_ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, _____ ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЛОПАСТИ ВЕТРОВОГО КОЛЕСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИКИ¹

© 2024 г. И. Б. Войнов^{*a*}, В. В. Елистратов^{*a*}, И. А. Керестень^{*a*}, *, М. А. Конищев^{*a*}, М. А. Никитин^{*a*}, Д. И. Софронова^{*a*}

^аСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, 195251 Россия *e-mail: keresten@compmechlab.com Поступила в редакцию 07.03.2023 г. После доработки 28.11.2023 г. Принята к публикации 21.12.2023 г.

Из-за постоянного роста энергопотребления, удаленности от промышленных центров, необходимости завоза органического топлива для хозяйственной деятельности и жизнеобеспечения населения требуется более широкое размещение ветродизельных энергокомплексов с ветроэнергетическими установками (ВЭУ) в труднодоступных территориях Арктики. Ключевым элементом, влияющим на эффективность работы ВЭУ, является ветроколесо, проектирование которого связано с определенными трудностями, обусловленными экстремальными природно-климатическими условиями в Арктике. В представленной работе описывается подход к цифровому проектированию аэродинамической формы лопасти ветроколеса на основе технологии параметрической оптимизации. Целевым показателем принят коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ), расчет которого выполняется путем прямого численного моделирования задачи аэродинамики с помощью современных вычислительных методов, а также высокопроизводительных суперкомпьютерных технологий. Внедрение цифровых принципов проектирования и моделирования позволило осуществить интеграцию геометрических моделей и связанных с ними инженерных инструментов моделирования в компьютерную среду. Главная концепция подхода состоит в описании геометрических характеристик лопасти конечным числом параметров, меняя которые можно получать формы лопасти ветрового колеса в широком диапазоне возможных конфигураций. Для каждой формы создается расчетная CFD-модель, которая на основе численного решения уравнений вязкого течения Навье – Стокса позволяет определять целевые показатели в виде аэродинамических характеристик лопасти при заданной скорости ветра. Рассмотрен пример применения технологии параметрической оптимизации для проектирования ветроколеса, предназначенного для эксплуатации в районах Арктики. Продемонстрирована работоспособность концепции для определения формы лопасти в однорежимном и многорежимном вариантах использования ветроколеса. Показано, что полученные геометрические характеристики позволяют улучшить целевые показатели типовой лопасти, применяемой на практике. Для ВЭУ мошностью 100 кВт с ветроколесом диаметром 24 м получены решения, обеспечивающие значение КИЭВ равное 0.45 в диапазоне расчетных скоростей ветра от 6 до 9 м/с.

Ключевые слова: численное моделирование, лопасть ветроколеса, ветроэнергетическая установка, параметрическая оптимизация, коэффициент использования энергии ветра **DOI:** 10.56304/S0040363624060055

В Арктической зоне европейской части России, Западной и Восточной Сибири сконцентрировано более 40% ветроэнергетических ресурсов [1]. Вследствие постоянного роста энергопотребления в труднодоступных районах требуется внедрение ветроэнергетических электростанций и комплексов [2], включающих в себя ВЭУ с высокими значениями КИЭВ. Перед конструкторами и инженерами стоит задача улучшить аэродинамические характеристики ветроколеса ВЭУ, чтобы повысить его эффективность [3].

Целью настоящей работы является демонстрация подхода к проектированию оптимальной формы лопасти ветроколеса, обеспечивающей выполнение таких заданных целевых показате-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках "Соглашения о предоставлении гранта в форме субсидий из федерального бюджета на осуществление государственной поддержки создания и развития научных центров мирового уровня, выполняющих исследования и разработки по приоритетам научно-технологического развития" от 20.04.2022 № 075-15-2022-311.

лей, как производительность, удобство и простота производства, возможность доставки к месту эксплуатации. В частности, для упрощения логистики и перевозки ВЭУ на неосвоенные территории длина лопасти ветроколеса должна быть ограничена габаритами грузового контейнера, длина которого составляет 12.192 м (40 футов).

