УДК 539.3

Компьютерное моделирование лопастей ветроустановок с оптимальными параметрами

К. Г. Дегтярев, Е. А. Стрельникова, Г. А. Шелудько
Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины

Разработан метод весовой оптимизации лопастей ветроустановок. Построена математическая модель, основанная на применении метода гиперсингулярных интегральных уравнений, для определения динамического давления на лопасть. Разработан новый вариант метода решения задач нелинейного программирования, основанный на применении адаптивного управления процессом оптимизации. В результате компьютерного моделирования получена лопасть ветроустановки оптимального веса.

Ключевые слова: *лопасть ветроустановки, метод гиперсингулярных интегральных уравнений, нелинейное программирование, весовая оптимизация.*

Розроблено метод вагової оптимізації лопатей повітряних установок. Побудовано математичну модель, що заснована на застосуванні методу інтегральних рівнянь, для визначення динамічного тиску на лопать. Розроблено новий варіант методу розв’язання задач нелінійного програмування, заснований на використанні адаптивного керування процесом оптимізації. Як результат комп’ютерного моделювання отримано лопать повітряної установки з оптимальною вагою.

Ключові слова: *лопать повітряної установки, метод гіперингулярних інтегральних рівнянь, нелінійне програмування, вагова оптимізація.*

The method of weight optimization for blades of wind power station is developed. The mathematical model based on boundary integral equation method is elaborated to define the dynamical pressure on the blades. The new variant of nonlinear programming method is developed. The method is based on using the adaptive control of optimization process. As a result of computer design the blade of optimal weight was obtained.

Key words: *the blade of wind power station, the method of hypersingular integral equation, non-linear programming, weight optimization.*

1. Введение

Современные ветроэнергетические установки представляют собой технические комплексы, состоящие из большого числа взаимодействующих узлов и агрегатов различного назначения. Среди них основное место занимает лопастная система ветроколеса. Оптимальное проектирование конструкций такого типа использует поисковые процедуры определения оптимального набора параметров, удовлетворяющих заданным ограничениям и обеспечивающих наилучшее значение принятого критерия оптимальности. Такие процедуры хорошо известны, однако они имеют разную эффективность в зависимости от изменяющихся условий процесса поиска оптимума, и не всегда удается, применяя какую-либо из них в отдельности, добиться успеха в приемлемое время [1,2]. В связи с этим в работе используется оригинальный гибридный метод оптимизации, благодаря которому эффективно решаются многопараметрические задачи указанного выше типа с учетом системы предельных и функциональных ограничений [3,4].

2. Постановка задачи и метод решения

Лопасть моделируется тонкостенным естественно закрученным стержнем переменного поперечного сечения длиной L, закрепленным на колесе ВЭУ. Отнесем его к глобальной декартовой системе координат: Z_G – ось поворотов сечений; X_G совпадает с осью ветроколеса. Направление Y_G таково, что глобальная система координат является правой. Геометрия лопасти представлена набором сечений, в каждом из которых заданы следующие параметры профиля: координаты точек (x, y) внешнего контура; толщина сечения $h(z)$; толщина лонжерона $h_1(z)$; ширина лонжерона $l(z)$ (рис. 1). Предполагается, что лопасть находится под действием аэродинамических нагрузок и центробежных сил. Вычисляемая аэродинамическая нагрузка приводится к распределенным поперечным нагрузкам q_x, q_y и распределенному крутящему моменту m_z.

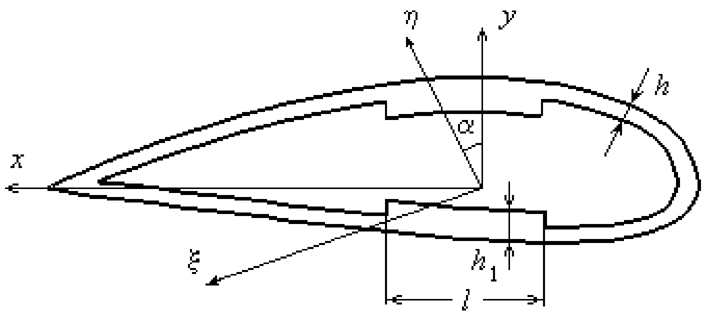

Рис. 1. Геометрия сечения лопасти

Воздушная среда предполагается идеальной, несжимаемой и незавихренной. Как показано в [5], задачу обтекания лопасти можно свести к решению гиперсингулярного интегрального уравнения. Решение этого уравнения позволяет определить перепад давлений, действующих на лопасть. Задача аэроупругости решается в несвязанной постановке: деформации и перемещения считаются практически не влияющими на аэродинамические силы, действующие на лопасть.

