

Построение аэродинамических и энергетических характеристик турбины ветроэнергетической установки горизонтально-осевого типа

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Введение

В настоящее время существует большое количество модификаций ветротурбин, которые отличаются друг от друга формой, профилями, пропорциями, ориентацией, количеством лопастей, а также назначением и принципом работы. В данной статье уделено внимание ветротурбинам ветроэнергетических установок (ВЭУ) горизонтально-осевого типа с аэродинамическими профилями лопастей, которые характеризуются большой энергетической эффективностью.

В процессе эксплуатации турбина ВЭУ находится либо в состоянии вращательного движения в зависимости от ветровых условий и работоспособности установки, либо в состоянии покоя.

Постановка задачи

Одной из основных задач автоматического регулирования ветротурбины является поддержание постоянства частоты вращения при различных скоростях ветра. Рассмотрим метод аэродинамического регулирования частоты вращения ветротурбины. Для решения задачи необходимо построение аэродинамических характеристик регулирования, которые представляют собой функциональную зависимость угла поворота лопастей от изменения скорости ветра при условии сохранения постоянства частоты вращения.

При пуске и остановке ветротурбины, подключении и отключении генератора, резком увеличении и уменьшении скорости ветра следует обеспечить наибольшее быстроедействие механизма поворота лопастей. Однако большое быстроедействие механизма приводит к значительным аэромеханическим перегрузкам лопастей, которые возникают на протяжении переходных процессов. В связи с этим требуется согласование таких параметров, как быстроедействие механизма поворота, величина механических перегрузок лопастей, коэффициент запаса прочности лопастей.

Построение характеристик ветротурбины

Для построения аэродинамических и энергетических характеристик ветротурбин, являющихся нелинейными функциями скорости ветра, частоты вращения и угла поворота лопастей относительно плоскости вращения, был создан метод, который позволил рассчитать характеристики ветротурбин различного типа. Методика позволила определить аэродинамические силы, силы инерции и массовые силы, действующие на лопасть при регулировании частоты вращения ветротурбины за счет изменения угла установки лопастей.

Определение нагрузок дало возможность оценить напряжения в сечениях лопасти, выявить наиболее опасные сечения и сравнить эти напряжения с предельно допустимыми напряжениями для конкретного материала.

При условии, что вектор скорости перпендикулярен к плоскости вращения ветротурбины и все лопасти находятся в одинаковых ветровых условиях, можно записать основные функциональные зависимости для ветротурбины, а именно момент вращения ($M_{\text{вТ}}$) и сила лобового давления ($F_{\text{л}}$), следующим образом:

$$M_{\text{вТ}} = f_1(v, \omega_p, \varphi_{\text{л}}), \quad F_{\text{л}} = f_2(v, \omega_p, \varphi_{\text{л}}). \quad (1)$$

Используя основные положения ветротехники [1, 2, 3], приведем трехпараметрические зависимости (1), в целях упрощения анализа и применения, к двухпараметрическим путем использования относительных величин момента ($\bar{M}_{\text{вТ}}$), силы лобового давления ($\bar{B}_{\text{к}}$) и быстроходности турбины (z) при постоянном значении угла поворота лопастей:

$$M_{\text{вТ}} = 0,5\pi R^3 \rho v^2 \bar{M}_{\text{вТ}}, \quad \bar{M}_{\text{вТ}} = (f_3(z))_{\varphi_{\text{л}}}, \quad \varphi_{\text{л}} = \text{const}^\circ, \quad (2)$$

$$F_{\text{л}} = 0,5\pi R^2 \rho v^2 \bar{B}_{\text{к}}, \quad \bar{B}_{\text{к}} = (f_4(z))_{\varphi_{\text{л}}}, \quad z = \omega_p R / v, \quad (3)$$

где $\bar{M}_{\text{вТ}}$, $\bar{B}_{\text{к}}$ – аэродинамические характеристики ветротурбины, f_3 , f_4 – нелинейные функции.