Для выполнения поставленных задач необходимо повышать эффективность работы лопастей ветроколеса, а также оптимизировать технологию их изготовления. Прежде всего, следует подобрать оптимальную форму лопасти, которая соответствует заданным рабочим характеристикам и при создании которой учтены производственные и логистические ограничения. Несмотря на то что в разных регионах России условия эксплуатации ВЭУ различаются, общий подход к проектированию и определению основных расчетных характеристик лопасти сохраняется. Критерием оптимизации лопасти ветроколеса для обеспечения требуемой производительности, как правило, является максимальное значение КИЭВ. Кроме того, при решении практических задач могут возникать дополнительные требования, например обеспечение показателей прочности, снижение уровня шума и массы лопасти. В таких случаях необходимо рассматривать постановку задачи с позиций многокритериальной оптимизации.

При проектировании ВЭУ следует учитывать непостоянство скорости ветра. Ветроколесо должно быть многорежимным, т.е. эффективно работать в некотором диапазоне скоростей. Это условие является дополнительным критерием, используемым в процессе оптимизации формы лопасти.

Благодаря значительному прогрессу в развитии методов вычислительной аэродинамики и росту мощности вычислительных систем можно существенно продвинуться в решении задач проектирования лопастей ВЭУ, а во многих случаях и сократить время оптимизации конструкций или их отдельных элементов [4, 5].

В настоящей работе представлен подход к определению формы лопасти ветроколеса, разработанный на основе метода параметрической оптимизации и реализованный с использованием современных средств численного моделирования и высокопроизводительных суперкомпьютерных технологий. Концепция весьма подробно описана в [6], а ее этапы представлены в виде блок-схемы на рис. 1.

Предлагаемый подход включает в себя три основных принципа проектирования лопасти ветроколеса:

параметризация моделей на всех этапах автоматизированного проектирования CAD/CAE; учет особенностей ветрового потока: плотности, степени турбулентности и других параметров окружающей среды;

обеспечение возможности проектирования лопасти для широкого диапазона скоростей ветрового потока (многорежимности).

Многовариантное численное моделирование проведено с использованием высокопроизводительного вычислительного кластера суперкомпьютерного центра (СКЦ) "Политехнический". Этот центр обладает высокопроизводительными вычислительными системами разной архитектуры и занимает второе место среди аналогичных центров университетов и исследовательских организаций России.

На сегодняшний день на практике широко используется довольно большое количество программных комплексов параметрической оптимизации. В настоящей работе в качестве такого инструмента выбран программный продукт IOSO, в котором оптимизация осуществляется по заданному набору входных параметров. Для получения целевых значений, применяемых в этом программном комплексе, инструментами моделирования и измерения являются системы CAD/CAE-проектирования, такие как NX для построения параметризованной формы, ANSYS ICEM CFD для генерации расчетной сетки и ANSYS CFX для настройки, выполнения расчета и обработки результатов.

В мировой практике можно найти много различных подходов и идей, которые авторы используют в своих работах, нацеленных на получение оптимальной формы лопасти ветроколеса, например [7, 8]. Оптимальная геометрическая модель лопасти ветроколеса, которая обеспечивает эффективную работу ВЭУ в широком диапазоне скоростей ветра, предложена в [9]. Авторы работы [10] используют генетический алгоритм оптимизации для максимизации КИЭВ ВЭУ, уделяя отдельное внимание анализу чувствительности настроек генетического алгоритма (размер популяции и скорость мутации) на сходимость метода оптимизации. Повышение энергоэффективности ветроустановки путем варьирования геометрических параметров профилей лопасти рассмотрено в [11], для совершенствования формы лопасти решается связанная задача аэроупругости. Многокритериальная оптимизация лопасти ветроколеса на базе метода роя частиц описана в [12, 13], при этом работа [12] нацелена на одновременное повышение энергоэффективности лопасти и снижение шума. В [14], в отличие от классического несвязанного подхода к последовательной оптимизации формы лопасти ветроколеса ВЭУ, предлагается связанная многокритериальная задача. Решение такой задачи с использованием весовых коэффициентов предложено в [14]. Этот подход



