

3 Модульный принцип конструирования ветроагрегатов, теория подобия и характеристики геометрически подобных ветродвигателей

3.1 Модульный принцип конструирования ветроагрегатов

Одна из основных проблем при использовании энергии ветра — относительно малая плотность потока энергии. Потребность в больших активных поверхностях для улавливания энергии ветра приводит к чрезмерной материалоемкости агрегатов.

Целесообразность модульного построения ветроагрегатов вытекает из теории подобия [4]. Теория подобия позволяет рассмотреть характер зависимостей между основными энергетическими, экономическими и прочностными характеристиками ветротурбин и их линейными размерами. При геометрически подобном уменьшении размеров ветротурбин они имеют практически одинаковый коэффициент использования энергии ветра и обладают одинаковой ураганостойчивостью. Их удельная материалоемкость, отнесенная к единице ометаемой воздушным потоком площади, снижается пропорционально диаметру (закон "куба-квадрата"). Поэтому замена крупных одиночных ветротурбин суммой ветромодулей позволяет многократно снизить вес и стоимость единицы ометаемой площади и установленной мощности.

Модульный принцип конструирования ветроагрегатов предполагает, что требуемую величину мощности ветропарка можно получить суммированием мощностей отдельных ветротурбин небольшого диаметра — микроветроагрегатов.

В сочетании с суммированием мощности отдельных микроветроагрегатов, помимо снижения удельной материалоемкости, они имеют ряд преимуществ перед единичными ветроустановками большой мощности:

- Упрощается транспортировка и монтаж ветроагрегатов, появляется возможность их размещения на дешевых скалистых территориях непригодных для сельскохозяйственных работ, где могут быть использованы высокоскоростные воздушные потоки и их естественные концентраторы, образуемые рельефом (типа трубки Вентури);
- Изготовление ветродвигателей - модулей с размером ветротур-

бин до пяти метров технологично, возможно применение стандартных узлов и материалов;

- Повышенная частота вращения ветротурбин малого диаметра во многих случаях облегчает их агрегатирование с устройствами - потребителями энергии;
- Дешевизна изготовления опытных образцов микроветромоделей упрощает итерационный процесс разработки и корректировки их конструкций;
- Относительно малый запас кинетической энергии в ветротурбинах - модулях решает одну из проблем техники безопасности.

3.2 Аэродинамика и прочность геометрически подобных ветротурбин

Потери мощности ветротурбины ΔW , связанные с профильным аэродинамическим сопротивлением F_x , определяются выражением

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{F_x'}{F_x''}$$

где W - мощность ветротурбины при отсутствии потерь на профильное сопротивление; F_x' и F_x'' - тормозящая и тянущая силы, т.е. проекции силы сопротивления F_x и подъемной силы F_y на плоскость вращения ветротурбины. Отношение подъемной силы к силе сопротивления есть аэродинамическое качество лопасти $k = F_y / F_x$. Для многолопастной ветротурбины с оптимальной быстроходностью $Z_{\text{опт}} \cong 1$ приемлемым будет аэродинамическое качество $k = 5-10$. Таким качеством обладают плоские и изогнутые пластины и паруса, даже не имеющие обтекаемого профиля.

Пониженные требования к аэродинамическому качеству лопастей существенно упрощают и удешевляют технологию изготовления многолопастных ветротурбин. Экспериментальные данные, полученные известным ученым в области аэродинамики профессором Г.Х. Сабининым [5] для быстроходных ветротурбин малого диаметра D при различных скоростях ветра, позволяют дать количественную оценку зависимости $\xi(D)$: при скорости ветра $\cong 5$ м/с заметное влияние D на ξ_m наблюдается только для самых малых диаметров $D < D_\xi \cong 1$ м. В

диапазоне диаметров ветротурбин $D \cong 1 \div 5$ м происходит прирост ξ на $\cong 10\%$, и далее кривая $\xi_m(D)$ практически выходит на насыщение. Для многолопастных тихоходных ветротурбин, вследствие пониженной зависимости ξ от аэродинамического качества, влияние D на ξ еще менее заметно. Поэтому кривую $\xi(Z)$ можно, практически, считать инвариантной по отношению к вариациям v и D .

