

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.85>

ОПТИМИЗАЦИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ВЕТРЯНОЙ ТУРБИНЫ МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Научная статья

Усманова Р.Р.^{1,*}

¹ Академия гражданской защиты МЧС России, Химки, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (regina_ugatu[at]inbox.ru)

Аннотация

Статья посвящена научным исследованиям, направленным на развитие современных подходов к изучению общих свойств и принципов работы вертикально-осевых ветроэлектростанций, которые отвечают современным потребностям в обеспечении электроэнергией спасательных формирований в зоне чрезвычайных ситуаций. Научной новизной исследования является системный методический подход к разработке ветряной турбины, устанавливающий функциональные связи между конструктивными параметрами лопаток турбины и ее энергетическими характеристиками. В качестве методологической основы был использован метод параметрического моделирования для выявления взаимосвязей исследуемого объекта с взаимодействующими факторами, такими как координаты аэродинамического профиля и зоны отрыва потока, угол атаки и коэффициент лобового сопротивления. Конечные аэродинамические профили показали значительные улучшения по сравнению с исходными базовыми формами.

Ключевые слова: энергетические параметры, лопатки турбины, профиль, аккумуляция энергии, оптимизация.

OPTIMIZATION OF WIND TURBINE AERODYNAMIC PROFILE BY PARAMETRIC MODELLING METHOD

Research article

Usmanova R.R.^{1,*}

¹ Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

* Corresponding author (regina_ugatu[at]inbox.ru)

Abstract

The article is dedicated to scientific research aimed at the development of modern approaches to the study of general properties and principles of operation of vertical-axis wind turbines that meet modern demands in providing electricity to rescue formations in the zone of emergency situations. The scientific novelty of the work is a systematic methodological approach to the development of a wind turbine that establishes functional relationships between the design parameters of turbine blades and its energy characteristics. As a methodological basis, a parametric modelling technique was used to identify the relationships of the studied object with interacting factors, such as the coordinates of the aerodynamic profile and flow breakaway zone, angle of attack and drag coefficient. The final airfoils showed significant improvements compared to the original base shapes.

Keywords: energy parameters, turbine blades, profile, energy storage, optimization.

Введение

В результате растущего интереса к экологически чистым и возобновляемым источникам энергии, в последние годы энергия ветра стала одним из наиболее развитых и используемых источников энергии. Для получения максимальной производительности энергии ветра используются ветряные турбины. К настоящему времени проведено и проводится множество исследований по этим турбинам [1, С. 723]. Оптимизация формы профиля является главным этапом проектирования аэродинамических компонентов, таких как лопасти ветряных турбин [2, С. 156-274]. Процесс оптимизации профиля обычно включает в себя три основных компонента: параметризацию формы, оценку профиля и оптимизацию. Среди них метод параметризации определяет как пространство проектирования, так и сложность задачи оптимизации. Чтобы обеспечить эффективность, метод параметризации должен охватывать широкое пространство проектирования, используя незначительное количество проектных параметров. Это особенно важно на начальном этапе проектирования, когда накладываются минимальные геометрические ограничения, и имеется возможность внесения существенных изменений профиля в процессе оптимизации.

Методы и принципы исследования

По мере расширения геометрической области применения каждого параметра появляются классические подходы, основанные на изгибах контурных линий или контрольных точек. Например, популярный метод параметрического сечения (PARSEC) [3, С. 102] использует множество параметров для представления основных характеристик профиля, включая радиусы передней кромки и расположение верхнего и нижнего крыла, и строит поверхность профиля с использованием полинома шестого порядка. Другим популярным методом является параметризация Безье [4, С. 750], которая строит верхнюю и нижнюю поверхности аэродинамического профиля с помощью кривых Безье, определенных заранее выбранными контрольными точками. Одной из основных проблем, связанных с вышеупомянутыми методами, является их неспособность или неэффективность включать функции высокой точности; эти методы имеют фиксированное число параметров и ограниченный диапазон точности, в то время как

параметризация Безье требует кривых Безье более высокой степени для описания сложных форм, которые неэффективны для вычисления [5, С. 11].

Для рассмотрения более мелких деталей аэродинамических профилей или, что эквивалентно, для представления более сложных кривых можно использовать либо B-сплайны [6, С. 97], которые создают кривые путем соединения низших порядков сегментов Безье, определенные контрольными точками. По мере увеличения числа контрольных точек, эти методы перемещаются на локальный конец спектра и становятся способными отображать объекты с высокой точностью, но вычислительная сложность процесса также увеличивается.

