальных по критерию максимума аэродинамической мощности ротора ветроэнергетических установок, их станций, а также комплексных силовых энергетических установок, включающих в качестве одного из возобновляемых источников энергии ветроэнергетическую установку.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, комплексная силовая энергетическая установка, структуризация воздушного потока, направляющая структура директорного типа, направляющая структура рефлекторного типа, полезная интерференция статора и ротора, вихревая структура над ротором, эффективное сечение взаимодействия ветрового потока с ротором, крутящий аэродинамический момент ротора, аэродинамическая оптимизация по критерию максимума мощности, численный аэродинамический расчет, метод скользящих сеток.

Введение

В настоящее время существует большая группа объектов, стационарного базирования и подвижных, в том числе робототехнических комплексов, которая нуждается во вспомогательных автономных источниках энергии.

Например, разработкой и внедрением альтернативных источников энергии на морских надводных платформах с целью снижения общего потребления ими топлива занимаются многие международные компании [1,2].

В последнее время все большее число научных исследований свидетельствует в пользу перспективности ВЭУ с вертикальной осью вращения, неоспоримыми преимуществами которых по отношению к классическим, горизонтально-осевым ВЭУ, являются независимость от направления ветра, в среднем более низкая скорость запуска ротора и возможность установки редуктора с генератором в нижней части установки, что удешевляет всю её конструкцию.

В работах [3-5] проведены исследования перспективной ветроэнергетической установки (ВЭУ) с вертикальной осью вращения. В частности, там были разработаны геометрические аэродинамические формы, направленные на повышение аэродинамической мощности на валу ротора ВЭУ.

Путем непосредственного аэродинамического моделирования этой ВЭУ было установлено [3-5], что аэродинамическая мощность на валу её ротора в рабочем диапазоне ветров превосходит соответствующие мощности используемых вертикально-осевых ВЭУ, например, роторов Дарье различных конфигураций [6], Савониуса, на 6-40%, при прочих равных условиях.

Работа указанной вихревой ветроэнергетической установки основана на принципе полезной аэродинамической интерференции между статической и роторной частями установки, а также использовании лопастей ротора специальной формы, эффективно воспринимающих как горизонтальные, так и вертикальные восходящие потоки (см. рис. 1). Статическая часть установки состоит из вертикального канала переменного сечения – раструба, и нижней направляющей структуры, увеличивающей эффективное сечение

взаимодействия набегающего ветрового потока с ротором. Вихрь, возникающий в результате вращения ротора, концентрируется внутри раструба и над его верхней частью. Образованные области пониженного давления вызывают эффект дополнительной тяги, что увеличивает момент вращения ротора. Возникающая при этом над ним вихревая структура дополнительно подпитывает энергией ротор, находясь с ним в динамическом равновесии.

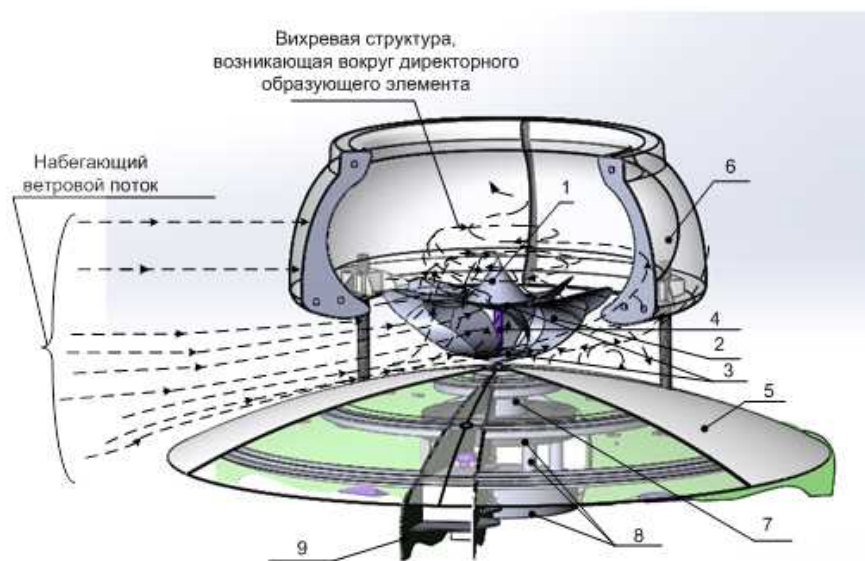


Рис.1 – Конструкция и основные потоки воздуха рассматриваемой ВЭУ вихревого типа (раструб показан в разрезе)

Возможен вариант применения такой ВЭУ в составе комплексной силовой установки для катера малого водоизмещения [3-5].

