

Повышение эффективности ветроэнергетических установок

С.А. Конаков, аспирант, Санкт-Петербургский ГПУ,
Д.В. Гринько, аспирант, Оренбургский ГАУ

В настоящее время активно проводятся научные и инженерные исследования, касающиеся ветроэнергетических установок (ВЭУ), их конструкции и способов управления. Важной задачей, которую приходится решать при этом, является повышение эффективности работы ВЭУ, а также управление мощностью при больших скоростях ветра.

Сегодня для наиболее распространённых типов ветровых турбин с горизонтальной осью вращения ветроколеса существует два основных механизма ограничения мощности ВЭУ – так называемые pitch и stall методы. В последнем используют лопасти специальной конструкции, для которых при превышении скорости ветра происходит срыв воздушного потока, начиная с края лопасти. При этом снижается создаваемый вращающий момент, что не позволяет ветроколесу разогнаться до критических скоростей. Метод pitch регулирования, или метод изменения угла установки лопасти, в ранней литературе считался излишне сложным для применения [1], но сейчас, с развитием техники, он стал практически стандартным для всех крупных ВЭУ. Более того, осуществлён переход к более сложной системе регулирования каждой лопасти отдельно [2], что позволяет осуществлять улучшенный контроль управления мощностью и повысить эффективность генерации энергии [3]. Одним из вариантов pitch регулирования является поворот только конца лопасти для создания аэродинамического сопротивления быстрому вращению [4]. Однако, несмотря на все успехи в области создания систем регулирования, разработчики упускают ряд важных деталей, которые играют существенную роль для ВЭУ большой мощности, что в конечном итоге приводит к снижению эффективности их работы.

Основные принципы работы ВЭУ большой мощности. Обычно ВЭУ большой мощности (более 3 МВт) используют ветроколесо с горизонтальным расположением оси и малым числом лопастей аэродинамического профиля. Типичные размеры можно представить на примере ВЭУ «SeaTitan 10 MW» с диаметром ротора 190 м [5]. С увеличением размеров ветроколеса падает частота вращения. Так, если для ВЭУ Enercon E-44 / 900 kW она составляет до 34 об/мин [6], то для SeaTitan 10 MW она равна 10 об/мин.

Главной особенностью ВЭУ большой мощности являются значительный диаметр и малая скорость вращения ротора. При этом появляется вопрос о том, можно ли при расчёте характеристик использовать предположение о равномерном потоке

ветра через сечение ротора. Для малых турбин это приближение работало, поскольку осреднение проводилось по малой площади и за малое время одного оборота. Для больших ВЭУ уже невозможно считать, что ветровой поток будет постоянным через всё сечение ротора в течение времени одного оборота. Поскольку ветровой поток будет непостоянным, то добиться оптимального угла установки лопасти для повышения эффективности преобразования энергии ветра в существующих системах невозможно.

Для решения этой проблемы мы предлагаем использовать лопасть, разделённую на несколько сегментов (рис. 1).

Каждый сегмент может изменять свой угол установки независимо от других. Информация об аэродинамических условиях определяется исходя из сигналов от датчиков давления, которые массивом расположены на каждом сегменте лопасти. При такой архитектуре системы возможен контроль угла атаки сегмента лопасти в режиме реального времени и поддержание его оптимальным путём управления углом установки при изменении характеристик ветрового потока на протяжении всей траектории движения рассматриваемого сегмента.

Эффективность работы ВЭУ при этом может быть повышена на величину, равную объёму энергетических потерь, происходящих по причине неоптимального расположения лопасти в неравномерном ветровом потоке. Для того чтобы оценить эти величины, рассмотрим аэродинамические силы, возникающие на лопасти ВЭУ. На рисунке 2 показан профиль лопасти, на которую воздействует истинный ветер со скоростью V_a и кажущийся ветер V_{rel} , обусловленный вращением лопасти. Складываясь, эти скорости образуют вымпельный ветер V_{rel} , направленный под углом φ к плоскости вращения ветроколеса.