Для оптимального проектирования конструкций указанного типа необходимо использовать процедуры минимизации (максимизации) некоторой функции цели путем надлежащего выбора параметров при заданных ограничениях (сами ограничения являются функциями исходных параметров). Опишем одну из возможных формулировок задачи оптимизации лопасти ветроколеса.

Требуется найти лопасть минимального веса при следующих условиях. Под действием стационарной аэродинамической нагрузки и центробежных сил нормальное перемещение w не должно превышать заданной величины $[w]$, напряжения – величины $[\sigma]$; на первую частоту собственных колебаний ω также должно быть наложено ограничение

$$\left|\max w^i\right| \le [w]; \quad \left|\max \sigma^i\right| \le [\sigma], \; i = \overline{1, N}, \quad [\omega_1] \le \omega \le [\omega_2], \tag{1}$$

где $[\sigma]$ обозначает предел прочности; σ^i – изгибающие напряжения в N

сечениях; $[\omega_1]$, $[\omega_2]$ – предельные значения допустимого диапазона изменения частоты.

Функция цели – масса лопасти $m = \rho V$, где ρ – плотность материала, V – объем лопасти, определяемый по формуле

$$V = \sum_{i=1}^{N-1} \int_{z_i}^{z_{i+1}} S(z)dz\,, \qquad (2)$$

где $S(z)$ – площадь поперечного сечения; $(N–1)$ – число сечений. Варьируемыми параметрами здесь являются толщины лопасти и параметры лонжерона в различных сечениях $h^i(z)$, $h_1{}^i(z)$, $l^i(z)$, $i=\overline{1,N}$ (рис. 1). Таким образом, рассматриваемая экстремальная задача (1), (2) фактически является задачей нелинейного программирования [1], когда требуется найти вектор

$$X^* = \arg \operatorname*{extr}_{X \in G} F(X) \qquad (3)$$

в допустимой области

$$G = \left\{ X : G_i\left(X\right) \geq 0,\; i=\overline{1,m} \right\} \neq \varnothing \qquad (4)$$

конечномерного параметрического пространства E_n, доставляющий экстремум заданной функции цели $F(X)$, определенной в некотором расширении $H \supset G$.

Для вычисления аэродинамических нагрузок использовался метод, предложенный в [5], Определение НДС лопасти под действием аэродинамических и центробежных нагрузок выполнено по методике, описанной в [6].

Рассматривается лопасть, длина которой с учетом удлинителя L = 19.13 м. Упругие постоянные принимались следующими: модуль упругости удлинителя $E_0=2\cdot10^5$ МПа; модуль упругости лопасти E менялся в корневом сечении на крае от $4.92\cdot10^4$ до $2.5\cdot10^4$ МПа; коэффициент Пуассона ν = 0.18. Плотность материала $\rho=1.6\cdot10^3$ кг/м^3.

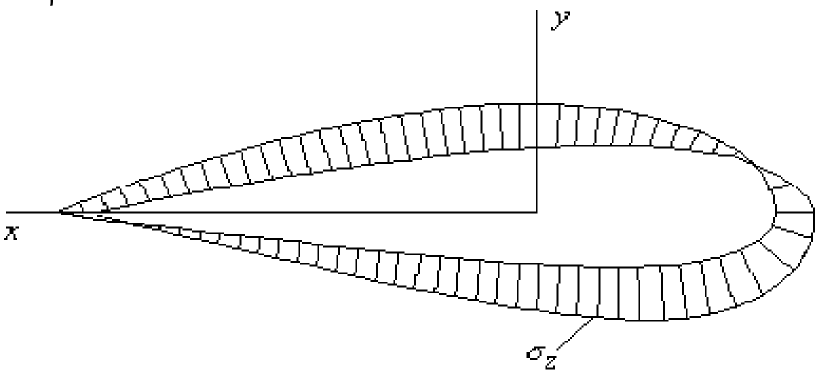

Рис. 2. Распределение напряжений ±z по сечению лопасти

Скорость вращения ветроколеса Ω =55 об/мин, скорость ветра равнялась 10 м/с. Количество сечений лопасти принималось равным 65. Толщина в сечениях лопасти изменялась в корневом сечении на крае от 5 до 2 мм, толщина в сечении удлинителя равна 8 мм. В процессе решения задачи определены поля перемещений и напряжений в лопасти под действием аэродинамических и центробежных нагрузок. Характер распределения напряжений по сечению лопасти и вдоль оси лопасти показан на рис. 2.