Таким образом, конструкция рассматриваемой ВЭУ существенно использует многосоставной статор, аэродинамическое влияние элементов которого друг на друга и на ротор способствует повышению крутящего момента последнего.

Уже около ста лет известна компоновка «ротора в кольце», позволяющая значительно уменьшить потери, вызванные отрывом потока на концах лопастей пропеллера самолета [7]

В работах [7,8] рассматриваются ВЭУ, где используется аэродинамическая интерференция ротора со специальными статическими устройствами, выполняющими функцию структуризации набегающего потока для повышения коэффициента его использования и быстроходности установки.

Направляющей структурой назовем любую законченную часть конструкции ВЭУ, выполняющую функции упорядочения или перенаправления набегающего на неё воздушного потока с целью достижения определенного аэродинамического эффекта. Последний может заключаться в улучшении полезного интерференционного взаимодействия различных частей конструкции установки при её обдуве ветровым потоком для максимизации некоторого функционала качества. Например, крутящего момента на валу ротора ВЭУ, степени шумности установки при прочих равных условиях и т.п.

В настоящей статье ставится задача наметить одно из возможных направлений совершенствования формы ротора описанной конструкции с целью повышения указанного крутящего момента, а также рассмотреть более подробно аэродинамическую интерференцию элементов статора с ротором.

Заметим, что корректный выбор компоновки ВЭУ и адекватный её аэродинамический расчет необходим для эффективного управления этой установкой, а также системами таких установок, которые могут входить в более сложные энергетические системы [9].

Базисом настоящего исследования является использование двух типов направляющих структур.

Типы направляющих структур, используемых в конструкции рассматриваемых ВЭУ

Направляющая структура (НС) может быть, как неподвижной, так и подвижной.

Будем рассматривать направляющие структуры (НС) двух основных типов: а) рефлекторного; б) директорного. На рисунке 2 показана компоновка ВЭУ, включающая оба этих типа НС.

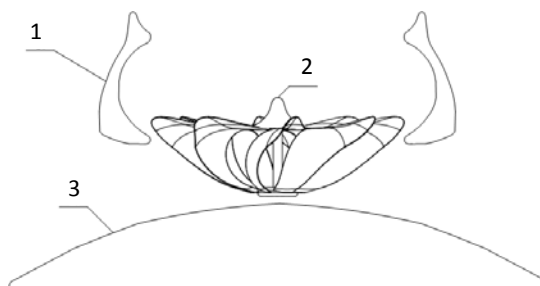


Рис. 2 – Схема ВЭУ с НС

К первому, рефлекторному, типу отнесем такие НС, трехмерная форма которых является топологически многосвязной, например, эквивалентной тороидальной, или более сложной (см. элемент 1 на рис. 2). Геометрическую форму с такой топологией невозможно, даже на уровне мысленного эксперимента, стянуть в точку какими-либо деформациями без нарушения структурной целостности этой формы. Особенностью тех форм этого типа, которые мы будем рассматривать, является возможность указать конечное число односвязных двумерных границ, при наложении которых на исходную форму в виде некоторых «заплат» образуется некоторое конечное число односвязных трехмерных полостей. Как правило, каждую из таких границ мы будем относить ко входным, или к выходным, в зависимости от преимущественного течения потока сплошной среды через неё. Полученные таким образом полости расположены внутри исходных трехмерных форм; их объединение мы будем называть характерной рабочей областью НС рефлекторного типа.

Ко второму, директорному, типу отнесем такие НС, трехмерная форма которых является топологически односвязной, что означает возможность

мысленно стянуть эту форму в одну точку путем применения некоторых деформаций. В этом случае характерной областью действия такой НС является некоторая окрестность вокруг неё, топологически эквивалентная, очевидно, шаровому слою.

В том случае, когда директорная НС является элементом ротора, образующим с ним единое целое, мы будем говорить о направляющем элементе (ротора).

На рисунке 2 элементы 2 и 3 относятся к директорному типу НС, причем элемент 2 является директорным элементом ротора.

На рисунке 3 представлены некоторые, реализованные на практике, ветроэнергетические установки и комплексы, содержащие в своем составе указанные направляющие структуры.