С учетом (2) механическая мощность ветротурбины ($P_{\text{вТ}}$) определяется по формуле

$$P_{\text{вТ}} = M_{\text{вТ}} \omega_p. \quad (4)$$

Запишем выражение для механической мощности ветротурбины ($P_{\text{вТ}}$) с помощью коэффициента использования энергии ветра (коэффициента мощности) (C_p):

$$P_{\text{вТ}} = C_p \frac{\rho v^3}{2} \pi R^2, \quad (5)$$

где

$$C_p = (f_5(z))_{\varphi_{\text{л}}}. \quad (6)$$

Зависимость коэффициента момента (C_m) от быстроходности (Z) может быть получена из соотношения

$$C_m(Z) = C_p(Z) / Z. \quad (7)$$

Анализ статических характеристик ветротурбины выполним с использованием $\bar{M}_{\text{вТ}}$ и $\bar{B}_{\text{к}}$ для установки с номинальной мощностью 600 кВт, номинальным значением частоты вращения и скорости ветра соответственно 23 об/мин и 13 м/с. На рис. 1 показаны мощностные характеристики ВЭУ компаний "Turbowinds", "Nordex" и "NEG Micon".

Наилучшую характеристику из представленных имеет ветроэнергетическая установка Т600-48 компании "Turbowinds". Мощность данной ВЭУ в рабочей точке выше мощности ветроустановки фирмы "Nordex" и фирмы "NEG Micon" на 4,3 и 3 % соответственно. Основные геометрические характеристики ветротурбины ВЭУ Т600-48 были предоставлены ПИИ ООО "Уиндэнерго ЛТД" для проведения научно-исследовательской работы.

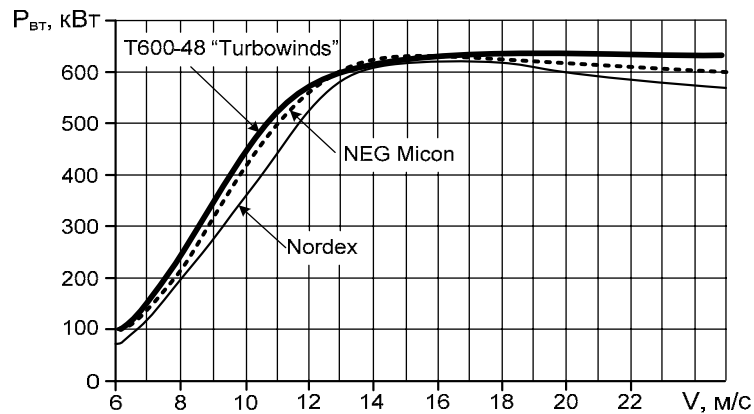


Рис. 1. Мощностные характеристики ветротурбин

Мощность турбины определяется по выражению (4) и может принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от режима работы. При определении статических характеристик будем рассматривать только положительные значения, что в данном случае соответствует работе турбины в режиме ветродвигателя. Максимальное значение мощности ветротурбины составляет 690 кВт, что соответствует номинальной мощности всей установки (с учетом потерь в трансмиссии и генераторе) на уровне 600 кВт.

Одной из основных энергетических характеристик ветротурбины является коэффициент использования энергии ветра (C_p), который показывает, какая часть кинетической энергии ветрового потока, проходящего через плоскость вращения лопастей, преобразовывается в механическую энергию вращательного движения. В данном случае определяем его величину следующим образом:

$$C_p = \frac{M_p(\varphi_l, \omega_p, v) \cdot \omega_p}{0,5\rho v^3 \pi R^2}. \quad (8)$$

Результаты расчетов показаны на рис. 2.