Рис. 1. Блок-схема поиска оптимальной аэродинамической формы лопасти

отличается от классического несвязанного решения задачи последовательной оптимизации.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОРМЫ ЛОПАСТИ

Для реализации подхода к созданию новой конструкции лопасти на основе цифровой параметрической оптимизации требуется выполнение нескольких предварительных этапов: формирование облика лопасти, выбор геометрической топологии исследуемого объекта, разработка математической и численной моделей, описывающих интересующие с позиции проектирования физические процессы и характеристики (прочность, аэродинамика, вибрации и др.) применительно к выбранному объекту.

На начальном этапе разработки лопасти происходит выстраивание ее прототипа на основе принятой топологии. Путем многовариантного исследования и параметрической оптимизации этот прототип должен приобрести итоговую форму, обладающую заданными целевыми характеристиками. Одной из задач, возникающих при параметрической оптимизации, является выбор

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 6 2024

достаточного количества геометрических показателей, однозначно определяющих размеры и форму лопасти при значительной вариативности ее возможных конфигураций.

Согласно рассматриваемой концепции, предполагается, что пространственная форма лопасти представляет собой непрерывную поверхность, последовательно соединенную по сечениям, и определяется такими параметрами, как диаметр ветроколеса, длина пера лопасти, размер втулки, а также двумя пространственными сплайнами, описывающими траекторию входной и выходной кромок лопасти.

По длине лопасти через конкретные интервалы с использованием сплайнов входной и выходной кромок строятся поперечные сечения, которые представляют собой параметризованные крыловые профили дуг и сплайнов, соединенных касательными линиями. От количества таких сечений в модели зависит сложность пространственной формы лопасти. В настоящем исследовании количество сечений принято равным 6. Количество параметров, однозначно определяющих геометрические характеристики каждого сечения, составило 12. Расположение сечений



Рис. 2. Сечения лопасти ВЭУ

лопасти и одно из них с указанием введенных параметров представлены на рис. 2.

Параметры Р1, Р5, Р6, Р7, Р8 отвечают за положение полюсов сплайнов для внутреннего и наружного профилей в плоскости сечения, параметры Р2, Р3, Р4 – за геометрические характеристики входной кромки, а Р9, Р10, Р11 – за форму и размеры выходной кромки. Еще один параметр определяет высоту расположения сечения относительно основания лопасти. Таких сечений 6, итого для описания всех сечений используются 72 параметра. Форма лопасти строится на основе двух сплайнов, проходящих по передней и задней кромкам. Каждый сплайн определен положением пяти полюсов, два из которых находятся на краях лопасти – в основании и на конце. Местонахождение полюсов в основании лопасти задается одним параметром - углом, указывающим на положение полюса на окружности основания. Положение же полюса на конце лопасти определяется уже двумя параметрами — углом и расстоянием от центральной оси лопасти. Точки, в которых располагаются остальные полюсы,

находятся по трем параметрам — углу, расстоянию от центральной оси и высоте расположения сечения, в котором лежит плоскость полюса от основания. Итого, для описания направляющих сплайнов в модели используются 24 параметра. К вышеперечисленным параметрам добавляется еще один — угол поворота всей лопасти. Таким образом, общее количество параметров для описания модели составляет 97.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ПОТОКА

На втором этапе проектирования лопасти создаются математическая и численная модели, описывающие движение ветрового потока при его взаимодействии с лопастью в процессе работы ветроколеса. Модели должны устанавливать такие целевые показатели, как возникающий крутящий момент и сила лобового сопротивления, в зависимости от внешних условий и рабочих характеристик (скорости ветра, температуры, давления и угловой скорости вращения ветроколеса).

