

ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИКИ ВЕТРОТУРБИН

Лектор: Байжұма Жандос Ескендірұлы

Тел.: +7 707 556 60 08

Email: zhandos.baizhuma@kaznu.edu.kz

Лекция 10

Тема. Теорема Жуковского (подъёмная сила крыла). Теория идеальной пропеллерной ветровой турбины. Аэродинамика парусной ветровой турбины. Коэффициент использования энергии ветра ветроэнергетическими установками. Классификация виду ротора. Геометрия ротора и материалы для его изготовления. Система ориентации на направление ветра

Цель:

Изучить аэродинамические основы работы ветроэнергетических установок (ВЭУ), понять применение теоремы Жуковского, принципы идеальной пропеллерной и парусной ветровой турбины, а также конструктивные особенности роторов.

Основные вопросы:

1. Теорема Жуковского и её значение для подъёмной силы крыла
2. Теория идеальной пропеллерной ветровой турбины
3. Аэродинамика парусной ветровой турбины
4. Коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ)
5. Классификация роторов ВЭУ
6. Геометрия ротора и материалы
7. Системы ориентации ветроустановки на направление ветра

Краткие тезисы:

- **Теорема Жуковского:**
 - Определяет подъёмную силу, действующую на крыло, за счёт разницы скоростей обтекания воздуха над и под крылом.
 - Подъёмная сила пропорциональна плотности воздуха, скорости потока и циркуляции вокруг крыла.
- **Идеальная пропеллерная ветровая турбина:**
 - Рассматривается как идеальная машина, извлекающая максимальную энергию из ветра.
 - Энергия ветра зависит от площади сечения, скорости ветра и плотности воздуха.

Теорема Жуковского является фундаментальным принципом аэродинамики, описывающим подъёмную силу, возникающую на крыле (или лопасти) в движущейся жидкости или газе. Согласно этой теореме, подъёмная сила создаётся за счёт циркуляции потока вокруг крыла и разницы скоростей воздуха над и под его поверхностью. В контексте ветроэнергетики эта теория лежит в основе расчёта лопастей ветровых турбин, обеспечивая эффективное преобразование энергии ветра в механическую работу.

Подъёмная сила L по теореме Жуковского выражается формулой:

$$L = \rho V \Gamma$$

где ρ — плотность воздуха, V — скорость потока, а Γ — циркуляция, определяемая скоростным распределением вокруг крыла. Эта сила действует перпендикулярно направлению потока и обеспечивает вращение лопастей турбины.

Теория идеальной пропеллерной ветровой турбины базируется на концепции использования подъёмной силы для создания крутящего момента, который приводит ротор в движение. Идеальная пропеллерная турбина рассматривается как аппарат, преобразующий кинетическую энергию ветра в механическую энергию вращения без потерь и с максимальной эффективностью. В ней используется принцип уменьшения скорости ветра за ротором и увеличения давления для создания тяги.

Основой расчётов является уравнение мощности, которое связывает скорость ветра, площадь ротора и коэффициент использования энергии ветра (КПД турбины):

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

где P — мощность, A — площадь сечения ротора, V — скорость ветра, C_p — коэффициент мощности, показывающий долю энергии ветра, которую турбина способна преобразовать.

Максимальный теоретический КПД, согласно пределу Беца, составляет около 59,3%. Это означает, что реальная турбина не может превзойти этот предел из-за физических ограничений и потерь. При проектировании лопастей учитывается оптимизация их профиля и угла атаки, чтобы достичь максимального подъёма и минимального сопротивления.

Использование теоремы Жуковского позволяет создавать лопасти с аэродинамическими характеристиками, подобными крыльям самолёта, что значительно увеличивает эффективность ветровых турбин по сравнению с простыми плоскими

лопастями. Такие турбины способны работать при более низких скоростях ветра и обеспечивают большую мощность при стабильной работе.

В практике проектирования учитывается также влияние угла поворота лопастей (регулируемый шаг), что позволяет адаптировать турбину к изменяющимся условиям ветра и предотвращать перегрузки. Это важный элемент управления мощностью и защиты оборудования.

Таким образом, теория подъёмной силы по Жуковскому и идеальная модель пропеллерной ветровой турбины являются ключевыми элементами в развитии современных ветроэнергетических установок. Они обеспечивают высокую эффективность преобразования энергии ветра, способствуя росту доли возобновляемых источников в энергетическом балансе.