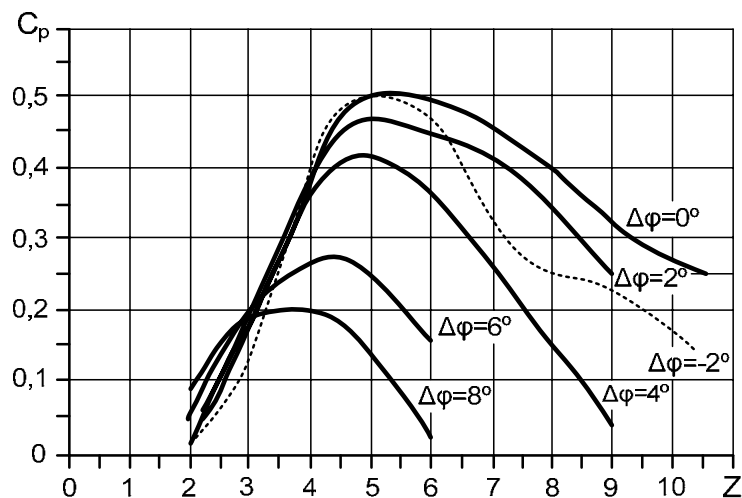


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования энергии ветра (C_p) от быстроходности (Z) при изменении угла установки лопастей

Значение коэффициента C_p определяется из условия сохранения постоянства частоты вращения ($n=\text{const}$) при изменении скорости ветра (v) и угла установки лопастей ($\Delta\varphi$). Кривая $\Delta\varphi=0^\circ$ соответствует рабочему положению лопастей при номинальных условиях работы. Значения угла установки лопастей $\Delta\varphi>0$ соответствуют их повороту в сторону флюгерного положения, $\Delta\varphi<0$ – в сторону антифлюгерного положения. Рассмотрим диапазон угла установки лопастей от -2° до $+8^\circ$.

Используя соотношение (6), можно получить зависимости коэффициента момента (C_m) от быстроходности (Z) ветротурбины при аналогичных условиях. Результаты расчетов показаны на рис. 3.

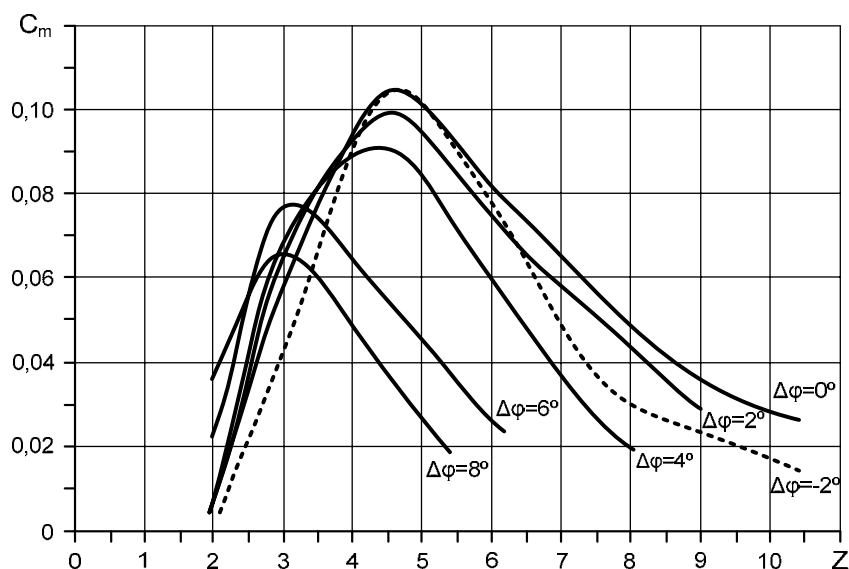


Рис. 3. Зависимость коэффициента момента (C_m) от быстроходности (Z) ветротурбины при изменении угла установки лопастей

Характер изменения коэффициента момента (C_m) и коэффициента использования энергии ветра (C_p) турбины схож. Отклонение угла установки лопастей ($\Delta\varphi$) от нулевого (номинального) положения ведет к уменьшению значения коэффициентов и, следовательно, к ухудшению характеристик. Таким образом, с точки зрения стабилизации частоты вращения ветротурбины подходят оба способа аэродинамического регулирования.

