Вісник Харківського національного університету
Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»
УДК 517.533 + 629.7
№ 590, 2003, с. 202-206

Моделирование ветроэнергетической установки методом дискретных вихрей

Л. Н. Понарин, А. В. Сетуха
13 ГНИИ МО РФ, Россия
ВВИА им. Н.Е. Жуковского, Россия

The article is dedicated to problems of mathematical modelling of a wind power plant aerodynamic. Some aspects of computer simulation are considered, and a particular Windows application for calculation of wind power plant working characteristics is described.

1. Введение

В последние годы во многих странах ведутся активные работы по поиску и вовлечению в топливно-энергетческий баланс новых источников энергии и нетрадиционных технологий её получения. Особый интерес проявляется к нетрадиционным возобновляемым источникам энергии, в том числе – энергии ветра.

Потенциальные возможности применения экологически более приемлемых возобновляемых источников энергии практически не ограничены. Между тем существует целый комплекс проблем – организационных, технических, связанных с защитой окружающей среды, – затрудняющих широкое использование энергии ветра. Наиболее сложной задачей, имеющей первостепенное значение, остается разработка экономичных ветроэнергетических установок (ВЭУ), способных надежно работать в автоматическом режиме в течение многих лет и обеспечивать бесперебойную эксплуатацию при периодическом обслуживании.

В результате значительной исследовательской и конструкторской работы создано большое число ВЭУ различных конструкций и различной единичной мощности. Одной из наиболее перспективных и широко распространённых является горизонтально-осевая конструктивная схема ВЭУ. Современные горизонтально-осевые ветродвигатели, имеющие ротор с небольшим числом лопастей хорошо обтекаемой формы, работают на больших оборотах, имеют современную систему регулирования и могут развивать при расчётной скорости ветра мощность вплоть до нескольких мегаватт.

Известно, что при скорости ветра U_0 и плотности воздуха ρ ветроколесо, ометающее площадь A, развивает мощность $P_0 = c_P A \rho U_0^3 / 2$, где c_P – коэффициент мощности ветроколеса – параметр, характеризующий эффективность использования ветроколесом энергии ветрового потока. У лучших промышленных образцов ВЭУ коэффициент c_P не превосходит 0,40÷0,45 на расчётном режиме при теоретически возможном максимальном значении 0,59, то есть их кпд в лучшем случае достигает 68÷76%. Таким образом, остаётся широкое поле для деятельности в области совершенствования как аэродинамики ротора, так и закона управления, используемого ВЭУ.

Использование классической теории ветродвигателей позволяет решить ряд задач оптимального проектирования. Тем не менее, классическая теория идеального и реального ветродвигателя может считаться только первым приближением в изучении сложной физической картины течения газа в окрестности рабочих элементов ветроагрегатов.

Более эффективным путём решения проблемы моделирования ВЭУ является применение численных методов, с помощью которых может быть решена система исходных дифференциальных уравнений, описывающих движение жидкости. С их помощью возможен более точный расчёт течений как в окрестности основного рабочего органа, так и около всего ветроагрегата. Учёт в модели нестационарности и структуры вихревого следа позволяет добиться более близкого соответствия теоретических и экспериментальных данных.

При разработке нового ветродвигателя необходимость оценки эффективности его работы встаёт уже на этапе проектирования. Проведение натурного эксперимента с уменьшенной моделью в аэродинамической трубе даёт наиболее достоверные результаты, однако, затратно во временном и стоимостном отношении. С этой точки зрения математическая модель ВЭУ, дающая приемлемый по точности результат, может быть полезна как инструмент, позволяющий разработчику ветродвигателя проводить численный эксперимент.

В статье описывается модель ВЭУ, использующая метод дискретных вихрей, предложенный С.М. Белоцерковским [1] в 50-х годах XX века для расчета аэродинамических характеристик крыльев летательных аппаратов. Метод получил распространение на широкий класс задач аэродинамики летальных аппаратов, включая нестационарные задачи, при решении которых необходимо моделирование развития вихревого следа. Применительно к нестационарной нелинейной теории винта метод получил развитие в работе С.М. Белоцерковского совместно с В.А. Васиным и Б.Е. Локтевым [2]. В работах И.К. Лифанова было получено математическое обоснование этого метода [3,4].