Крутящий момент и сила лобового сопротивления зависят от аэродинамического давления, действующего на поверхность лопасти, и касательных напряжений трения, возникающих при взаимодействии с ветровым потоком. Для определения аэродинамических нагрузок на лопасть в настоящей работе применено прямое численное моделирование на основе решения системы уравнений Навье – Стокса, усредненных по Рейнольдсу для вязкого несжимаемого газа. Моделирование проведено методом конечных объемов [15]. Эти уравнения при использовании осреднения по Рейнольдсу требуют дополнительного подключения одной из математических моделей турбулентности. Для вычисления турбулентных параметров применена SST-модель (shear stress transport) турбулентности Ментора [16] с автоматическими пристеночными функциями вблизи границ твердых стенок.

Система уравнений вязкого несжимаемого газа, используемая для решения поставленной задачи, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla \rho + \nu \Delta \vec{u} + \vec{f}; \\ \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0. \end{cases}$$

Здесь \vec{u} – векторное поле скорости; ρ – плотность газа; ν – кинематический коэффициент вязкости; \vec{f} – векторное поле массовых сил.

Для решения этой системы нелинейных дифференциальных уравнений требуются численные методы интегрирования на основе конечной дискретизации расчетной области.

Расчет взаимодействия лопасти с набегающим потоком воздуха проводится в цилиндрической области воздушного пространства, полностью окружающей лопасть. Благодаря циклической периодичности ветроколеса достаточным является рассмотрение только одного сектора, который при использовании трехлопастного ветроколеса составляет 120°. Это позволяет сократить время вычислений.

Для определения необходимого и достаточного размера области, обеспечивающей отсутствие влияния граничных условий невозмущенного потока на аэродинамические показатели, проведен анализ сходимости решения в зависимости от размера используемой области. Исследование проводилось на неструктурированной сеточной модели, построенной на основе тетраэдров с призматическими ячейками в пограничном слое.

Сходимость решения по пространству определялась путем оценки КИЭВ ветроколеса ξ по формуле

$$\xi = \frac{2M\omega}{\pi R^2 \rho v^3},$$

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 6 2024

где M — крутящий момент силы, создаваемый всеми лопастями ветроколеса относительно оси вращения; ω — угловая скорость вращения ветроколеса; R — радиус ветроколеса; ρ — плотность воздуха; v — скорость ветра.

В качестве граничного условия на входе в расчетную область задается скорость ветра v, соответствующая рассматриваемому режиму, а на выходной границе расчетной области, удаленной на достаточное расстояние от лопасти, - нулевое избыточное давление. Решение ищется в предположении установившегося течения. Расчетная область моделируется во вращающейся системе координат, что позволяет избежать необходимости решать нестационарную задачу. Угловая скорость вращения ветроколеса ω зависит от режима работы и задается путем назначения угловой скорости вращения связанной системы координат. Результаты моделирования показали, что для лопасти радиусом 12 м расчетная область должна быть не менее 80 м в длину и диаметром не менее 30 м. Дальнейшее увеличение области не влияет на результат моделирования.

Использование ячеек в форме тетраэдров для построения расчетной сеточной модели существенно облегчает процесс создания сетки. Однако для качественного описания формы лопасти, особенно в области входной и выходной кромок, требуется значительное количество ячеек, что приводит к увеличению времени счета. При многопараметрической оптимизации, когда требуется проведение сотен таких расчетов, процесс определения формы может затянуться на несколько недель или даже месяцев.

Для сокращения времени вычислений предлагается использовать гибридное сеточное разбиение воздушного пространства, представляющее собой комбинацию блочно-структурированной гексагональной сетки вблизи поверхности лопасти и неструктурированной сетки на основе тетраэдров в зоне, удаленной от поверхности лопасти. Такой подход позволяет получить более точное описание поверхности лопасти и более подробные характеристики течения среды вблизи нее, а также сократить время на построение сетки и проведение расчета. Для автоматизации процесса построения расчетной сеточной модели был разработан скрипт для сеточного генератора ICEM CFD. Примеры двух видов сеточных моделей показаны на рис. 3.

