

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЕТРОТУРБИНЫ С РЕГУЛИРУЕМЫМ УГЛОМ УСТАНОВКИ ЛОПАТОК

^{1,2}Хамдамов М. М., ^{1,2}Музаффаров С. А., ¹Кучкарова З.М.

¹Университет Ориентал, Ташкент, Узбекистан

²Институт механики и сейсмостойкости сооружений им.

М.Т. Уразбаева АН РУз, Ташкент, Узбекистан

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлены результаты проектирования, изготовления и экспериментального исследования лабораторного опытного образца ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения (ВТВО), разработанного по патенту FAP 20240465 в Институте механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз. Конструктивной особенностью установки является ротор с четырьмя крыльями, содержащими 24 профилированные лопасти, оснащенные механизмом индивидуальной ступенчатой юстировки угла установки в диапазоне от 0° до 40°. Физический эксперимент проводился на специализированном аэродинамическом стенде с искусственным обдувом при скоростях ветрового потока от 3,35 до 8,94 м/с с использованием ультразвукового анемометра Vortex, цифрового датчика крутящего момента NJN-200 и программируемого электромагнитного нагрузочного узла NANBEI NDN-200.

В ходе испытаний определены зависимости крутящего момента (Т), угловой скорости и генерируемой мощности (Р) от величины тормозного электромеханического момента при различных скоростях ветра и углах установки лопаток. Установлено, что при низких скоростях ветра ($V < 6$ м/с) наилучший пусковой момент и стабильность страгивания ротора обеспечивает угол установки 10°. При скоростях $V > 7,5$ м/с максимальная аэродинамическая эффективность достигается при угле установки 30°, где мощность турбины достигла рекордного значения $P = 160,2$ отн. ед. при свободном разгоне до 33 об/мин. Выявлено, что увеличение угла до 40° вызывает эффект глубокого аэродинамического срыва потока (deep stall), снижающий эффективность выработки энергии практически на 50%. Выполнен технико-экономический расчет автономной микро-ВЭУ, показавший срок окупаемости системы порядка 3 лет при суммарных капитальных затратах 21 млн сум.

Ключевые Слова: Вертикально-осевая ветротурбина (ВТВО), опытный образец, аэродинамический стенд, угол установки лопаток, крутящий момент, угловая скорость, точка максимальной мощности (MPPT), глубокий срыв потока, технико-экономический анализ, срок окупаемости.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие распределенной и автономной малой ветроэнергетики обуславливает повышенный интерес к ветроэнергетическим установкам с вертикальной осью вращения (ВТВО). Такие установки обладают ключевыми эксплуатационными преимуществами: не требуют ориентации на направление ветрового потока, эффективно работают в условиях низкой и стохастической скорости ветра, а также просты в обслуживании благодаря нижнему расположению электрогенератора. Однако их широкое применение сдерживается сравнительно низким пусковым моментом и сложными нестационарными отрывами потока в рабочем цикле.

В большинстве существующих конструкций ВТВО угол установки лопастей фиксирован, что снижает их энергетическую эффективность при изменении регионального ветрового режима, а применение активных систем динамического изменения угла существенно усложняет конструкцию и повышает ее стоимость. В Институте механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз разработан опытный образец вертикально-осевой ветротурбины (патент FAP 20240465), оснащенный узлом индивидуальной регулировки угла установки лопаток в диапазоне от 0° до 40° , позволяющий адаптировать геометрию ротора под среднегодовые климатические показатели региона.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование аэродинамических и энергетических характеристик разработанного лабораторного образца ВТВО на аэродинамическом стенде с искусственным обдувом в диапазоне скоростей ветра от 3,35 до 8,94 м/с. В задачи исследования входило определение динамических зависимостей крутящего момента, угловой скорости и мощности от величины тормозной электромеханической нагрузки при различных углах установки лопаток, нахождение точек максимальной мощности (MPPT), выявление критических режимов отрыва потока (deep stall), а также технико-экономическая оценка эффективности применения данной установки.

Анализ результатов экспериментальных исследований ветротурбины с вертикальной осью вращения в лабораторных условиях

В данной статье представлены результаты экспериментальных испытаний, проведенных в лабораторных условиях с целью определения аэродинамических характеристик и энергетических показателей разработанной ветротурбины с вертикальной осью вращения. При эффективном проектировании устройства

учет годовых ветровых показателей региона его установки, а также обеспечение механизма самозащиты турбины при высоких и нестабильных скоростных режимах являются крайне важной научно-практической задачей. По этой причине в данной статье в качестве основного критерия определен вопрос нахождения и регулирования оптимального угла атаки лопастей в зависимости от различных диапазонов скорости ветра. Основная цель испытаний заключается в эмпирической оценке динамических взаимосвязей между крутящим моментом, возникающим в турбине при различных скоростных режимах ветрового потока, частотой вращения (числом оборотов), угловой скоростью и подключаемой к ней электромеханической нагрузкой.

