



Основы аэродинамики ветротурбин

Лектор: Байжұма Жандос Ескендірұлы

Тел.: +7 707 556 60 08 | Email: zhandos.baizhuma@kaznu.edu.kz



Теорема Жуковского: подъёмная сила крыла

Фундаментальный принцип

Теорема Жуковского описывает подъёмную силу, возникающую на крыле в движущемся потоке. Подъёмная сила создаётся за счёт циркуляции потока вокруг крыла и разницы скоростей воздуха над и под его поверхностью.

В ветроэнергетике эта теория лежит в основе расчёта лопастей турбин, обеспечивая эффективное преобразование энергии ветра в механическую работу.

Формула подъёмной силы

$$L = \rho V \Gamma$$

где ρ — плотность воздуха, V — скорость потока, Γ — циркуляция. Сила действует перпендикулярно направлению потока и обеспечивает вращение лопастей турбины.



Теория идеальной пропеллерной ветровой турбины

Идеальная пропеллерная турбина преобразует кинетическую энергию ветра в механическую энергию вращения с максимальной эффективностью. Используется принцип уменьшения скорости ветра за ротором и увеличение давления для создания тяги.

Уравнение мощности

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p$$

P — мощность, A — площадь ротора, V — скорость ветра, C_p — коэффициент мощности

Предел Беца

Максимальный теоретический КПД составляет около **59,3%**. Реальная турбина не может превзойти этот предел из-за физических ограничений и потерь.

Оптимизация лопастей

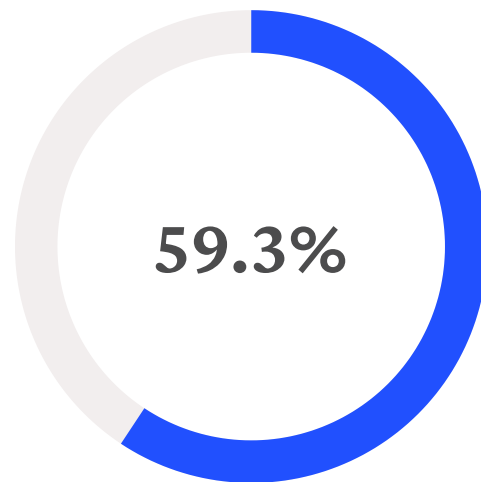
При проектировании учитывается оптимизация профиля и угла атаки для достижения максимального подъёма и минимального сопротивления.

Аэродинамика парусной ветровой турбины

Парусная ветровая турбина использует подъёмную силу при обтекании паруса ветром для создания крутящего момента. Лопасты имеют форму, позволяющую максимально использовать аэродинамические силы даже при низких скоростях ветра.

Коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ)

Параметр, характеризующий долю кинетической энергии ветра, которую установка способна преобразовать в полезную механическую энергию. Максимальное теоретическое значение — предел Беца (0,593 или 59,3%).



Предел Беца

Максимальный теоретический КПД

Практические значения коэффициента обычно ниже из-за аэродинамических потерь, трения и других факторов. Для повышения эффективности применяют оптимизацию формы лопастей, регулировку угла атаки и контроль скорости вращения.



Классификация и положение ротора

Наветренное положение

Рекомендуется: Ротор вращается перед башней в невозмущенном потоке. Обеспечивает стабильную работу без проблем с тенью башни

Горизонтальная ось вращения

Основной тип современных ветроустановок с горизонтальной осью вращения ротора

Подветренное положение

Ротор за башней – устойчивое положение, но лопасть проходит через тень башни, что вредно для долговечности конструкции

Все установки с горизонтальной осью имеют устройство установки по направлению ветра и демпфирование слежения, чтобы ротор поворачивался только при длительных изменениях направления ветра

Геометрия ротора и материалы изготовления

01

Аэродинамический профиль

Использование авиационного профиля с высоким аэродинамическим качеством (отношение подъемной силы к силе лобового сопротивления)

02

Сужение лопасти

Отношение ширины у основания к ширине на конце составляет от 2 до 6

03

Крутка лопасти

Изменение угла установки профиля по длине (10-20 градусов)

04

Переменная толщина

Относительная толщина профиля увеличивается к основанию (от 0,2 до 0,1)

Алюминий

Прочный
металлический
материал

Дерево (фанера)

Традиционный
материал

Стеклопластик

Наиболее эффективен:
высокая прочность,
любая геометрия,
доступная технология

☐ **Рекомендация:** Использовать ламинаризированные профили (FX 63-127, NASA 642-415) для быстроходных ветрогенераторов. При ограниченных возможностях — профили NASA 4415 или Clark Y.



Системы ориентации и регулирования

Флюгер

Для ВЭУ до 50 кВт. Простота и надежность, но не ограничивает угловую скорость разворота головки.

Виндрозный механизм

1-2 ветровых колеса через червячный редуктор. Для ВЭУ 10-250 кВт. Малая скорость разворота.

Электромеханическая система

Электропривод по команде от датчика направления. Для ВЭУ более 50 кВт.

Системы регулирования частоты вращения



Центробежно-пружинное

Изменение угла лопастей под воздействием центробежных сил. Регулирование 5-10%. Для 5-50 кВт.



Увод в косой поток

Изменение угла косо́го потока. Точность 20-30%. Для ВЭУ до 10 кВт. **Наиболее простой и надёжный метод.**



Активное регулирование

Электрический или гидравлический привод по команде АСУ. Для ВЭУ более 50 кВт.

Контрольные вопросы и литература

Контрольные вопросы

1. Что такое геометрия ротора и какие материалы для его изготовления Вы знаете?
2. В чем заключается принцип работы системы ориентации на направление ветра?
3. Как работает система центробежно-пружинного регулирования?
4. Как осуществляется регулирование увода ротора в косой поток?
5. Как работает система активного регулирования ветроустановок?

Список литературы

1. Зубащенко Е.М. Региональная физическая география. Климаты Земли: учебно-методическое пособие. Часть 1. / Е.М. Зубащенко, В.И. Шмыков, А.Я. Немыкин, Н.В. Полякова. – Воронеж: ВГПУ, 2007. – 183 с.