Для того чтобы выбрать наиболее рациональную расчетную аэродинамическую модель, сравнивали несколько сеточных моделей, различающихся по размерности и времени счета для каждой из них. В итоге было установлено, что целесообразно использовать гибридную расчетную сетку (рис. 4). В результате оптимизации контрольнообъемной гибридной сетки было определено, что



Рис. 3. Варианты сеточных моделей: тетраэдральная сетка (*a*) и гибридная блочно-структурированная сетка (пристеночная) (*б*)



Рис. 4. Время работы τ одного шага алгоритма оптимизации (*a*) и количество элементов сетки *n* (*б*). Сетка: *I* – тетраэдральная с призматическими элементами; *II* – оптимизированная блочно-структурированная; *I* – решатель (solver); *2* – построение сетки

для решения аэродинамической задачи достаточно всего около 6 млн ячеек.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОРМЫ ЛОПАСТИ ВЭУ

Одним из основополагающих критериев, используемых в ветроэнергетике, является критерий Бетца — Жуковского, согласно которому КИЭВ ветроколеса не может превышать 0.593 [10]. При апробации предлагаемого подхода к оптимизации формы лопасти в качестве исходного варианта рассмотрен прототип, представляющий собой отмасштабированную лопасть ВЭУ разработки НОЦ "Возобновляемые виды энергии и установки на их основе". Этот прототип имеет ветроколесо диаметром 6 м. При расчете лопасти были приняты следующие рабочие характеристики: КИЭВ 0.45 при угле установки $\beta = 20^{\circ}$ и расчетной скорости ветра v = 8 м/с.



Рис. 5. Зависимость КИЭВ ветроколеса с исходной лопастью от угла установки лопасти β

В качестве первой тестовой задачи проведен поиск оптимальной формы лопасти для скорости набегающего потока ветра $v_{\text{ном}} = 8 \text{ м/с. B}$ регионе предполагаемого использования разрабатываемой ВЭУ такая скорость ветра является среднегодовой. В результате предварительного численного моделирования определены зависимость КИЭВ от угла установки лопасти β (рис. 5) и оптимальное значение КИЭВ при выбранной скорости ветра.

Результаты расчета показали, что максимальное значение КИЭВ для рассмотренного прототипа лопасти составило 0.454 при угле установки лопасти $\beta = 20^{\circ}$. Такое значение угла в дальнейшем будет использоваться как начальное приближение для алгоритма оптимизации. При этом стоит отметить, что оптимизация имеет смысл для ВЭУ, способной менять угол установки лопасти в процессе работы и оснащенной соответствующей системой контроля и управления.

Распределение модуля вектора скорости в различных поперечных сечениях для исходной формы лопасти показано на рис. 6. На рисунке видно, что форма корневых сечений не является оптимальной из-за срыва потока на внешней поверхности лопасти.

Чтобы определить эффективность разработанного подхода к проектированию лопасти ВЭУ, были рассмотрены две задачи: однорежимная оптимизация формы, обеспечивающая максимум КИЭВ при фиксированной скорости ветра, и многорежимная оптимизация, дающая максимум КИЭВ в некотором диапазоне значений скорости ветра.

Результаты оптимизационного расчета на примере сходимости крутящего момента сил на ветроколесе M в зависимости от количества итераций N (рассмотренных вариантов) показаны на рис. 7. Вариант с наилучшими показателями выделен светлым ромбом в верхнем правом углу рисунка.

В процессе отработки алгоритма оптимизации была получена форма лопасти ветроколеса, обес-







Рис. 6. Распределение модуля вектора скорости вблизи лопасти в сечениях: на расстоянии 3 м (a), 6 м (b), 9 м (b) от корневой части

печивающая КИЭВ равный 0.517, что выше, чем у исходного ветроколеса на 0.063.

МНОГОРЕЖИМНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛЯ ДИАПАЗОНА СКОРОСТЕЙ

В реальных условиях эксплуатации ВЭУ скорость ветра меняется, поэтому для эффективного получения энергии требуется обеспечить оптимальную работу ветроколеса в некотором диапазоне скоростей. Для достижения этой цели необходимо решить задачу многорежимной оптимизации.