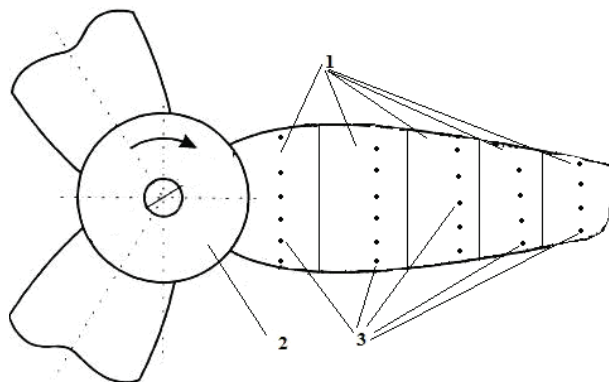


Рис. 1 – Конструкция лопасти:

1 – сегмент лопасти; 2 – ступица; 3 – датчики давления

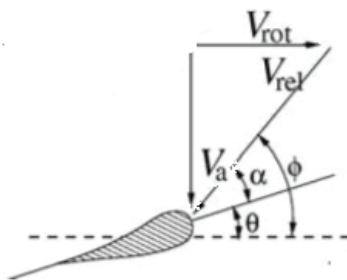


Рис. 2 – Схема сложения скоростей ветра

Угол атаки, который измеряется между V_{rel} и хордой лопасти, равен α , а угол установки лопасти относительно плоскости вращения составляет θ . Именно под действием выпелного ветра происходит образование аэродинамических сил на профиле, которые в конечном итоге заставляют двигаться лопасть.

Для описания качества аэродинамического профиля используют безразмерные коэффициенты подъёмной силы C_L и лобового сопротивления C_d . Отношение C_L/C_d называется аэродинамическим качеством профиля (К). Чем больше подъёмная сила и меньше сопротивление, тем лучше, а значение аэродинамического качества больше. Оно зависит от угла атаки, имеет своё максимальное значение при оптимальном угле и снижается при его изменении как в большую, так и в меньшую сторону. Из рассмотренного следует, что направление V_{rel} зависит от V_a , V_{rot} . При изменении модуля или направления любой из этих величин происходит изменение направления V_{rel} , и, как следствие, изменяется α , при фиксированном угле θ . Если α имел оптимальное значение, то при указанных вариациях эффективность будет понижаться.

Уменьшение аэродинамического качества лопасти при изменении угла атаки. Прежде чем приступить к расчётам, необходимо отметить, что ошибка угла

установки лопасти в 0.3° может привести к аэродинамической разбалансировке турбины [7]. Для расчёта построим полярю профиля «NACA 415» с использованием программы XFLR5 и рассчитаем C_L/C_d как функцию от угла атаки при числе Рейнольдса равном $1 \cdot 10^6$. Как видно на рисунке 3, максимум C_L/C_d соответствует $\alpha = 9.3^\circ$. При изменении α на 1° максимальное отклонение составляет 3,6%, а уход угла атаки от оптимального значения на 3° приводит к снижению аэродинамического качества на 9%. Расчёт показывает, что при изменении угла атаки эффективность лопасти уменьшается.