а) ВЭУ с обтекателем (Windtronics ВТПS6500) б) «летающий генератор» фирмы Altaeros Energies (США) в) вертикально-осевая ВЭУ разработки фирмы Omniflow (Португалия)

Рис. 3 – Некоторые из существующих ветроэнергетических установок и комплексов, содержащих в своем составе направляющие структуры рефлекторного и директорного типов

Заметим, что конструкция горизонтально-осевой ВЭУ, приведенной на рис. 3а, кроме рефлекторной направляющей структуры – кольцевого обода вокруг роторной части, также имеет и директорную статическую НС – в виде конуса, закрепленного на оси симметрии рефлекторной НС.

Модернизация конструкции ВЭУ вихревого типа путем введения дополнительных направляющих структур

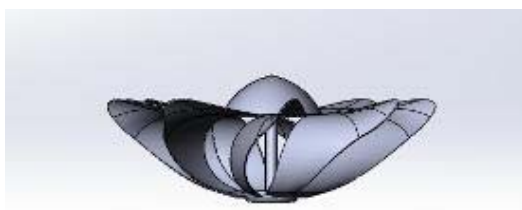
Первым направлением модернизации конструкции ротора, рассмотренного в [3, 4], является введение дополнительного директорного направляющего элемента – ДНЭ (см. элемент 2 на рис. 2).

Далее будут рассмотрены два варианта этого типа: ротор с полусферическим директорным элементом (см. рис. 4 а)- вариант 1, и ротор с директорным элементом, оптимизированным по профилю и размеру (см. рис. 4 б) – вариант 2.

Другим направлением модернизации конструкции ротора является непосредственное изменение лопастей и/или их компоновки. Так, аэродинамический анализ показал, что ротор с четырьмя лопастями специальной формы, полученной из исходной путем дополнительных изгибов, позволяет достичь крутящего момента на валу ротора, большего на 30% по сравнению с исходной его формой - вариант 3. Дополнительный изгиб формы лопасти был произведен вокруг продольной её оси на 81 градусов, а также изменена ориентация лопатки относительно оси вращения ротора с целью увеличения средней площади взаимодействия лопатки с набегающим потоком. При этом требуется, чтобы в центральной части ротора было достаточное пространство для отхода перенаправляемых лопастями потоков воздуха, которые образуют далее вихревую структуру.

Если снабдить ротор, рассмотренный на рис. 4 в, дополнительным направляющим элементом конической формы, то крутящий момент возрастает еще на 12% - вариант 4.

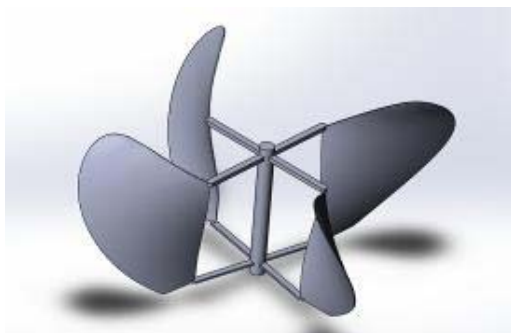
На рисунке 4 представлены геометрии исходного ротора с дополнительным неоптимизированным (а) и оптимизированным ДНЭ (б), ротора с измененными лопастями без ДНЭ (в) и с ДНЭ (г).



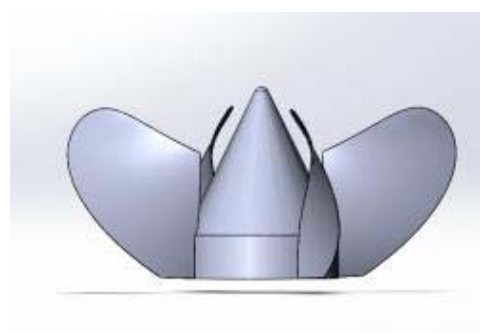
а) ротор с исходным ДНЭ - вариант 1



б) ротор с оптимизированным ДНЭ - вариант 2



в) модернизированный ротор с измененными лопастями - вариант 3



г) модернизированный ротор с измененными лопастями и ДНЭ - вариант 4

Рис. 4 – Конструкции ротора: исходный ротор с дополнительным неоптимизированным (а) и оптимизированным ДНЭ (б), ротор с измененными лопастями без ДНЭ (в) и с ДНЭ (г)

Прежде всего, было произведено аэродинамическое исследование одиночных роторов, приведенных на рис. 4 модернизированных конструкций, которое показало превышение момента вращения ротора с конструкцией по варианту 4 над соответствующим моментом для конструкции ротора по варианту 1 на 46%.

Далее, было произведено аэродинамическое исследование вихревой ВЭУ в полной компоновке с ротором по варианту 4. В результате было установлено, что такая ВЭУ позволяет значительно превзойти по крутящему моменту, во-первых, исходную компоновку, представленную на рис. 1 а, - на 45%, и, во-вторых, - одиночный ротор по варианту 4 – на 10%.