В этом случае оптимальная форма лопасти определяется по совокупности характеристик ее работы при трех значениях скорости ветра: номинальной $v_{\text{ном}} = 8 \text{ м/c}$, нижней и верхней границ



Рис. 7. Зависимость крутящего момента сил на ветроколесе М от числа итераций N



Рис. 8. Множество оптимальных решений по Парето для многокритериального алгоритма оптимизации

диапазона скоростей $v_1 = 6$ и $v_2 = 10$ м/с. Для оценки отклонения КИЭВ на границах от номинального значения вводится дополнительный целевой показатель в виде среднеквадратического отклонения КИЭВ между номинальным и дополнительными режимами:

$$\sigma = \sqrt{(\xi_{\text{HOM}} - \xi_1)^2 + (\xi_{\text{HOM}} - \xi_2)^2},$$

где $\xi_{\text{ном}}, \xi_1, \xi_2 - \text{KИЭВ}$ в номинальном режиме, в первом дополнительном режиме ($v_1 = 6 \text{ м/c}$) и во втором дополнительном режиме ($v_2 = 10 \text{ м/c}$).

Поиск наилучшего решения для многорежимного варианта эксплуатации осуществлялся по двум условиям: максимизации крутящего момента в номинальном режиме и минимизации среднеквадратического отклонения по двум остальным режимам.

В результате многокритериальной оптимизации получено множество решений, оптимальных по Парето (рис. 8). Результаты распределены неоднородно, явно выраженный максимум по двум условиям отсутствует. Тем не менее, среди множества решений можно выделить комбинацию, дающую максимальный КИЭВ в номинальном режиме (0.433) и среднее по общему диапазону отклонение (примерно 25%) (выделено ромбом в верхней части рис. 8). Этот вариант лопасти принят как решение задачи.

Для оценки эффективности разных вариантов лопастей проведено сравнение показателя КИЭВ для трех их форм в диапазоне скоростей ветра от 6 до 10 м/с при отклонении лопастей от оптимального положения. Полученные характеристики приведены на рис. 9.

Как следует из графиков на рис. 9, однокритериальная оптимизация обеспечила значительный прирост КИЭВ для номинального режима, однако для других режимов показатели были существенно ниже. Многокритериальная оптимизация, дающая меньший КИЭВ в номинальном режиме, позволила получить более равномерные показатели в широком диапазоне скоростей. При этом поворот лопасти от оптимального положения приводил к падению КИЭВ. Таким образом, в результате численного моделирования была



Рис. 9. Зависимость КИЭВ ветроколеса с различными лопастями от скорости ветра. *I* – исходная лопасть; *2* – однокритериальная оптимизация; *3* – многокритериальная оптимизация; *4* – многокритериальная оптимизация, отклонение угла установки ±15°

определена не только наилучшая форма лопасти, но и ее оптимальное положение относительно ветрового потока для различных значений скорости ветра.

На рис. 10 приведена зависимость крутки (угла поворота хорды сечения относительно корневого сечения лопасти) различных лопастей от безразмерного параметра *l* – расположения сечения относительно корневого сечения лопасти, приведенного к ее длине. Сравнение крутки, выполненное в процессе исследования, показало, что лопасть, разработанная по алгоритму многокритериальной оптимизации, имеет меньшую крутку. Это объясняется работой лопасти в более широком диапазоне скоростей. Лопасть, полученная по алгоритму однокритериальной оптимизации, обладает наибольшей круткой между сечениями при работе в оптимальном режиме на постоянной скорости. Это приводит к довольно большому значению КИЭВ при выбранной рабочей скорости ветра, но при изменении скорости некоторое количество сечений лопасти уходит в срывной режим, что влечет за собой падение КИЭВ. Исходная же лопасть имеет наименьшую крутку, поскольку является отмасштабированной лопастью меньшей длины.