Сущность рассматриваемого метода вихрей связана с заменой поверхностей обтекаемых тел и вихревого следа, образующегося за ними, вихревыми слоями с последующей аппроксимацией этих вихревых слоев системой дискретных вихревых особенностей. В трехмерной постановке для моделирования поверхностей тел используются замкнутые вихревые рамки, а вихревой след заменяется системой вихревых отрезков. Применение метода дискретных вихрей к задаче о характеристиках ветроколеса оправдано тем, что ближний след, играющий главную роль в образовании нагрузок на лопастях, является регулярным и хорошо аппроксимируется тонкой поверхностью. Разрушение этого следа, в развитии которого существенна вязкость, происходит на достаточно большом удалении от лопастей и, поэтому, ошибки в моделировании разрушения дальнего следа не оказывают существенного влияния на точность расчёта поля скоростей вблизи винта и, как следствие, на точность вычисления аэродинамических нагрузок, действующих на лопасти.

2. Постановка задачи

Моделируя ветроустановку, полагаем, что её поверхности образуют заданную кусочно-гладкую суммарную поверхность $\sigma_1 = \sigma_1(t)$, движущуюся по заданному закону. Считаем, что течение воздуха является потенциальным всюду вне вихревых следов, возникающих при отрыве потока с заданных линий отрыва, а вихревые следы представляют собой тонкие вихревые пелены, т.е. поверхности, на которых имеется разрыв касательной составляющей поля скоростей. Линии отрыва потока фиксированы и задаются на задних и концевых кромках лопастей.

Задача о нестационарном отрывном обтекании тела идеальной несжимаемой жидкостью в рассматриваемой постановке есть задача отыскания потенциального поля скоростей $\vec{U}(M,t) = grad\,\varphi(M,t)$ и поля давлений $p(M,t)$, определенного всюду вне поверхностей обтекаемых тел и подвижных поверхностей, моделирующих вихревые следы, закон движения которых заранее неизвестен. Здесь $M \equiv (x_1, x_2, x_3)$ – точки пространства, а t – время. Полагаем также, что в каждый момент времени t вихревые следы образуют кусочно-гладкую суммарную поверхность $\sigma_2(t)$, каждая компонента которой соответствует одной вихревой пелене и совокупность всех линий отрыва образует заданную суммарную кусочно-гладкую кривую $L = L(t)$. При этом поверхности тел и вихревых следов стыкуются по линиям отрыва.

Задача отрывного обтекания тела идеальной несжимаемой жидкостью сводится к построению замкнутой системы уравнений и соотношений для плотностей потенциалов двойного слоя $g_1(M,t)$ и $g_2(M,t)$, размещённых на поверхностях $\sigma_1(t)$ и $\sigma_2(t)$, и закона движения вихревого следа. При этом, если функции $g_1(M,t)$ и $g_2(M,t)$ являются решением указанных уравнений, то потенциал $\varphi(M,t)$, соответствующее ему поле скоростей $\vec{U}(M,t)$ и давлений $p(M,t)$ удовлетворяют рассматриваемой задаче.

В задаче рассматривается случай, когда отрывное обтекание тела и развитие вихревого следа начинаются в момент времени $t = 0$. При этом при каждом $t > 0$ рассматривается вихревой след, образованный частицами жидкости, сошедшими в поток в момент времени τ, где $\tau \in [0,t]$. Такая постановка возникает, например, в задаче об обтекании ветроколеса при внезапном ветровом порыве. В случае постоянной скорости набегающего потока $\vec{U}_\infty$, поле скоростей вблизи тела стабилизируется при достаточно больших значениях времени t. Поэтому, нестационарная постановка задачи может быть использована для нахождения стационарной картины течения вблизи тела методом установления.

Задача решается в предположении, что ветродвигатель помещен в безграничный воздушный поток. Если при определении характеристик реальной ветроустановки возникает необходимость учета поверхности земли, то она моделируется плоскостью π. При этом на поверхности земли ставится условие непротекания: $U_n(M,t)=0, \quad M\in\pi$, где U_n – нормальная составляющая скорости $\vec{U}(M,t)$. При этом использованием метода отражений [5] задача может быть сведена к случаю обтекания тела в безграничной среде.

2. Реализация решения задачи

Для программной реализации решения создано компьютерное приложение (рис. 1), в котором задача о нестационарном отрывном обтекании ВЭУ решается методом вихревых рамок [3,4,5], предполагающем дискретизацию уравнений для неизвестных плотностей потенциала двойного слоя $g_1(M,t)$, $g_2(s,t)$ и закона движения вихревого следа.