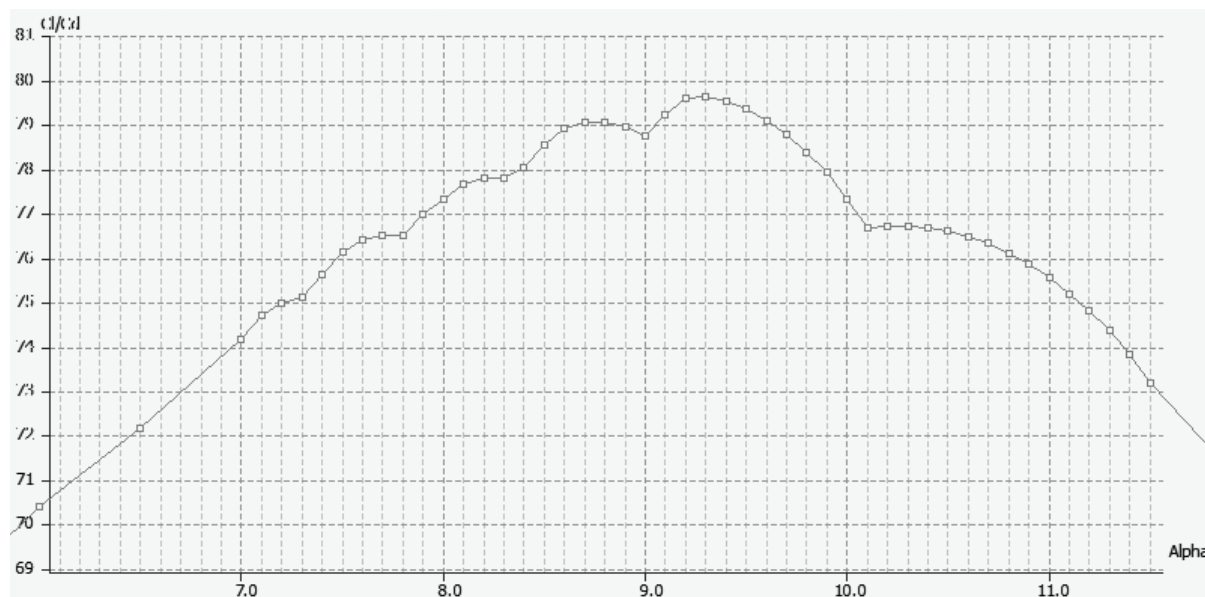
Отметим, что поскольку углы α , ϕ и θ (рис. 2) связаны между собой, то при постоянной величине θ изменения угла ϕ прямо соответствуют изменениям угла α . При этом для описания изменений можно использовать угол ϕ , что удобнее, т.к. его величина может быть непосредственно определена из соотношения V_a и V_{rot} . В дальнейшем в расчётах мы рассмотрим изменение угла ϕ при изменении различных факторов.

Зависимость угла ϕ от скорости ветра V_a . Рассмотрим относительные скорости V_a , V_{rot} и V_{rel} для ВЭУ мощностью 10 МВт с длиной лопасти 90 м. В таблице 1 приведён расчёт ϕ в зависимости от V_a при постоянной частоте вращения $\omega = 10$ об/мин. Как мы видим, даже для больших радиусов при изменении скорости ветра на 5 м/с изменения ϕ составляют 3° .

Изменение скорости ветра от высоты. Скорость ветра V_1 на высоте h_1 определяется через скорость ветра V_ϕ на высоте флюгера h_ϕ по формуле [8]:

$$V_1 = V_\phi (h_1 / h_\phi)^m.$$

Среднегодовое значение параметра $m = 0,2$ и, соответственно, если скорость на высоте 30 м в нижней части ротора диаметром 190 м составляет 5 м/с, то в верхней части она равна 9,3 м/с, т.е. от-

Рис. 3 – График зависимости C_L/C_d от угла атаки α при $Re = 1 \cdot 10^6$

1. Расчёт φ в зависимости от V_a

Расстояние от оси вращения, м		Угол φ , °					
	V_{rot}, м/с V_a, м/с	5	10	15	20	25	30
10	10,47	25,55	43,72	55,12	62,41	67,32	70,80
50	52,33	5,46	10,82	16,00	20,93	25,55	29,84
90	94,20	3,04	6,06	9,05	11,99	14,87	17,67