Рабочая характеристика ВЭУ показывает, какую электрическую мощность выдает ВЭУ во всем диапазоне рабочих скоростей — от скорости страгивания до скорости остановки ветроколеса. Мощность ВЭУ *Р* определяется по формуле

$$P = \frac{1}{2}\xi\rho v^3 F$$

где F — площадь сечения, ометаемого лопастями ветроколеса.

Зависимости выходной мощности ВЭУ от скорости ветра для исходной и оптимизированных лопастей представлены на рис. 11.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 6 2024



Рис. 10. Зависимости крутки ү от относительной длины лопасти.

1 — исходная лопасть; 2 — однокритериальная оптимизация; 3 — многокритериальная оптимизация



Рис. 11. Зависимости выходной мощности ВЭУ от скорости ветра. Обозначения см. рис. 10

Многокритериальная оптимизация лопасти обеспечивает сохранение мощности ВЭУ на низких скоростях ветра (до 8.5 м/с) и имеет значительный прирост мощности (до 20%) при скоростях ветра более 9 м/с, что позволяет при тех же размерах ветроколеса увеличить установленную мощность ВЭУ и, соответственно, выработку электроэнергии в этих диапазонах скоростей.

выводы

1. Методика многокритериальной параметрической оптимизации пространственной формы лопасти ветроколеса позволяет получать эффективное решение для заданных целевых показателей и ограничений.

2. Сравнение нескольких сеточных моделей лопасти по размерности и времени расчета для каждой из них показало, что для выбора расчетной аэродинамической модели наиболее рационально использование гибридной расчетной сетки.

3. Для работы ВЭУ мощностью около 100 кВт в арктических условиях рассчитанный профиль лопасти ветроустановки является оптимальным.

4. Численное моделирование процессов обтекания лопастей ветроколеса потоками воздуха может быть проведено для нескольких вариантов постановки задачи. Однокритериальная однорежимная оптимизация приводит к достижению максимума КИЭВ при расчетной скорости ветра, многокритериальная многорежимная оптимизация обеспечивает максимум КИЭВ в определенных диапазонах скоростей ветра.

5. Многокритериальная оптимизации лопасти обеспечивает сохранение мощности ВЭУ при низких скоростях ветра и дает значительный прирост мощности (до 20%) при скоростях ветра более 9 м/с, что позволяет при тех же размерах ветроколеса увеличить мощность ВЭУ и, соответственно, выработку электроэнергии в этих диапазонах скоростей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Елистратов В.В. Научно-техническое обоснование и проектирование энергокомплексов на основе ВИЭ для сложных природно-климатических условий // Электричество. 2023. № 10. С. 4–21. https://doi.org/10.24160/0013-5380-2023-10-4-21
- ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1999. Введ. в действие с 01.07.1999.
- 3. Рыженков М.А., Ермоленко Б.В., Ермоленко Г.В. Экологические аспекты ветроэнергетики // Теплоэнергетика. 2011. № 11. С. 72-78.
- Майорский Е.В., Мамаев Б.И. Аэродинамическая разработка и исследование трансзвуковых рабочих решеток турбин // Теплоэнергетика. 2015. № 5. С. 21–26. https://doi.org/10.1134/S0040363615050082