Принцип действия ВЭУ вихревого типа, содержащей направляющие структуры

Для объяснения полученных результатов рассмотрим общий принцип действия ВЭУ вихревого типа, содержащей в своем составе направляющие структуры различных типов, рассмотренных в начале статьи.

На рассмотренном ранее рисунке 1 представлена схематичная трехмерная модель сконфигурированной конструкции такой ВЭУ с указанием основных её частей. Для определенности взят ротор по варианту 2. Здесь же указаны направления течения основных потоков, участвующих в формировании крутящего момента ротора ВЭУ.

На рисунке 1 введены следующие обозначения: 1 - директорный направляющий элемент; 2 – лопасти ротора; 3 – соединительные диски для крепления лопастей; 4 – вал ротора; 5 – нижняя направляющая структура; 6 – раструб; 7 – нагрузочная часть, например, электрогенератор; 8 – несущая конструкция нагрузки и вала ротора, выполненная с возможностью осуществлять валом осевое вращение; 9 – опоры нижней направляющей структуры.

Конструкция ВЭУ содержит: а) ротор, выполненный в виде вала, соединенного с двумя дисками, закрепленных на дисках лопастями, включающий объемную осесимметричную фигуру, расположенную в верхней части ротора, являющуюся его продолжением и вращающуюся вместе с ним (директорный направляющий элемент ротора); б) установленную на опорах нижнюю направляющую структуру директорного типа, выполненную в виде объемной фигуры вращения, осесимметричную с ротором и находящуюся под ним на определенном расстоянии от нижнего края ротора; в) установленную на опорах вертикальную направляющую структуру, выполненную в виде полой объемной фигуры вращения (направляющая структура рефлекторного типа или раструб),

осесимметричную с ротором и расположенную относительно него так, что лопасти ротора частично выступают из нижней части этой структуры.

При воздействии набегающего потока на крыльчатку (2) ротора ВЭУ возникает аэродинамический крутящий момент, который передается с помощью соединительных дисков 3 на вал 4 ротора, приводя его в состояние вращения. Концентрирующая нижняя направляющая структура 5 способствует эффективному использованию набегающего ветрового потока [4, 5]. Ротор при своем вращении формирует в верхней своей части вихревую структуру, образуемую той частью воздушного потока, которая отбрасывается лопастями ротора. Образовавшаяся вихревая структура начинает формировать значительный перепад давлений между верхней и нижней частями ротора за счет наличия директорного направляющего элемента 1. А именно, указанный элемент формирует достаточно большие вертикальные скорости восхождения и угловые скорости вращения частиц вихревой структуры, причем так, что эффективный радиус вихря на вертикальном уровне кромки раструба становится несколько меньше размеров раструба на этом уровне, что значительно уменьшает влияние на основной вихрь паразитных вихреобразований вследствие срыва потока на кромке раструба. Директорный направляющий элемент 1 близок по форме к конусу, с вершиной, направленной вверх, однако имеет несколько изогнутые в меридиональных плоскостях образующие, профиль которых подобран из условия минимизации срыва потока на указанной вершине.

Во-вторых, непосредственно над верхней частью раструба скорость практически равна скорости невозмущенного потока и поэтому значительно больше, чем скорость останавливаемого ротором потока под нижней частью раструба. Комплексное действие этих двух факторов приводит, согласно закону Бернулли, к возникновению перепада давлений: в окрестности ротора над ним давление становится значительно меньше, чем давление

непосредственно под ротором, что приводит к возникновению вертикальных восходящих потоков. Эти потоки усиливают вихревую структуру, способствуют сохранению её устойчивости и тем самым увеличивают её воздействие на ротор, что способствует значительному повышению крутящего момента на валу 4 и, электрической мощности электрогенератора 7, либо выходной мощности любого другого устройства нагрузки.

Уменьшение взаимодействия основной вихревой структуры с побочными вихрями, формирующимися вследствие срыва потока на верхней кромке раструба, является причиной уменьшения степени шума рассматриваемой установки по сравнению с конструкцией, включающей ротор без ДНЭ [3-5].

Таким образом, в предлагаемой конструкции ВЭУ использованы два принципа формирования вихревых структур – на базе рефлекторной направляющей структуры (раструба), в которую заглублен вращающийся ротор на определенное расстояние, а также директорных направляющих структур: директорного направляющего элемента, который является продолжением ротора и вращается вместе с ним, и нижней направляющей структуры. Как будет следовать из результатов cfd-анализа, при такой комбинированной компоновке ВЭУ существует возможность получения крутящего момента, большего, чем в случаях установок, где оба этих принципа используются порознь. Для реализации такой возможности была произведена аэродинамическая оптимизация обводов основных конструктивных элементов такой установки.