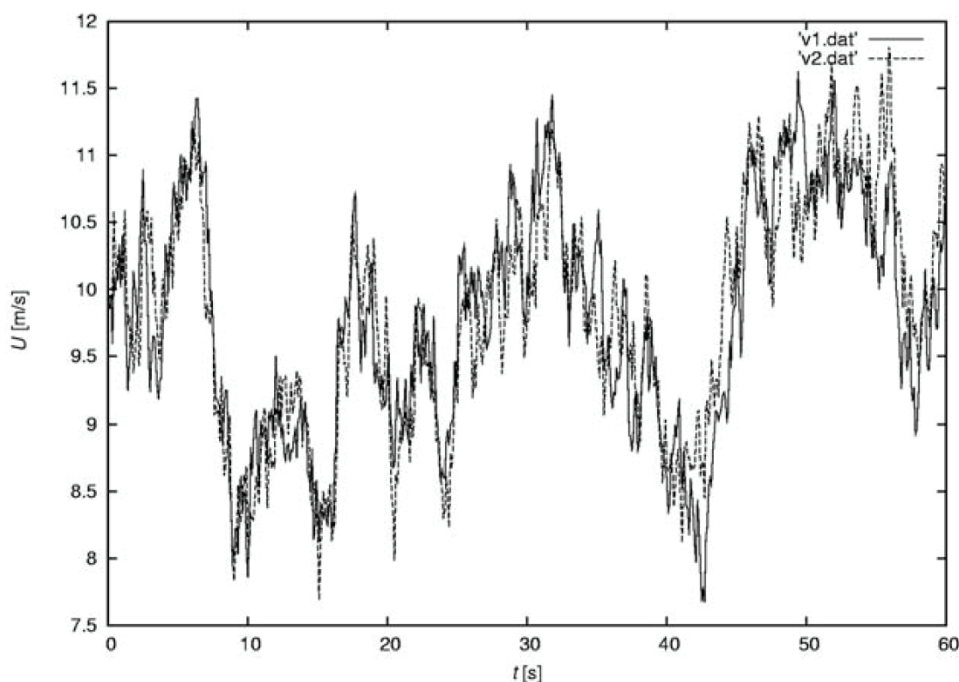


Рис. 4 – График кратковременных изменений скорости ветра [4]

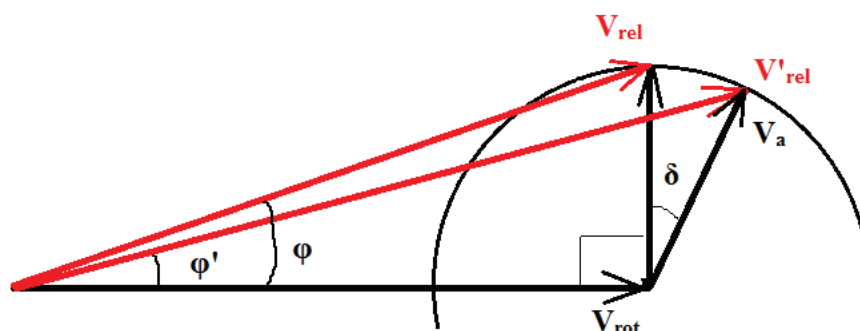


Рис. 5 – Изменения угла при изменении направления истинного ветра

личается на 45%. Это может привести к изменению φ на 3° , и мы потеряем 9% мощности. На длине лопасти 45 м рассчитанное изменение φ составляет $1,5^\circ$, что приводит к потерям аэродинамического качества примерно на 5%.

Изменение скорости ветра во времени. О кратковременном характере измерения скорости ветра можно судить по данным, представленным на рисунке 4. При средней скорости ветра 9,5 м/с мгновенное значение может измениться на 2–3 м/с за 1,5–2 с. При этом изменение угла атаки для точки, расположенной на расстоянии 50 м от основания лопасти, составляет 3° . Для конца лопасти на расстоянии 90 м изменение угла атаки составляет $1,8^\circ$, что соответствует потерям мощ-

ности в 5%. Существующие даже для несильного ветра быстрые изменения скорости приводят к потерям энергии порядка 6–7%. Для сильного ветра эти величины значительно больше.

Малые изменения направления ветра. Механизм азимутального поворота ВЭУ работает с 10–15-минутной задержкой от реального изменения направления ветра, поэтому краткосрочные вариации направления никак не отслеживаются. Можно оценить, что на характерном временном отрезке 100 с угол направления истинного ветра может изменяться на 25%. При этом происходит изменения угла φ , как показано на рисунке 5.