- Аминов Р.З., Кожевников А.И. Оптимизация режимов работы газотурбинной электростанции с учетом влияния износа оборудования // Теплоэнергетика. 2017. № 10. С. 17–24. https://doi.org/10.1134/S0040363617100010
- 6. Боровков А.И., Войнов И.Б., Ибраев Д.Ф. Определение оптимальной аэродинамической формы лопасти самолетного винта на основе параметрической оптимизации // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 2. С. 3–9.
- 7. Lavrishcheva L.S., Novoselov V.N. Design and shape optimization of a wind turbine blade. [Электрон. pecypc.] https://www.datadvance.net/blog/use-cases/design-and-optimization-of-wind-turbine-blade.html
- Pourrajabian A., Dehghan M., Rahgozar S. Genetic algorithms for the design and optimization of horizontal axis wind turbine (HAWT) blades: A continuous approach or a binary one // Sustainable Energy Technol. Assess. 2021. V. 44. P. 101022. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101022
- 9. Разработка оптимального профиля лопасти для ветрогенератора, предназначенного для применения в области переменных ветров / И.С. Давыдов, Е.П. Шершуков, В.А. Самсонов, В.А. Ревякин, В.Ю. Мусатов // Математические методы в технике и технологиях. 2019. Т. 12. № 1. С. 228–231.
- Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика: монография. 3-е изд., доп. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 56–64.
- Lee H.M., Kwon O.J. Performance improvement of horizontal axis wind tur-bines by aerodynamic shape optimization including aeroelastic deformation // Renewable Energy. 2020. V. 147. P. 2128–2140. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.125
- 12. **Improving** wind turbine blade based on multi-objective particle swarm optimization / Y. Li, K. Wei, W. Yang, Q. Wang// Renewable Energy. 2020. V. 161. P. 525–542. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.067
- Kaviani H., Nejat A. Aeroacoustic and aerodynamic optimization of a MW class HAWT using MOPSO algorithm // Energy. 2017. V. 140. P. 1198–1215. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.011
- 14. Coupled aerostructural shape and topology optimization of horizontal-axis wind turbine rotor blades / Z. Wang, S.J. Suiker Akke, H. Hofmeyer, T. van Hooff, B. Blocken // Energy Convers. Manage. 2020. V. 212. P. 112621.

https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112621

- Barth T.J. Aspects of unstructured grids and finite-volume solvers for the Euler and Navier-Stokes equations // VKI Lecture Series of von Karman Institute for Fluid Dynamics. 1994. V. 1994-05.
- Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. V. 32. No. 8. P. 1598–1605. https://doi.org/10.2514/3.12149

Profiling a Wind Wheel Blade Using Parametric Optimization and Computational Aerodynamics Methods

I. B. Voinov^a, V. V. Elistratov^a, I. A. Keresten^{a,*}, M. A. Konishtev^a, M. A. Nikitin^a, and D. I. Sofronova^a

^a Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251 Russia *e-mail: keresten@compmechlab.com

Abstract—Due to the constant increase in energy consumption, remoteness from industrial centers, the need to import organic fuel for economic activities and livelihoods of the population, a wider deployment of wind power plants (WPPs) in hard-to-reach areas of the Arctic is required. The key element influencing the efficiency of a WPP is the wind wheel, the design of which is associated with certain difficulties due to the extreme climatic conditions in the Arctic. The presented work describes an approach to digital design of the aerodynamic shape of a wind turbine blade based on parametric optimization technology. The target indicator is the wind energy efficiency (WEE), which is calculated by direct numerical modeling of the aerodynamics problem using modern computational methods, as well as high-performance supercomputer technologies. The introduction of digital design and modeling principles has enabled the integration of geometric models and associated engineering modeling tools into the computer environment. The main concept of the approach is to describe the geometric characteristics of the blade with a finite number of parameters, changing which one can obtain the shape of the wind wheel blade in a wide range of possible configurations. For each shape, a computational CFD model is created, which, based on the numerical solution of the Navier-Stokes viscous flow equations, makes it possible to determine target indicators in the form of aerodynamic characteristics of the blade at a given wind speed. An example of the use of parametric optimization technology for the design of a wind wheel intended for operation in the Arctic regions is considered. The functionality of the concept for determining the shape of the blade in single-mode and multimode options for using a wind wheel has been demonstrated. It is shown that the obtained geometric characteristics make it possible to improve the target performance of a typical blade used in practice. For a WPP with a power of 100 kW with a wind wheel with a diameter of 24 m, solutions were obtained that provide a WEE value of 0.45 in the range of design wind speeds from 6 to 9 m/s.

Keywords: numerical modeling, wind wheel blade, wind power plant, parametric optimization, wind energy utilization factor