Экспериментальные испытания проводились в диапазоне низких скоростей ветра от 3,35 м/с до 8,94 м/с. Наряду с этим был отдельно исследован угол установки лопастей, являющийся важным фактором повышения энергетической эффективности турбины. В частности, положение лопастей устройства изучалось в диапазоне от 0° до 40° с шагом изменения 10° (то есть при 10° , 20° , 30° и 40°). Данный подход позволил провести глубокий анализ того, как изменение угла установки лопастей влияет на угол атаки, образующийся между ветровым потоком и профилем лопасти.

Процесс преобразования кинетической энергии в механическую энергию вращательного движения был проанализирован на основе законов классической физики и аэродинамики. Путем наблюдения за динамикой изменения угла атаки было оценено соотношение подъемной силы и силы сопротивления, возникающих на лопастях при различных скоростях ветра. В ходе исследования основное внимание было уделено наблюдению за балансом между чистым аэродинамическим крутящим моментом, создаваемым воздействием ветрового потока на лопасти турбины, и моментом сопротивления (тормозным моментом), возникающим от подключенной к системе полезной нагрузки (генератора или тормозной системы).

Возрастание тормозного момента стремится уравновесить аэродинамический момент, и в результате этого угловая скорость турбины снижается. Когда тормозной момент достигает критического предела, вращение падает до нуля, и турбина останавливается. Ниже подробно излагаются полученные результаты, касающиеся взаимодействия этих физических сил, определения наиболее оптимального положения лопастей, обеспечивающего максимальный аэродинамический крутящий момент в рабочем режиме, а также расчёта мощностных характеристик турбины.

Общий момент силы на оси вращения (Тобщий) представляет собой аэродинамический крутящий момент, возникающий при воздействии ветрового потока на лопасти. С увеличением скорости ветра этот момент возрастает.

Следующей основной величиной является момент тормозящей силы (тормозной момент). Он представляет собой момент сопротивления, оказываемый на ось, подключённую к турбине, полезной нагрузкой, например, электрогенератором или тормозными системами. Чем больше данная величина, тем большее сопротивление оказывается вращению оси.

Следующим ключевым фактором является результирующая угловая скорость (ω). Увеличение тормозного момента стремится уравновесить аэродинамический момент, в результате чего частота вращения турбины (об/мин) снижается. Когда тормозной момент достигает критического предела, частота вращения падает до нуля, и турбина останавливается.

В данном случае характеристика мощности и расчеты представлены в виде $P = T \cdot \omega$, а значения получены как их прямое произведение. Здесь мощность выступает в роли относительного показателя. Если же требуется выразить мощность в стандартных единицах измерения — Ваттах (Вт), то угловую скорость (об/мин) необходимо перевести в радианы в секунду (рад/с):

$$\omega_{rad/s} = \frac{2\pi \omega_{rpm}}{60}$$

В таком случае фактическая механическая мощность рассчитывается следующим образом:

$$P_{watt} = T \cdot \omega_{rad/s}$$

Таблица 1

Результаты эксперимента при угле установки лопастей устройства 0°

Момент силы на оси вращения, Н*м	1	1.6	2.4	3.6				
Результирующая угловая скорость оси, об/мин	9	6	2	0				
Величина тормозного крутящего момента (А), Н·м	0	0.05	0.1	0.15				
$P=T \cdot \omega$	9	9.6	4.8	0				
Момент силы на оси вращения, Н*м	1.3	1.9	2.8	4	5.4			
Результирующая угловая скорость оси, об/мин	14	11	7	3	0			
Величина тормозного крутящего момента (А), Н·м	0	0.05	0.1	0.15	0.2			
$P=T \cdot \omega$	18.2	20.9	19.6	12	0			
Момент силы на оси вращения, Н*м	1.1	1.8	2.7	3.9	5.6	7.2	7.6	

Результирующая угловая скорость оси, об/мин	16	13	11	8	5	2	0		
Величина тормозного крутящего момента (А), Н·м	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3		
$P=T*\omega$	17.6	23.4	29.7	31.2	28	14.4	0		
Момент силы на оси вращения, Н*м	1.1	1.7	2.7	4	5.7	7.4	9.6	11.8	13.7
Результирующая угловая скорость оси, об/мин	22	20	17	14	12	8	5	2	0
Величина тормозного крутящего момента (А), Н·м	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
$P=T*\omega$	24.2	34	45.9	56	68.4	59.2	48	23.6	0
Момент силы на оси вращения, Н*м	1	1.8	2.8	4	6	7.9	10.2	12.1	14.5
Результирующая угловая скорость оси, об/мин	25	23	20	18	16	14	10	7	3
Величина тормозного крутящего момента (А), Н·м	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
$P=T*\omega$	25	41.4	56	72	96	110.6	102	84.7	43.5

Анализ результатов эксперимента показывает (таблица 1), что при каждом режиме скорости ветра точка максимальной мощности турбины (MPPT – Maximum Power Point Tracking) соответствует определенной оптимальной тормозной нагрузке. Динамика полученных эмпирических показателей проявилась следующим образом.