Аэродинамические нагрузки определялись путем решения системы гиперсингулярных интегральных уравнений методом дискретных особенностей так, как это описано в [5]. Задача сведена к решению следующих гиперсингулярных уравнений

$$\frac{1}{4\pi}\iint\limits_{S}\Gamma_i(\P)\frac{\partial^2}{\partial\mathbf{n}_x\partial\mathbf{n}_\xi}\frac{1}{|\mathbf{x}-\P|}dS=\frac{\partial\varphi_i}{\partial\mathbf{n}},$$

где φ_i (i=1,2,…,6) представляют собой исчезающие на бесконечности гармонические функции, удовлетворяющие граничным условиям на S:

$$\frac{\partial\varphi_1}{\partial\mathbf{n}}=0;\quad \frac{\partial\varphi_2}{\partial\mathbf{n}}=1;\quad \frac{\partial\varphi_3}{\partial\mathbf{n}}=0;\qquad \frac{\partial\varphi_4}{\partial\mathbf{n}}=-z;\quad \frac{\partial\varphi_5}{\partial\mathbf{n}}=0;\quad \frac{\partial\varphi_6}{\partial\mathbf{n}}=x\,.$$

3. Гибридный метод оптимизации с адаптивным управлением

При оптимальном проектировании сложных многопараметрических объектов рассматриваемого типа удобно воспользоваться автоматическим гибридным поисковым методом оптимизации [3], предназначенным для отыскания локального оптимального вектора X^* задачи на условный экстремум, моделирующей, в частности, задачу (1)-(4). Проведенный анализ оптимизационных процедур и особенностей решения задач оптимального проектирования показывает, что простое накопление эффективных методов в библиотеке математического обеспечения и даже введение диалогового режима решения не может обеспечить необходимых условий для оптимизации. Связано это с тем, что реализуемая задача заранее не снабжена соответствующим набором признаков, по которым управляющая метапрограмма сумела бы идентифицировать задачу и назначить необходимый метод.

Суть предлагаемого метода заключается в следующем. Имеется ряд методов-гибридиентов, которые составляют гибридную коалицию $\{M_i\}$. Задается критерий $Q(\pm)$, выясняющий в процессе решения, какой из гибридиентов в данной ситуации ± наиболее эффективно может использоваться для достижения поставленной цели.

Вводится функция управления $u = u(Q(\pm))$, устанавливающая адаптивную стратегию ввода в действие конкретного гибридиента $M_k \in \{M_i\}$, i = 1,..., k,..., s (или группы гибридиентов). Совместные действия гибридиентов обеспечивают более эффективное достижение цели, нежели каждый из гибридиентов коалиции в отдельности. Это достигается путем введения специального адаптивного управления, которое осуществляет получение векторов минимизирующей последовательности $\{X_k^r\}$, направлений поиска $\mathrm{Dir}\,X_k^r$ и поисковых адаптирующихся шагов h_k^r, в соответствии с изменяющейся ситуацией ±.

В общем случае адаптивное управление u можно представить в виде

$$\begin{Bmatrix} X_k^r \\ \mathrm{Dir}\, X_k^r \\ h_k^r \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^{s} u_i\left(Q\left(\sigma_k\right)\right)\begin{Bmatrix} X_k^{M_i} \\ \mathrm{Dir} X_k^{M_i} \\ h_{ki} \end{Bmatrix}, \qquad \sum_{i=1}^{s} u_i\left(Q\left(\sigma_k\right)\right) = 1,$$

где $u_i(Q(\sigma_k))$ – управляющие неотрицательные функции, заданные на множестве ситуаций $\{\sigma_k\}$; $X_k^{M_i}$, $\mathrm{Dir}\, X_k^{M_i}$ и h_{ki} – точка, направление, исходящее из этой точки, и адаптирующийся шаг поиска, генерированные методом M_i, соответственно; k – номер итерации.