Аэродинамика парусной ветровой турбины. Коэффициент использования энергии ветра ветроэнергетическими установками.

Аэродинамика парусной ветровой турбины основывается на принципах взаимодействия воздушного потока с парусом или лопастью, напоминающей парусное полотно. Такая конструкция использует подъёмную силу, возникающую при обтекании паруса ветром, для создания крутящего момента и преобразования энергии ветра в механическую работу.

Парусная ветровая турбина отличается от традиционных турбин тем, что её лопасти имеют форму, позволяющую максимально использовать аэродинамические силы, обеспечивая эффективное вращение ротора даже при низких скоростях ветра. Основным элементом является профиль, способный генерировать подъёмную силу, подобно крылу самолёта.

Коэффициент использования энергии ветра — это параметр, характеризующий долю кинетической энергии ветра, которую ветроэнергетическая установка способна преобразовать в полезную механическую энергию. Он определяется как отношение вырабатываемой мощности к полной мощности ветра, проходящего через площадь, занятую ротором.

Максимальное теоретическое значение этого коэффициента — предел Беца, равный около 0,593, что означает, что не более 59,3% энергии ветра может быть использовано. Практические значения коэффициента использования для парусных турбин обычно ниже из-за аэродинамических потерь, трения и других факторов.

Для повышения эффективности парусных ветровых турбин применяют оптимизацию формы лопастей, регулировку угла атаки и контроль скорости вращения. Также важна минимизация сопротивления воздуха, влияющего на вращение и потери энергии.

Исследования показывают, что парусные ветровые турбины обладают рядом преимуществ: они менее чувствительны к изменению направления ветра, обладают простотой конструкции и способны работать в широком диапазоне скоростей. Это делает их перспективными для использования в районах с переменными ветровыми условиями.

Таким образом, аэродинамика парусной ветровой турбины и коэффициент использования энергии ветра являются ключевыми факторами, определяющими эффективность работы ветроэнергетических установок. Современные разработки в этой области способствуют улучшению конструкций и увеличению доли возобновляемой энергии в энергетическом балансе.

Рассмотрим данный тип ветроустановок:

По виду ротора:

С горизонтальной осью вращения

Положение ротора:

Подветренное положение ротора, или положение за башней обеспечивает устойчивое, стабильное состояние. Если ротор находится перед башней, в наветренном положении, то такая позиция неустойчива - ротор в наветренном положении вращается в невозмущенном потоке. Если бы пропеллер мог свободно вращаться вокруг вертикальной оси, то он бы пропутешествовал на подветренную сторону при малейшем возмущении, он хотел бы плыть вместе с потоком. У всех установок с горизонтальной осью имеется устройство установки по направлению ветра независимо, с какой стороны мачты вращается ротор, также должно быть предусмотрено демпфирование слежения за ветром, чтобы ротор поворачивался только при длительных изменениях направления ветра. На свободу выбора конструктора будет оказывать влияние запланированная форма мачты, а именно с какой стороны мачты расположен ротор. Самая дешевая мачта или башня - это решетчатая мачта (шуховская башня). Однако она при подветренной позиции ротора полностью "гасит" поток ветра. Лопасть, проходящая через тень башни, освобождается от всех сил ветра и тем самым подвергается ненормальной разгрузке. Это крайне вредно с точки зрения долговечности конструкции. Мачта, сделанная из трубы, едва ли имеет проблемы с тенью, еще меньше проблем будет в современных свободнонесущих трубчатых конструкциях. Эти мачты хотя и дороги, но они "приятны глазу", и соблюдают эстетические условия.

Рекомендация: Для установок с горизонтальной осью ротору следует вращаться перед башней в невозмущенном потоке.

Геометрия ротора и материалы для его изготовления

Для улучшения аэродинамики и повышения прочности лопасти ротора желательно придерживаться следующих требований:

- использовать профиль (обычно авиационный) с высоким аэродинамическим качеством (отношение подъемной силы профиля к силе лобового сопротивления);
- присутствие сужения лопасти (отношение ширины лопасти у основания к ширине лопасти на конце), которое может составлять от 2 до 6;
- присутствие крутки лопасти – изменение угла установки ее профиля (угол между плоскостью вращения и хордой профиля) по длине в соответствии с определенным законом (количественно крутка выражается разностью между углом установки профиля лопасти у основания и на конце и может составлять 10-20 град);
- для увеличения прочности лопасть может иметь переменную по длине относительную толщину профиля (отношение толщины профиля к его хорде), при этом данная толщина увеличивается к основанию (к примеру, от 0,2 до 0,1).