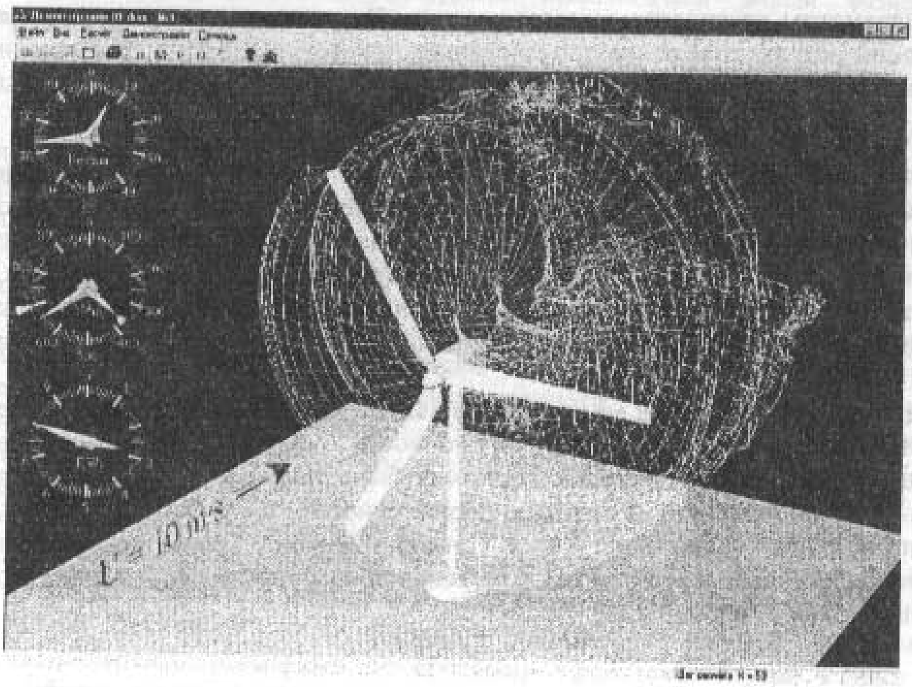

Рис. 1

Параллельно с решением аэродинамической задачи, которое осуществляется при заданном законе движения винта, при моделировании приходится решать задачу определения текущей угловой скорости вращения вала ω_B, которая находится из уравнения момента:

$$I_B\frac{d\omega_B}{dt}=M_{аэр}-M_{сопр}(\omega_B),$$

где I_B – момент инерции винта, $M_{аэр}$ – аэродинамический момент, определяемый при решении аэродинамической задачи, $M_{сопр}$ – момент сопротивления на валу, определяемый выбранным законом управления. При этом ставится начальное условие $\omega_B\big|_{t=t_0}=\omega_0$.

В модели момент сопротивления на валу задаётся двумя способами:

– как некоторая квадратичная функция угловой скорости вращения $M_{сопр} = a\omega_В^2 + b\omega_В + c$ (в частных случаях коэффициенты a, b, c могут быть равны нулю);

– из условия поддержания заданной угловой скорости вращения $\omega_З$, в этом случае $M_{сопр} = \begin{cases} 0, & \omega_В < \omega_З \\ M_{аэр}, & \omega_В = \omega_З \end{cases}$.

Приложение позволяет задавать закон управления моментом сопротивления, менять количество лопастей, угол их установки и геометрическую крутку, задавать параметры диссипации вихревого следа. В процессе расчёта и во время демонстрации результатов ранее произведённого расчёта на экране графически отображаются ветроустановка и вихревой след, а также индикаторы частоты вращения, моментов $M_{аэр}$, $M_{сопр}$ и мощности на валу.

В существующей реализации лопасти винта моделируются тонкими поверхностями, таким образом, толщина профиля не учитывается. Это приемлемое с точки зрения точности и удобное для расчёта допущение потребовало разработки специального подхода для учёта подсасывающей силы, возникающей на передних кромках лопастей на расчётных режимах работы винта, и дающей существенный вклад в создание аэродинамического момента на валу.

Допущения, используемые в модели, обеспечивая довольно быстрый счёт, не оказывают существенного влияния на точность определения параметров ветроустановки. Так на бессрывных режимах было получено очень хорошее совпадение рассчитанных моментных характеристик с характеристиками, определёнными в ряде натурных экспериментов, выполненных в аэродинамической лаборатории Государственного Научно-исследовательского Геофизического Института.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский С.М. Тонкая несущая поверхность в дозвуковом потоке газа. М.: Наука, 1965. – 244 с.
2. Белоцерковский С.М., Васин В.А., Локтев Б.Е. К построению нестационарной нелинейной теории несущего винта.: Изв. АН СССР. МЖГ.
3. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях М.: Наука, 1985. – 256 с.
4. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент. М.: ТОО «Янус», 1985, – 520 с.
5. В.А. Гутников, В.Ю. Кирякин, И.К. Лифанов, А.В. Сетуха. – Математическое моделирование аэродинамики городской застройки. М.: ПАСЬВА, 2002. – 244 с.