Влияние скорости ветра v на величину ξ_m у ветротурбины с оптимальной быстроходностью $Z_{\text{опт}} \cong 0,35$ было также экспериментально исследовано Г.Х.Сабининым. При увеличении скорости ветра v в три раза (с 4,5 м/с до 14 м/с) величина ξ_m возрастала на 20%, в то время как плотность потока энергии ветра вырастала примерно в 30 раз. При этом у многолопастных ветротурбин с $Z \cong 1$ влияние скорости ветра v на величину ξ_m еще ниже, что позволяет считать зависимость $\xi(z)$ инвариантной к изменениям скорости ветра v . В то же время между коэффициентом использования энергии ветра ξ (мощностью в относительных единицах), быстроходностью Z (угловой скоростью в относительных единицах) и относительным крутящим моментом k существует зависимость $\xi = kZ$. Исследуя степень сохранения величины ξ_m при переходе к ветротурбинам диаметром $\cong 1-5$ м, Г.Х.Сабинин установил, что существенного падения величины ξ_m не происходит.

Из законов сохранения энергии и импульса следует, что величина ξ у ветротурбины любой конструкции не может превышать $\xi_{\text{пред}} \cong 0,59$.

Анализ внутренних напряжений σ_{ij} в ветротурбинах с позиций теории подобия в неявном виде рассматривает нагрузки, связанные с действием как аэродинамических, так и центробежных сил.

Если в однородный воздушный поток поместить две геометрически подобные ветротурбины, вращающиеся с одинаковой быстроходностью Z , то тензоры напряжений σ_{ij} в геометрически подобных точках будут одинаковы.

Компоненты тензора напряжения σ_{ij} - в точке r, θ, h в цилиндрической системе координат, вращающейся вместе с ветротурбиной, будут зависеть от определяющих параметров $r, \theta, h, p, v, w, R, E, \mu$, где p, v, w, R — плотность воздуха, скорость ветра, угловая скорость и радиус ветротурбины, а E и μ — модуль упругости и коэффициент Пуассона силовых конструкций ветротурбины.

Предполагая, что конструкция выполнена из одного и того же материала, из десяти параметров, определяющих тензор напряжений σ_{ij} ,

можно получить семь независимых комбинаций

$$\frac{\sigma}{\rho v^2}; \bar{r} = \frac{r}{R}; \theta; h = \frac{h}{R}; Z = \frac{wR}{v}; \frac{E}{\rho v^2}; \mu.$$

При постоянной скорости ветра v для геометрически подобных ветротурбин, изготовленных из одинаковых материалов,

$$\frac{E}{\rho v^2} = \text{const} \text{ и } \mu = \text{const}. \text{ В этих условиях компоненты тензора}$$

напряжений

$\sigma_{ij}(\bar{r}, \theta, \bar{h})$, в относительных единицах, быстроходность Z и динамический напор $\rho v^2/2$ могут выражаться как

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{2} \rho v^2 \sigma_{ij}(\bar{r}, \theta, \bar{h}, Z), \quad (3.1)$$

что позволяет считать тензоры напряжений σ_{ij} в геометрически подобных точках, при одинаковой быстроходности $Z = \text{const}$, одинаковыми.

Нагрузки на силовые конструкции ветродвигателей, обусловленные их весом, малы по сравнению с ураганными. Например, вес ветродвигателя с диаметром ветротурбины 5 м $\cong 100$ кг, а опрокидывающая сила при урагана $\cong 1000$ кг.