Результаты расчётов изменения угла φ при постоянной скорости ветра 10 м/с показаны в таб-

2. Результаты расчётов изменения угла φ

Расстояние от оси вращения, м	$\delta, ^\circ$ $V_{\text{rot}}, \text{м/с}$	Угол $\varphi, ^\circ$					
		0	1	3	5	10	15
10	10,47	43,72	43,24	42,29	41,33	38,94	36,54
50	52,33	10,82	10,79	10,70	10,61	10,33	9,98
90	94,20	6,06	6,05	6,02	5,99	5,86	5,70

3. Значение φ для $V_a = 10 \text{ м/с}$

Расстояние ω , об/мин от оси вращения, м	Угол $\varphi, ^\circ$			
	10	9	8	7
10	43,72	46,73	50,08	53,80
50	10,82	11,99	13,44	15,28
90	6,06	6,73	7,56	8,63

лице 2. По таблице видно, что для точки на середине лопасти отклонение φ при изменении направления ветра на 15° составляет $0,9^\circ$, что соответствует уменьшению эффективности на 3%. Т.е. кратковременные вариации направления ветра могут приводить к значительным изменениям угла атаки.

Изменения скорости вращения ветроколеса.

Поскольку ветроколесо мощной турбины имеет большую массу и момент инерции, то переходные процессы, связанные с изменением скорости вращения, происходят медленно. Т.е. может возникать ситуация, когда истинный ветер изменил свою скорость, а ветроколесо ещё не успело отреагировать на эти изменения. При этом изменяется соотношение V_a, V_{rot} и угол φ . Таблица 3 показывает значение φ для $V_a = 10 \text{ м/с}$ при различных частотах вращения ветроколеса ω .

Как можно заметить, незначительное изменение частоты вращения приводит к большим вариациям угла φ , при этом потери энергии могут достигать 8–9% для концов лопасти и 20–25% для средней части. При этом если скорость ветра, как мы видели выше, меняется постоянно, то фактически около 40% времени ветроколесо будет иметь

частоту вращения, отличную от оптимальной, что значительно снижает эффективность работы ВЭУ.

Таким образом, эффективность преобразования кинетической энергии ветра в электрическую энергию при помощи ВЭУ существенно зависит от аэродинамических параметров ветроколеса. Угол атаки варьируется в значительных пределах из-за следующих факторов: изменение скорости ветра по сечению ветроколеса, в том числе и с высотой, изменение скорости ветра во времени по скорости и по направлению, изменение частоты вращения ветроколеса. В реальных условиях эксплуатации влияние этих факторов приводит к снижению эффективности работы ВЭУ на 10–15%. Модификация схемы управления, а также применение предложенной конструкции лопасти приведёт к устранению потерь энергии на ВЭУ и, как следствие, к повышению её эффективности и мощности.

Литература

1. Адрианов В.Н. и др. Ветроэлектрические станции. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 163 с.
2. Efficient and cost effective, E-82 E2 / 2,000 kW. URL: <http://www.enercon.de/en-en/62.htm>, свободный (дата обращения: 01.06.2014).
3. Control System. URL: <http://www.enercon.de/en-en/754.htm>, свободный (дата обращения: 01.06.2014).
4. Hansen M.O.L. Aerodynamics of wind turbines. Routledge, 2013.
5. SeaTitan 10 MW Wind Turbine. URL: <http://www.amsc.com/documents/seatitan-10-mw-wind-turbine-data-sheet/>, свободный (дата обращения: 01.06.2014).
6. E 44 Enercon System Concept. URL: <http://www.enercon.de/en-en/60.htm> свободный (дата обращения: 01.06.2014).
7. Blade Angle Measurements. URL: <http://www.berlinwind.com/englisch/services/blade-angle-measurements/> свободный (дата обращения: 01.06.2014).
8. Безруких П.П. Ветроэнергетика. Справочное и методическое пособие. М., 2010. 315 с.