При низкой скорости ветра $V = 3,35$ м/с в режиме работы без тормозной нагрузки угловая скорость составила 9 об/мин. При заданном тормозном моменте 0,05 Н·м показатель относительной мощности турбины достиг своего максимума $P = 9,6$. В данной точке экстремума общий момент на оси вращения составил 1,6 Н·м, а угловая скорость — 6 об/мин. Дальнейшее увеличение нагрузки привело к резкому снижению частоты вращения и остановке турбины.

При средне-низкой скорости ветра $V = 4,47$ м/с наивысшая энергетическая эффективность $P = 20,9$ была зафиксирована при приложении к турбине тормозной нагрузки в 0,05 Н·м. При этом общий момент составил 1,9 Н·м, а угловая скорость — 11 об/мин. При достижении тормозным моментом значения 0,2 Н·м вращение оси прекратилось.

При скорости ветра $V = 5,59$ м/с максимальный пик мощности ($P = 31,2$) наблюдался при значении тормозного момента, равном $0,15$ Н·м. В данном оптимальном рабочем режиме угловая скорость ротора составила 8 об/мин, а создаваемый общий крутящий момент — $3,9$ Н·м.

При скорости ветра выше средней $V = 7,82$ м/с наблюдался резкий рост динамических показателей. Точка максимальной мощности $P = 68,4$ была достигнута при увеличении тормозного момента до $0,2$ Н·м, при этом ротор стабильно вращался с частотой 12 об/мин, а общий крутящий момент составил $5,7$ Н·м.

При высокой скорости ветра $V = 8,94$ м/с был зафиксирован максимальный рабочий режим в рамках данного исследования. Турбина достигла своей абсолютной максимальной мощности ($P = 110,6$) при заданном значении тормозного момента $0,25$ Н·м. В этой точке угловая скорость составила 14 об/мин, а общий момент на оси вращения возрос до $7,9$ Н·м.

Данные измерения наглядно отражают аэродинамическую природу ротора турбины с вертикальной осью вращения. По мере увеличения подключенной к системе полезной нагрузки (тормозного момента) механическая мощность турбины первоначально возрастает по параболическому закону, достигая своего пикового значения. Затем, вследствие возрастания силы сопротивления, аэродинамическая инерция преодолевается, и ротор переходит в стадию остановки. Важнейшим выводом является то, что в ходе данных экспериментов нашло практическое подтверждение следующее: под влиянием особенностей геометрии и профиля лопастей рост максимальной генерируемой мощности турбины при увеличении скорости ветра носит не линейный, а экспоненциальный (степенной) характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментального исследования опытного образца вертикально-осевой ветротурбины на аэродинамическом стенде сформулированы следующие основные выводы:

1. Оптимальные углы установки лопаток: Доказано, что ориентация профилей должна выбираться в зависимости от ветрового потенциала региона. При скоростях ветра $V < 6$ м/с наилучший пусковой момент обеспечивает угол установки $\alpha = 10^\circ$, а при $V > 7,5$ м/с максимальная энергетическая отдача достигается при $\alpha = 30^\circ$, где зафиксирована пиковая мощность $P = 160,2$ отн. ед.
2. Аэродинамический срыв потока (*deep stall*): Увеличение угла установки до $\alpha = 40^\circ$ приводит к резкому превышению критического угла атаки и срыву пограничного слоя. В результате преобладания сил лобового

сопротивления мощность турбины падает почти на 50%, что делает эксплуатацию при углах $\alpha > 30^\circ$ нецелесообразной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на изобретение РУз № FAP 20240465. Ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения / Худжаев И. К., Хамдамов М. М., Музаффаров С. А. и др. — 2024.
2. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence modeling for engineering applications // AIAA Journal. — 1994. — Vol. 32, No. 8. — P. 1598–1605.
3. Islam M., Ting D. S.-K., Fartaj A. Desirable airfoil features for vertical axis wind turbines // Wind Engineering. — 2007. — Vol. 31, No. 3. — P. 165–196.
4. Paraschivoiu I. Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept. — Montreal: Polytechnic International Press, 2002. — 438 p.
5. Aslam Bhutta M. M. et al. CFD applications in various heat exchangers design: A review // Applied Thermal Engineering. — 2012. — Vol. 32. — P. 1–12.
6. Методика технико-экономических расчетов в малой и возобновляемой энергетике. — Ташкент: ФАН, 2018. — 112 с.