Поворот лопастей во флюгерное или антифлюгерное положение приводит к изменению величины суммарной аэродинамической силы (F_Σ), действующей на лопасть, и, как результат, силы лобового давления (F_Π) на лопасть и коэффициента лобового давления (B_k) на ветротурбину. Результаты расчетов показаны на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что характер изменения коэффициента лобового давления (B_k) отличается от характера изменения коэффициента момента (C_m) и коэффициента использования энергии ветра (C_p) турбины. Поворот лопастей во флюгерное положение ($\Delta\varphi>0$) приводит к уменьшению значения коэффициента лобового давления на ветроколесо (B_k) и, следовательно, к уменьшению величины силы лобового давления (F_Π). Поворот лопастей в сторону антифлюгерного положения ($\Delta\varphi<0$) приводит к увеличению коэффициента B_k и силы F_Π , что ухудшает условия работы лопастей и ветротурбины в целом.

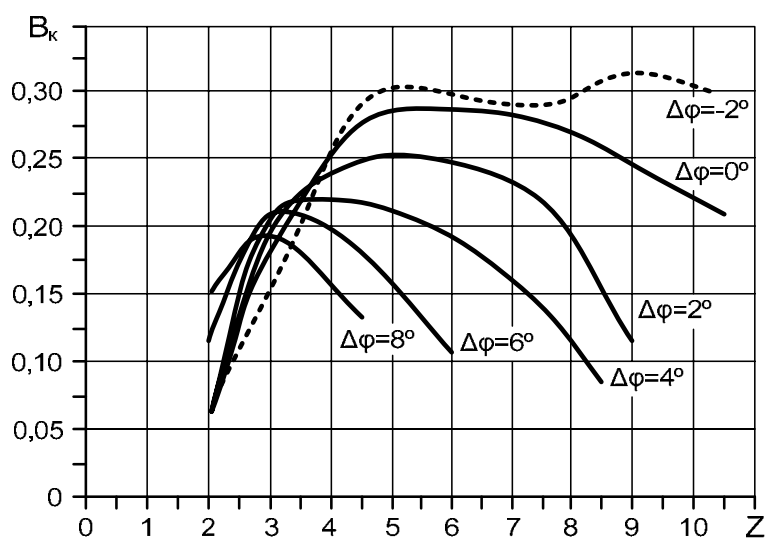


Рис. 4. Зависимость коэффициента лобового давления (B_k) от быстроходности (Z) ветротурбины при изменении угла установки лопастей

Изменение угла установки лопастей в процессе работы ВЭУ, вызванное необходимостью стабилизации частоты вращения ветротурбины, приводит к появлению аэромеханических перегрузок. Из соображений прочности целесообразно производить регулирование частоты вращения ветротурбины путем поворота лопастей во флюгерное положение.

Выводы

1. Разработан метод расчета и построения аэродинамических и энергетических характеристик турбины ветроэнергетической установки.
2. Изменение угла установки лопастей в процессе работы ВЭУ, вызванное необходимостью стабилизации частоты вращения ветротурбины, приводит к появлению аэромеханических перегрузок, величина которых зависит от скорости поворота лопастей относительно плоскости вращения.
3. Построение характеристик ветротурбины позволит определить параметры управления нестационарными режимами работы ВЭУ для уменьшения динамических аэромеханических нагрузок на лопасти и элементы трансмиссии, что является одной из основных задач автоматического регулирования ветротурбины.

Список литературы

1. Абрамовский Е.Р., Городько С.В., Свиридов Н.В. Аэродинамика ветродвигателей. – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1987. – 220 с.
2. Фатеев Е.М. Ветродвигатели и ветротурбины. – М.: Сельхозгиз, 1957. – 544 с.
3. Промышленная аэродинамика: сб. № 8 Ветродвигатели / Под ред. Г.Х. Сабина. – М.: ЦАГИ Оборонгиз, 1957. – 210 с.
4. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И.. Ветроэлектрогенераторы: Учебник. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2003. – 400 с.