Одним из способов уменьшить количество проектных параметров является группировка контрольных точек таким образом, чтобы в качестве параметров можно было использовать глобальные преобразования, такие как скручивание и утолщение. Этот метод известен как деформация свободной формы (FFD) [7, С. 223]. Аналогичный метод, называемый подходом к элементам домена с использованием радиальной базисной функции (RBF) [8, С. 407], также существует и использует RBF для придания деформации профилю.

Ближе к глобальному концу спектра можно отметить методы, использующие спектральное построение базисных функций для формирования или деформации профилей. Одним из популярных вариантов базисных функций являются доминирующие режимы из разложения по сингулярным значениям (SVD) набора данных профиля. Другие варианты включают синусоидальные функции подхода Хикса-Хенне [9, С. 1090], которые создают «неровности» на эталонной поверхности профиля, и поверхностные функции метода преобразования функций класса/формы, которые представлены в виде произведения функции класса и функции формы, полученной линейной комбинацией многочленов Бернштейна. Тем не менее эти методы также имеют зависимость от размерности, заключающуюся в том, что всегда требуется больше базовых функций или режимов, чтобы они выдавали функции высокой точности.

В работе [10, С. 637] была применена генеративная сеть (GAN) для изучения основных вариаций формы базы данных профиля и использования их для параметризации форм, сохраняя при этом высокоточные характеристики за счет дополнительного шумового пространства. Однако, как и во многих других методах, при уменьшении размеров оптимальный профиль лопасти находится вблизи базы данных, что не всегда верно.

Основные результаты

В данной работе был использован метод параметрического моделирования DBD designer для решения задачи по оптимизации аэродинамического профиля ветротурбины. Метод DBD – это новая и универсальная это система визуального проектирования баз данных, которая преобразует существующие формы и способна интерполировать пространство объекта, обеспечивая как высокоточное представление форм без учета размерности, так и радикальные модификации форм без каких-либо неявных геометрических ограничений. Оптимизация начинается с выбора форм базовой линии, а затем выполняется оценка и оптимизация аэродинамических профилей, сформированных путем изменения этих базовых форм с помощью DBD. DBD designer не основан на конкретном инструменте оценки аэродинамического профиля или конкретном оптимизаторе. Для повышения эффективности и согласованности был использован XFOIL для получения данных о производительности. Обработка и повторная загрузка измененных координат профиля производилась индивидуально в конце каждого алгоритма DBD, преобразующего координаты вихревых зон с относительно более высокой концентрацией в местах со значительной кривизной лопасти. В качестве результатов этих расчетов представлен профиль, показанный на рисунке 1.

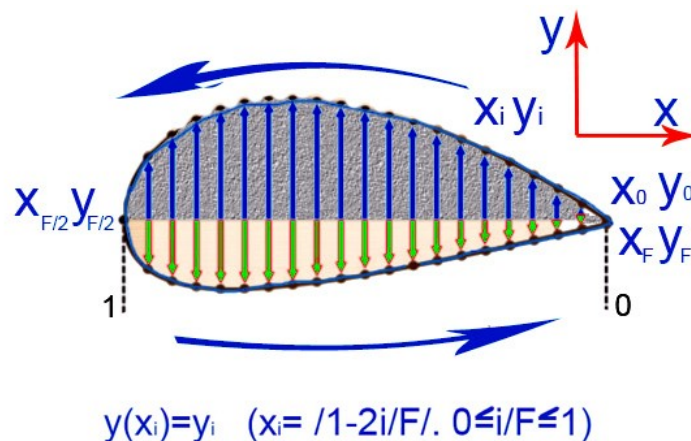


Рисунок 1 - Форма аэродинамического профиля и координаты базовых фигур
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.85.1>

Используя переднюю кромку каждого аэродинамического профиля в качестве начала координат, можно сопоставить каждую фигуру, взяв фиксированные и равномерно расположенные точки вдоль оси x, создавая взаимно однозначное соответствие между формами. Этот принцип сопоставления также продемонстрирован на рисунке 1, где черная и белая поверхности выделены, чтобы подчеркнуть, что они представляют первую и вторую половины точек локации соответственно.