Моделирование ВЭУ вихревого типа, содержащей направляющие структуры, cfd-методами и его результаты

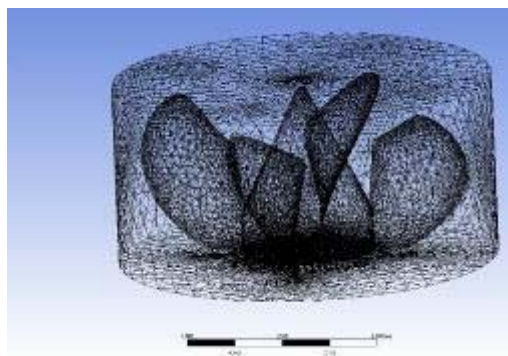
Описание процесса cfd-расчета. Процесс *cfd*-расчета (computational fluid dynamic) ВЭУ проводился в программном комплексе *Ansys Fluent* с помощью метода скользящих сеток (sliding mesh).

Для создания структурированной сетки использовался редактор *ansys meshing* с использованием стандартных инструментов *Size* и *Inflation*. Сетка расчетной области построена на базе функции *curvature*, что позволяет наилучшим образом учесть области геометрии с повышенной кривизной.

Например, для случая полной компоновки ВЭУ с ротором по варианту 4 построенная сетка имела 2085612 ячеек; минимальный размер ячеек 0,01 м; средний размер ячеек 0,83 м; средний показатель ортогонального качества равняется 0.88, что является необходимым условием достаточно точного расчета. На рисунке 5 а представлена топология и детальная структура сетки в окрестности твердотельных границ области расчета; на рисунке 5 б - расчетная сетка внутреннего вращающегося домена, соответствующего ротору.



а) полная расчетная сетка



б) сетка вращающегося домена

Рисунок 5 - Сеточная модель ВВЭУ

Аналогичная по параметрам сетка была построена для всех остальных рассмотренных вариантов конструкций ВЭУ.

Для проведения *cfd*-анализа использовались две модели турбулентности: простая двухпараметрическая *k-ε*-модель; б) "RNG" *k-ε*-модель. В первой модели решаются два уравнения переноса, определяющие

турбулентную скорость и масштаб длины. Она получила широкое применение в решении практических инженерных задач вследствие своих ошибкоустойчивости, экономичности и разумной точности для широкого диапазона турбулентных потоков. Постоянные коэффициенты для этой модели турбулентности получены опытным путем, поэтому она является полуэмпирической.

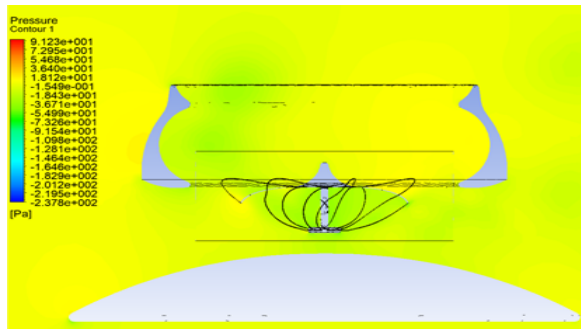
В "RNG" k-ε модели учитывается переменность турбулентных чисел Прандтля и потому она применима для расчета низкорейнольдсовых течений.

Дополнительный параметр, учитывающий циркуляцию турбулентности, улучшает точность расчета течений с закруткой потока. Но стоит отметить, что эта модель эффективно работает при достаточно качественном сеточном разрешении в области пограничного слоя.

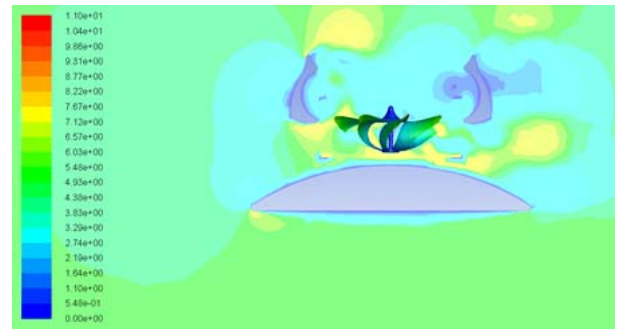
Эти особенности делают RNG k-ε модель более точной и надежной для широкого диапазона турбулентных течений, чем в случае со стандартной k-ε моделью.

