

УДК 621.396.96

Ю.Н. Ульянов¹, В.Л. Мисайлов², Г.Ю. Мартыненко¹¹ *Национальный технический университет "ХПИ", Харьков*² *Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков*

ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ РАДИОАКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Выполнен сравнительный анализ средств получения информации для метеорологического обеспечения ветроэнергетических установок (ВЭУ). Показано, что перспективными являются системы горизонтально-го радиоакустического зондирования (ГРАЗ). Определены параметры области пространства, в которой необходимо получить данные о ветре. Оценено влияние вертикального градиента горизонтальной скорости ветра наклон акустического отражателя и смещение фокуса. Показано, что для скоростей ветра, при котором работают современные ВЭУ, вынос фокусного пятна незначителен и позволяет размещать антенны систем ГРАЗ под обтекателем ветроколеса.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, горизонтальное радиоакустическое зондирование, ветер, акустический отражатель.

Введение

Постановка проблемы. Ограниченность невозобновляемых источников энергии (ИЭ) привела в последние десятилетия к активизации работ по использованию альтернативных ИЭ. Здесь, как самая динамично развивающаяся, выделяется ветроэнергетика. В данной отрасли энергия вырабатывается посредством ветроэнергетических установок (ВЭУ) – машин, которые преобразуют энергию ветра в механическую энергию вращающегося ветроколеса, а затем в электрическую энергию. Наибольшее распространение получили ВЭУ с горизонтальной осью вращения (рис. 1).

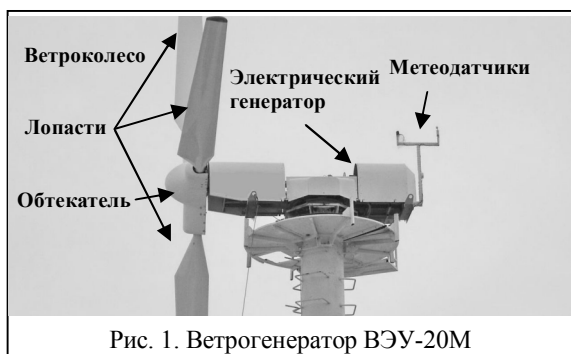


Рис. 1. Ветрогенератор ВЭУ-20М

Эффективность работы ВЭУ в значительной мере ограничивается нестационарностью поля ветра, выражающейся в его порывистости, наличии вертикальных и горизонтальных сдвигов скорости и направления ветра. При критических значениях случайных ветровых воздействий элементы ВЭУ испытывают аэродинамические и механические перегрузки, приводящие к авариям, преждевременному износу и сокращению срока службы ВЭУ.

Кроме защиты ВЭУ от экстремальных ветровых нагрузок, с увеличением их мощности актуаль-

ной становится задача оптимизации режима работы (ОРР) ветрогенераторов, т.е. отбора максимального количества энергии от набегающего воздушного потока и адаптации ВЭУ к изменчивости скорости и направления ветра. Для ОРР и предотвращения аварийных ситуаций при предельных значениях скорости ветра применяют системы регулирования аэродинамических характеристик ветроколеса [1, 2], которые позволяют уменьшить поверхность лопасти, взаимодействующую с ветром, путем изменения угла установки лопасти. Системы регулирования ветроколеса предусматривают процесс ориентации оси ротора ветродвигателя по направлению ветра. Для защиты от аварий при значительных усилениях ветра горизонтально-осевые ВЭУ оснащаются тормозным устройством. Однако все эти методы регулирования не всегда являются эффективными (рис. 2), т.к. необходимы заблаговременные данные о скорости ветра для конкретной ВЭУ, а они, как правило, отсутствуют.

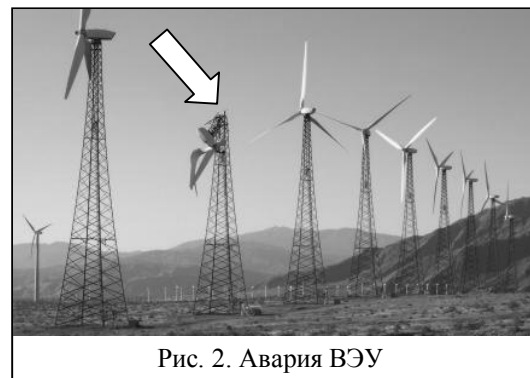


Рис. 2. Авария ВЭУ

Анализ последних исследований и публикаций. Для получения сведений о динамике и структуре поля ветра в настоящее время используются метеорологические приборы, основанные на раз-

личных физических принципах [3, 4]. К перспективным следует отнести средства измерения параметров поля ветра с использованием звуковых волн.

На практике средства измерения ветра, работающие на принципах акустической локации (сонары) из-за шума ВЭУ приходится относить в сторону (рис. 3, [5]), что снижает репрезентативность получаемых данных [6].

Радиолокационные измерители ветра (типа "Wind Profilers") также испытывают сильные помехи от ВЭУ [7] и в непосредственной близости не устанавливаются.