Применив метод DBD для восстановления базы данных, мы обнаружили, что основная часть профилей всей базы данных были восстановлены с ошибкой MAE <1%. Даже для двух профилей с наибольшей погрешностью оптимизация DBD все равно привела к ошибке MAE менее 1,5%. На рисунке 2 показан процент профилей, которые были оптимизированы с допуском 0,5% ошибки MAE, по отношению к общему числу профилей.

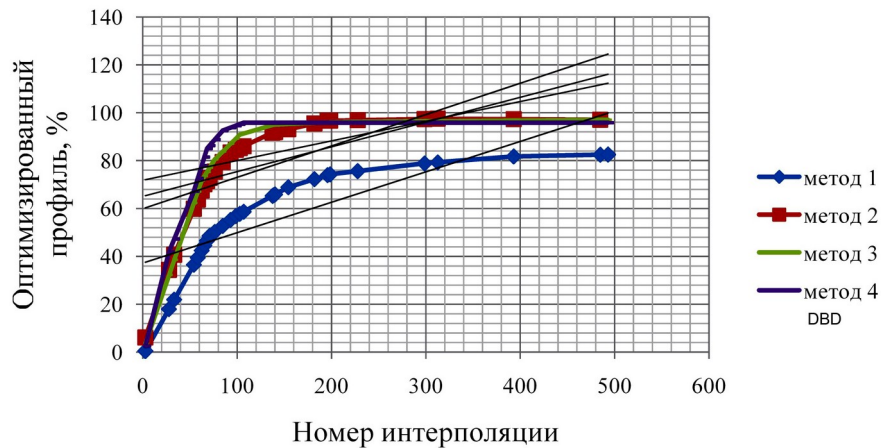


Рисунок 2 - Зависимость профилей, восстановленных с допуском MAE
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.85.2>

Заключение

В данной работе был использован метод параметрического моделирования DBD designer для решения задачи по оптимизации аэродинамического профиля ветротурбины. Применение DBD моделирования для оптимизации формы аэродинамического профиля в 2D, показало его точную реконструкцию в существующей базе данных аэродинамических профилей и позволило провести радикальные изменения формы аэродинамического профиля без использования геометрических ограничений путем интерполяции пространства проектирования. Установлено, что функция экстраполяции DBD значительно способствует повышению производительности метода, при этом метод DBD сходится быстрее, чем любые другие традиционные подходы.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Fuge M. D. Parameterization and Optimization of the Airfoil Design Using Generative Bezier Networks / M. D. Fuge // AIAA Magazine. — 2020. — 58(11). — p. 723-735.
2. Chiardiello A. R. A Multi-purpose Approach to Optimizing the Shape and Enclosing Structures in the Energy Design of Buildings / A. R. Chiardiello — Newark: Applied Energy, 2020. — 280 p.
3. Luliano E. Investigation with Dimension Reduction to Optimize the Aerodynamic Shape / E. Luliano // Computers and Liquids. — 2018. — 45. — p. 89-109.
4. Correia V. E. Optimization of Cermet Plates with Functional Gradation Using a Simulated Annealing Algorithm / V. E. Correia // Applied Sciences. — 2021. — 11. — p. 729-750.
5. Drela D.V. A System for the Analysis and Design of Aerodynamic Profiles with a Low Reynolds Number / D.V. Drela // Lecture Notes on Engineering. — 2009. — 54. — p. 1-12.
6. Elham A. Multi-purpose Optimization of the Wing Shape / A. Elham // Aerospace Science and Technology. — 2014. — 37. — p. 93-109.
7. Gunantara N. N. Overview of Multi-purpose Optimization: Methods and Their Applications / N. N. Gunantara // Cogent Engineering. — 2018. — 5. — p. 220-224.
8. Hicks R. M. Wing Design by Numerical Optimization Method / R. M. Hicks // Aviation Magazine. — 2021. — 7. — p. 407-412.
9. Jones B. R. Aerodynamic and Aeroacoustic Optimization of Rotorcraft Profiles Algorithm / B. R. Jones // Journal of Aircraft. — 2020. — 10. — p. 1088-1096.
10. Vicini A. H. Designing the Airfoil and Wing Using Hybrid Optimization Strategies / A. H. Vicini // AIAA Journal. — 2022. — 5. — p. 634-641.