Рассмотренные модели турбулентности успешно применяются как для анализа гидро-, аэродинамических характеристик подвижных роботизированных объектов при различных числах Рейнольдса и Маха в режимах стационарного обтекания [10, 11], так и для исследования аэродинамики современных горизонтально-осевых [12, 13], так и вертикально-осевых ВЭУ [14-16]. В частности, в работе [14] рассматриваются особенности ВЭУ, серийно выпускаемой португальской фирмой Omni-flow для электроснабжения потребителей мощностью до 3 кВт. В работе [15] авторы анализировали твист-эффект лопастей турбины ВЭУ типа Дорье, а в работе [16] рассмотрены возможности увеличения аэродинамического качества лопасти этого же типа за счет использования впадин специальной формы на её профиле. Статья [17] посвящена изучению и моделированию процесса старта вертикально-осевой ВЭУ.

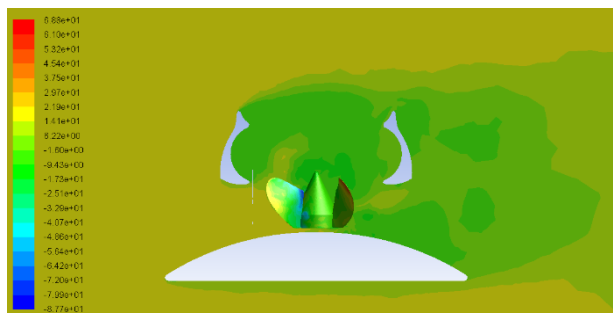
Результаты cfd-исследования. На рисунке 6 представлены характерные распределения полей давления и модуля скорости в вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии двух конструкций ВЭУ в полной сборке: каждая из конструкций включает раструб и нижнюю НС; первая включает модернизированный по первому варианту ротор (рис. 6 а, б), вторая – ротор по варианту 4 модернизации (рис. 6 в, г). Сравнение этих распределений для двух вариантов компоновок показывает, что средние в малых окрестностях установок значения градиентов давления и скорости для компоновки с ротором, модернизированным по варианту 4, значительно превосходят соответствующие значения для первой полной компоновки.



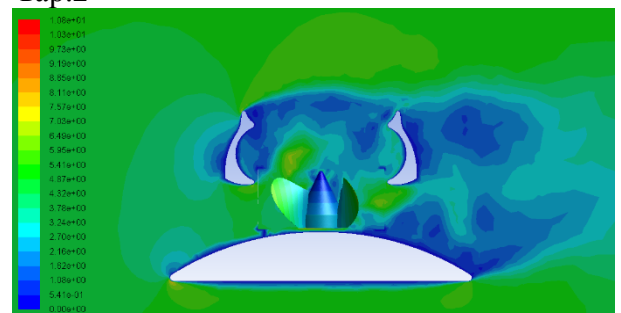
а) распределение по давлению в верт. пл. для полной сборки ВЭУ с ротором по вар. 2



б) распределение по верт. скорости в верт. пл. для полной сборки ВЭУ с ротором по вар.2



в) распределение по давлению в верт. пл. для полной сборки ВЭУ с ротором по вар. 4



г) распределение по верт. скорости в верт. пл. для полной сборки ВЭУ с ротором по вар. 4

Рис. 6 – Характерные распределения полей давления и модуля вертикальной скорости в вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии двух конструкций ВЭУ в полной сборке: первая с ротором по варианту 2 (а, б), вторая – с ротором по варианту 4 (в, г).

В таблице 1 в строках со второй по пятую приведены полученные в результате cfd-расчета значения крутящих моментов на валу роторов конструкций, приведенных на рис. 4 а, б, в, г, соответственно, для случая скорости ветра $V=5\text{ м/с}$, угловой скорости вращения $\omega=6,28\text{ рад/с}$ и диаметров роторов всех конструкций $D=2\text{ м}$. Из этих данных, в частности, видно, что наиболее эффективным является ротор по варианту 4: его момент превышает соответствующий момент исходного ротора на 46%. Такой результат объясняется значительным ростом мощности и устойчивости вихревой структуры, образующейся над ротором варианта 4, вследствие специальной формы его лопастей и наличия директорного направляющего элемента.

Кроме того, специальный изгиб лопастей этого ротора увеличивает силу давления потока на лопасть, движущуюся в данный момент по направлению потока, и уменьшает силу сопротивления движению противоположной лопасти, движущейся в этот же момент примерно против набегающего потока, по отношению к исходной форме ротора. Это значительно повышает соответствующий крутящий момент.