3.3 Сохранение коэффициента использования энергии ветра при геометрически подобном уменьшении размера ветротурбины

Основные аэродинамические характеристики ветротурбины, с которыми оперирует ветроэнергетика, — коэффициент использования энергии ветра ξ и быстроходность Z — можно рассматривать с общих позиций теории подобия как две независимые безразмерные комбинации

$$\xi = \frac{W}{1/2 \rho v^3 \pi R^2} \quad (3.2)$$

и

$$Z = \frac{wR}{v}$$

Коэффициент ξ характеризует мощность, а быстроходность Z - угловую скорость ветротурбины в относительных единицах. Поэтому, согласно теории подобия и размерности, функциональную связь между определяющими параметрами, $W = f(p, v, R, w)$ можно записать в виде

$$\xi = \xi(\mathbf{z}), \quad (3.3)$$

Из инвариантности кривой $\xi(Z)$ следует, что в режиме максимального отбора мощности ($Z = Z_{\text{опт}}$) частота вращения ветротурбин обратно пропорциональна их радиусу ($\omega \cong \frac{1}{R}$). Что касается собственных частот колебаний силовых элементов конструкций ветротурбин, то, в соответствии с постоянством скоростей распространения упругих волн, в том числе волн изгиба, в геометрически подобных ветротурбинах, изготовленных из одинаковых материалов, они так же обратно пропорциональны радиусу ветротурбины ($\omega_i \cong \frac{1}{R}$).

Число Рейнольдса $Re = \nu p \frac{R}{\eta}$, наряду с ξ и Z , появляется в качестве третьей независимой безразмерной комбинации, если отвлечься от модели ветротурбины в идеальной жидкости и к числу определяющих параметров добавить динамическую вязкость η . Тогда выражение $\xi = \xi(Z)$ запишется в виде $\xi = \xi(Z, Re)$. Вследствие изменения числа Re коэффициент использования энергии ветра ξ_m несколько снизится с уменьшением диаметра ветротурбины D .

Падение величины ξ_m может происходить от роста концевых потерь, связанных со срывом вихрей с концов лопастей, а также в связи со снижением числа Рейнольдса Re и ростом аэродинамического сопротивления лопастей.

Коэффициент использования энергии ветра ξ , быстроходность Z и крутящий момент k определяются как

$$\xi = \frac{W}{1/2 \rho v^2 \pi R^2}; \quad Z = \frac{\omega R}{v}; \quad k = \frac{k}{1/2 \rho v^2 \pi R^3}; \quad (3.4)$$

где W - мощность, развиваемая ветротурбиной; ρ - плотность воздуха; R - радиус ветротурбины; v - скорость ветра; ω - угловая скорость ветротурбины; k - крутящий момент ветротурбины в абсолютных единицах.

Коэффициент использования энергии ветра ξ является однозначной функцией быстроходности ветротурбины Z , инвариантной по отношению к изменениям скорости ветра v и радиуса ветротурбины R , при условии сохранения геометрического подобия.

Быстроходность ветротурбины зависит от нагрузки и может меняться от нуля до анемометрической быстроходности $Z_{\text{анем}}$ (при ее свободном вращении). Геометрически подобные ветротурбины имеют одинаковую анемометрическую быстроходность $Z_{\text{анем}}$ и, следовательно, испытывают равные максимальные напряжения σ_m при равной скорости ветра $v_{\text{ураг}}$. Здесь в неявном виде учтены напряжения σ_ω , связанные

с центробежными силами, которые, как известно, определяются величиной линейной скорости вращающегося тела.

Оптимальная быстроходность $Z_{\text{опт}}$ соответствует оптимальному нагрузочному моменту $k_{\text{опт}}$. Отношение статического крутящего момента заторможенной ветротурбины $k_{\text{ст}}$ к оптимальному нагрузочному моменту $k_{\text{опт}}$ характеризует приемистость ветротурбины, достигающей у ветротурбины с $Z_{\text{опт}} \cong 1$ величины 1,5.