Для упрощения технологии изготовления лопастей их геометрия может быть изменена. В частности, возможно отсутствие крутки и сужения. Упрощение формы снижает мощность ВЭУ на 5-10%.

В настоящее время лопасти изготавливаются из следующих материалов:

- алюминий;
- дерево (фанера);
- стеклопластик (углепластик).

Стеклопластиковые лопасти более эффективны благодаря следующим преимуществам:

- материал обладает высокой удельной и усталостной прочностью;
- технология материала позволяет получать лопасти с любой геометрией;
- производство стеклопластиковых лопастей не требует высокотехнологического оборудования и может быть освоено без значительных капитальных вложений.

Рекомендация: Рекомендуется использовать ламинаризованные профили, отличающиеся изгибом внутрь профиля на нижней поверхности. Для быстроходных ветрогенераторов необходимо применять высококачественные профили, особенно ламинарные профили (например, FX 63-127 или NACA 642-415). При ограниченных возможностях технологии изготовления лопастей подходят профили с прямой нижней поверхностью (например NACA 4415 или Clark Y).

Система ориентации на направление ветра

Существуют следующие системы ориентации на направление ветра:

- **Флюгер.** Используется для ВЭУ мощностью до 50кВт. Отличается простотой и надежностью, но не может ограничить угловую скорость разворота головки.
- **Виндрозный механизм.** Состоит из 1 или 2-х ветровых колес, которые через червячный редуктор ориентируют головку. По сравнению с флюгером, требует обслуживания, но обеспечивает малую скорость разворота. Ограничено используется на ВЭУ мощностью от 10 до 250кВт.
- **Электромеханическая система ориентации.** Ориентацию осуществляет электропривод по команде от датчика направления ветра. Используется на ВЭУ мощностью более 50кВт. Необходимость ограничения угловой скорости разворота головки связано с тем, что с ростом скорости разворота растут нагрузки на лопасти и главный вал. При использовании флюгера приходится усиливать конструкцию лопастей и главного вала.

Системы регулирования частоты вращения ротора и буревые защиты

Существуют следующие системы регулирования и ограничения мощности:

- **Центробежно-пружинное регулирование.** Регулирование осуществляется за счет изменения угла установки лопастей под воздействием центробежных сил. Обеспечивает регулирование частоты вращения ротора в пределах 5-10%. Используется для автономных ВЭУ мощностью от 5 до 50кВт. Для обеспечения буревой защиты лопасти могут выводиться автоматически во флюгерное положение (угол установки близок к 90 град) при скорости ветра более 25-30м/с.
- **Увод ротора в косой поток.** Регулирование осуществляется за счет изменения угла косого потока (угла между нормалью к плоскости ротора и направлением ветра). Точность поддержания частоты вращения мала – 20-30%. Используется для автономных ВЭУ мощностью до 10кВт, предназначенных для заряда АКБ. При работе ВЭУ на выпрямитель не требуется стабильная частота электрического тока, а, следовательно, и стабилизация частоты вращения ротора. Данная система регулирования обеспечивает автоматически буревую защиту, так как при скорости ветра 25-30м/с угол косого потока ротора близок к 90 град, при этом мощность и частота вращения даже меньше, чем в номинальном режиме. Основное преимущество данной системы - простота и надежность, так как используются неповоротные лопасти.

- Активное регулирование.

Регулирование осуществляется за счет изменения угла установки лопастей электрическим или гидравлическим приводом по команде от автоматической системы управления. Используется для ВЭУ мощностью более 50кВт. Для обеспечения буревой защиты лопасти выводятся автоматически во флюгер (угол установки близок к 90 град) при скорости ветра более 25-30м/с.

Рекомендации: Наиболее часто используются способ увода ротора в косой поток, так как это наиболее простой и надёжный метод, не требующий сильного усложнения конструкции.

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?

Литература

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