В качестве гибридиентов M_i для данного варианта гибридного метода оптимизации выбраны следующие модификации методов: адаптивный пошаговый спуск, схема Абрамова, овражная модификация, метод Хука-Дживса, Метод Дэвидона-Флетчера-Пауэлла, метод параллельных касательных, секущее движение вдоль границы области G. На каждом из выбранных направлений поиска осуществлялась одномерная минимизация функции цели. В [3,4] показано, что гибридный метод может решать широкий класс задач значительно более эффективно, чем каждый из упомянутых гибридиентов.

4. Анализ численных результатов.

Для построения оптимального проекта рассматривалась лопасть ВЭУ со следующими параметрами: L= 4 м, модуль упругости E=5·10^3 МПа, коэффициент Пуассона ν=0.3, плотность материала ρ=1.6·10^3 кг/м^3, скорость вращения ветроколеса Ω=20 об/мин, скорость ветра 10м/с, [σ]=200 МПа, диапазон частот [ω_1]=0.1 Гц, [ω_2]=10 Гц. Ширина лопасти менялась от 1 м до 0.6 м.

В процессе решения задачи определены поля перемещений и напряжений в лопасти под действием аэродинамических нагрузок.

Количество сечений принималось равным 28. Максимальные перемещения u в плоскости вращения ветроколеса, нормальные к оси OZ, составили 28.5см; максимальные изгибающие напряжения в корневом сечении лопасти – 12.8 МПа; первая частота собственных колебаний ω = 2.28 Гц.

Табл. 1. Начальные и оптимальные параметры лопасти

Номер сечения	Координата Z, м	Начальная толщина, мм	Оптимальная толщина, мм
1	0.800	6.0	5.04
2	1.236	5.6	4.73
3	1.818	5.0	4.21
4	2.400	4.4	3.67
5	2.836	4.0	3.25
6	3.564	3.2	2.41
7	4.000	3.0	2.19

В табл. 1 приведены результаты решения задачи оптимизации: для ряда сечений лопасти Z_i, представлены начальные значения толщины в сечениях h_0 и оптимальные параметры h^*. В начальном варианте масса лопасти равнялась 19.38 кг. В результате оптимизации получена лопасть массой 16.64 кг. Единственным активным ограничением оказалось перемещение лопасти. Собственная частота колебаний в процессе счета изменилась незначительно; это изменение не привело к нарушению заданных ограничений.

Таким образом, методы расчета аэродинамических нагрузок и анализа напряженно-деформировнного состояния лопасти ветроустановки показали высокую эффективность и быстродействие, что позволило поставить и решить задачу оптимизации, которая требует многократного проведения поверочных расчетов.

С помощью гибридного адаптивного метода собственной разработки решена задача весовой оптимизации лопастей ветряной турбины.

6. Выводы

Разработан эффективный метод весовой оптимизации лопастей ветряных установок. Построена математическая модель для определения давления воздуха на лопасть ветроустановки на основе метода гиперсингулярных интегральных уравнений и его численной реализации – метода дискретных особенностей. Разработан вариант метода решения задач нелинейного программирования, основанный на применении сочетания различных методов оптимизации, которые включаются в процесс путем введения адаптивного управления. Проведен расчета лопасти ветроэнергетической установки, позволивший снизить ее вес при выполнении конструктивных и прочностных ограничений.

7. Благодарности

Авторы выражают благодарность профессорам Юрию Владимировичу Ганделю и Борису Яковлевичу Кантору за их постоянную поддержку и интерес к нашей работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
2. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование. – М.: Мир, 1983. – 478 с.
3. Шелудько Г.А., Стрельникова Е.А., Кантор Б.Я. Гибридные методы в задачах оптимального проектирования. Поисковые методы. – Харьков: Новое слово, 2008. – 188 с.
4. Шелудько Г.А., Стрельникова Е.А., Кантор Б.Я. Гибридные методы в задачах оптимального проектирования. Оптимальное проектирование. – Харьков: Новое слово, 2009. – 148 с.
5. Еселева Е.В., Науменко В.В., Стрельникова Е.А. Гиперсингулярное уравнение в задаче определения аэродинамических нагрузок на лопасти ветроустановок // Пробл. машиностроения. – 2000. – № 1. – С. 20-22.
6. Воробьев Ю.С. Колебания лопаточного аппарата турбомашин. – Киев: Наук. думка, 1988. – 214 с.

Надійшла – 15.03.2012.