Таблица №1

Значения аэродинамических моментов вращения на роторах исходной и модернизированных конструкций ВЭУ

Тип конструкции	Ротор по варианту 1	Ротор по варианту 2	Ротор по варианту 3	Ротор по варианту 4	ВЭУ в полной сборке с ротором по варианту 2	ВЭУ в полной сборке с ротором по варианту 4
Значение крутящего момента: $M, \text{ Н*м}$	8.2	9	15,48	16.8	10.1	18,5

В двух последних колонках таблицы 1 отображены значения крутящих моментов для ВЭУ в полной сборке с роторами вариантов 2 и 4, соответственно. Видно, что полная компоновка ВЭУ с ротором по варианту 4 значительно превосходит по моменту компоновку с ротором варианта 2 (см. рис. 1 а) - на 45%, и, во-вторых, - одиночный ротор по варианту 4 – на 10%.

Заключение

В настоящей работе предлагается модернизированная конструкция ротора вихревой ВЭУ, способствующая значительному увеличению крутящего момента ротора по сравнению с ранее рассмотренной его конструкцией – более чем на 40%.

Путем введения понятия о направляющих структурах рефлекторного и директорного типов, способствующих формированию потока в окрестности ротора с заданными аэродинамическими качественными свойствами, разработана обобщенная компоновка вихревой ВЭУ, включающая ротор с директорным направляющим элементом и двусвязный статор, состоящий из одной рефлекторной структуры – раструба, и одной нижней директорной структуры.

В качестве подтверждения высказанных теоретических соображений предложена новая компоновка ВЭУ – частный случай указанной обобщенной, и отличающаяся от рассмотренной компоновки-аналога наличием модернизированного ротора вместо исходного.

Путем численных расчетов показано, что ВЭУ в полной компоновке с ротором по варианту 4 развивает момент на валу, больший на 10% по сравнению с аналогичным моментом для соответствующего одиночного ротора, и больший на 45% - по сравнению с соответствующей исходной компоновкой ВЭУ, включающей ротор с неизменными лопастями и ДНЭ.

Эти расчеты, безусловно, показывают положительную роль рефлекторной НС для увеличения момента ротора.

Показано, что наличие оптимизированного директорного направляющего элемента, с одной стороны, и изменение форм и компоновки лопастей ротора – с другой, являются двумя факторами, каждый из которых, независимо от другого способен привести к значительному повышению крутящего момента ротора, что видно из возрастающего характера последовательностей значений: «1, 2, 5 колонки» и «3, 4, 6 колонки».

Полученные результаты могут быть использованы для проектирования оптимальных по критерию максимума аэродинамической мощности ротора ветроэнергетических установок, их станций, а также комплексных силовых энергетических установок, включающих в качестве одного из возобновляемых источников энергии ветроэнергетическую установку.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-08-00473 а, от 25/12/2018 на тему: «Разработка и исследование методов оптимизации и управления процессами преобразования энергии в силовых установках комплексного типа, в том числе преобразующими поток сплошной среды», а также гранта УМНИК № 14459ГУ/2019.

Литература

1. Innovative Technologies & Solutions for Sustainable Shipping // Eco Marine Power. URL: ecomarinepower.com/en/about-us (date of access: 26.10.2018).
 2. Ocius Technology Limited (Australia). URL: ocius.com.au (date of access: 26.10.2018).
 3. Медведев М.Ю., Костюков В.А., Маевский А.М., Павленко Д.Д.. Разработка комплексной силовой энергетической установки для надводных
-

робототехнических платформ // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. №01. с. 194-208.

4. Kostjukov V.A., Medvedev M.Y., Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., D.I. Bulanovich, D.D. Pavlenko." Control law synthesis of the wind-driven power-plant with variable geometry," 2019 . EAI Endorsed Transactions on Energy Web., pp. 125-130.

5. Костюков В.А., Шевченко В.А. Особенности электромеханического управления комплексной силовой энергетической установкой с ветропреобразовательным устройством вихревого типа // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5299.

6. Горелов Д.Н. Энергетические характеристики ротора Дарье (обзор); 325-333.- Издательство Сибирского отделения РАН (2010).

7. Хаскин Л.Я. Аэродинамика ветроколеса с обтекателем и выходным устройством. – Ученые записки ЦАГИ. 1993, т.24, №4., с. 133-144.

8. Михненко Л.В. Ветроэнергетическая установка планетарного типа. Научный вестник МГТУ, №125, 2008, стр. 14-18.

9. Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев. Идентификация состояния распределительной электрической сети в системах автоматизации учета и управления энергопотреблением. Мехатроника, автоматизация, управление, 2016, т. 17, № 10, стр. 651-656.

10. Костюков В.А., Маевский А.М., Гуренко Б.В. Математическая модель надводного мини-корабля // Инженерный вестник Дона, 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3297.

11. Костюков В.А., Кульченко А.Е., Гуренко Б.В. Методика расчета гидродинамических коэффициентов АНПА // Инженерный вестник Дона, 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3226.

12. Qing'an Li, Junsuke Murata, Masayuki Endo, Takao Maeda, Yasunari Kamada. Experimental and numerical investigation of the effect of turbulent

inflow on a Horizontal Axis Wind Turbine (part II: Wake characteristics)/ Energy, Volume 113, 15 October 2016, pp. 1304–1315.

13. Young Gun Heo, b, Nak Joon Choic, Kyoung Ho Choib, Ho Seong Jia, Kyung Chun Kima. CFD study on aerodynamic power output of a 110 kW building augmented wind turbine/ Energy and Buildings, Volume 129, 1 October 2016, pp. 162–173.

14. P. Ying, Y.K. Chen, Y.G. Xu, Y. Tian. Computational and experimental investigations of an omni-flow wind turbine. Applied Energy, Volume 146, 15 May 2015, pp. 74–83.

15. Biswas A, Gupta R. Unsteady aerodynamics of a twist bladed H-Darrieus rotor in low Reynolds number flow. J Renew Sustain Energy 2014;6. doi:10.1063/1.4878995.

16. Sobhani E, Ghaffari M, Maghrebi MJ. Numerical investigation of dimple effects on darrieus vertical axis wind turbine. Energy 2017;133:231–41.

17. Beri H, Yao Y. Numerical simulation of unsteady flow to show self-starting of vertical axis wind turbine using fluent. J Appl Sci 2011;11:962–70.

References

1. Innovative Technologies & Solutions for Sustainable Shipping. Eco Marine Power. URL: ecomarinepower.com/en/about-us (date of access: 26.10.2018).

2. Ocius Technology Limited (Australia). URL: ocius.com.au (date of access: 26.10.2018).

3. Medvedev M.YU., Kostyukov V.A., A.M. Mayevskiy, Pavlenko D.D. Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki. 2018. №01. pp. 194-208.

4. Kostjukov V.A., Medvedev M.Y., Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Bulanovich D.I., Pavlenko D.D. EAI Endorsed Transactions on Energy Web., 2019, pp. 125-130.

5. Kostyukov V.A., Shevchenko V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5299.

6. Gorelov D.N. Energeticheskiye kharakteristiki rotora Dar'ye (obzor) [Energy characteristics of the Darier rotor (review)]. Izdatel'stvo Sibirskogo otdeleniya RAN, 2010, pp. 325-333.
7. Khaskin L.YA. Uchenyye zapiski TSAGI. 1993, v.24, №4, pp. 133-144.
8. Mikhnenkov L.V. Nauchnyy vestnik MGTU, 2008, №125, pp. 14-18.
9. T.T. Omorov, B.K. Mechatronics, Automation, Control, 2016, vol. 17, No. 10, pp. 651-656.
10. Kostyukov V.A., Maevskiy A.N., Gurenko B.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3297.
11. Kostyukov V.A., Kul'chenko A.E., Gurenko B.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3226.
12. Qing'an Li, Junsuke Murata, Masayuki Endo, Takao Maeda, Yasunari Kamada. Energy, v. 113, 15 October 2016, pp. 1304–1315.
13. Young Gun Heoa, b, Nak Joon Choic, Kyoung Ho Choib, Ho Seong Jia, Kyung Chun Kima. Energy and Buildings, v. 129, 1 October 2016, pp. 162–173.
14. P. Ying, Y.K. Chen, Y.G. Xu, Y. Tian. Applied Energy, v. 146, 15 May 2015, pp. 74–83;
15. Biswas A., Gupta R. J Renew Sustain Energy 2014, 6; doi:10.1063/1.4878995.
16. Sobhani E, Ghaffari M, Maghrebi MJ. Numerical investigation of dimple effects on darrieus vertical axis wind turbine. Energy 2017, 133: pp. 231–41.
17. Beri H, Yao Y. Numerical simulation of unsteady flow to show self-starting of vertical axis wind turbine using fluent. J Appl Sci 2011, 11; pp. 962–70.