Рис. 3. Расположение сонара возле ВЭУ

Традиционные контактные средства измерения, которыми оснащаются ветроэнергетические станции (рис. 1), располагаются за ветроколесом, что вызывает определенные трудности при интерпретации их показаний [1].

В настоящее время ведутся активные исследования по применению лазерных локаторов (лидаров) для измерения ветра в интересах метеорологического обеспечения ВЭУ [8 – 10]. Однако у оптических средств есть ряд существенных недостатков, ограничивающих их применение [8 – 10]:

- существенное уменьшение дальности действия при ухудшении видимости (дымка, туман, осадки);
- очень узкая диаграмма направленности приводит к необходимости сканирования пространства;
- из-за влияния мелкомасштабной турбулентности результаты измерений необходимо осреднять, что увеличивает время получения данных.

Реальной альтернативой для лидаров могут быть системы радиоакустического зондирования (РАЗ) [11]. Работоспособность аппаратуры РАЗ не снижается при наличии тумана, дымки, осадков. Акустические шумы также не оказывают влияния на ее работоспособность.

Цель статьи. Целью статьи является оценка возможности применения метода и аппаратуры радиоакустического зондирования атмосферы для измерения скорости ветра в интересах метеорологического обеспечения ВЭУ.

Основной материал исследований

Область пространства, в которой необходимо получать данные о ветре

Для ОРР ВЭУ необходимо получать данные об изменении скорости ветра заблаговременно. На рис. 4 показана область пространства, в которой представляется необходимым получать данные о ветре (ОПДВ).

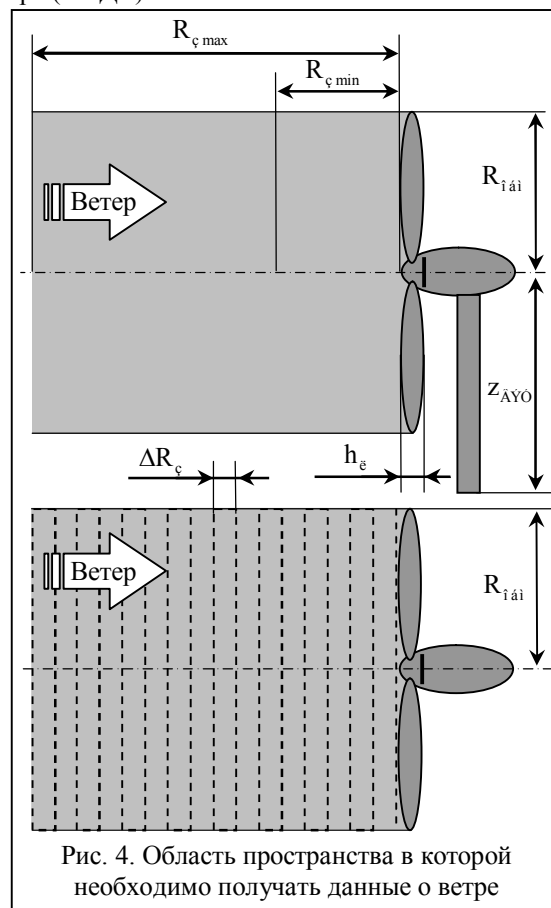


Рис. 4. Область пространства в которой необходимо получать данные о ветре

ОПДВ представляет собой пространственную фигуру близкую к цилиндру. Радиус основания такого цилиндра определяется радиусом обметания ветроколеса $R_{обм}$, а длина образующей определяет минимальную и максимальную дальность зондирования $R_{з min}$ и $R_{з max}$.

Значение $R_{з min}$ и $R_{з max}$ можно найти из следующих соображений:

– информацию необходимо получать в направлении против ветра, скорость которого V лежит в пределах от минимальной $V_{p min}$ до максимальной рабочей скорости $V_{p max}$, т.к. при $V < V_{p min}$ ВЭУ электроэнергию не вырабатывает и ОРР не производится, а при $V > V_{p max}$ речь идет уже не об ОРР, а о защите ВЭУ от повреждения;

– времени от момента получения информации о скорости ветра должно быть достаточно для выра-

ботки управляющего воздействия и окончания переходных процессов в системе автоматического управления (САУ) ВЭУ.

Таким образом, получаем:

$$R_{z \min} = V_{p \min} (t_{\text{изм}} + \tau_{\text{ВЭУ}}), \quad (1)$$

$$R_{z \max} = V_{p \max} (t_{\text{изм}} + \tau_{\text{ВЭУ}}), \quad (2)$$

где $t_{\text{изм}}$ – время получения данных от измерительного устройства о скорости ветра с заданной точностью;

$\tau_{\text{ВЭУ}}$ – время реакции САУ ВЭУ.

Необходимое значение разрешающей способности по дальности ΔR_z найдем из соображения, что ΔR_z должно зависеть от линейных размеров объекта, воспринимающего ветровую нагрузку и подвергающегося управлению (обычно это ветроколесо и лопасти [1, 2, 12]), а также от его реакции на скорость изменения ветра.

Таким образом, получаем:

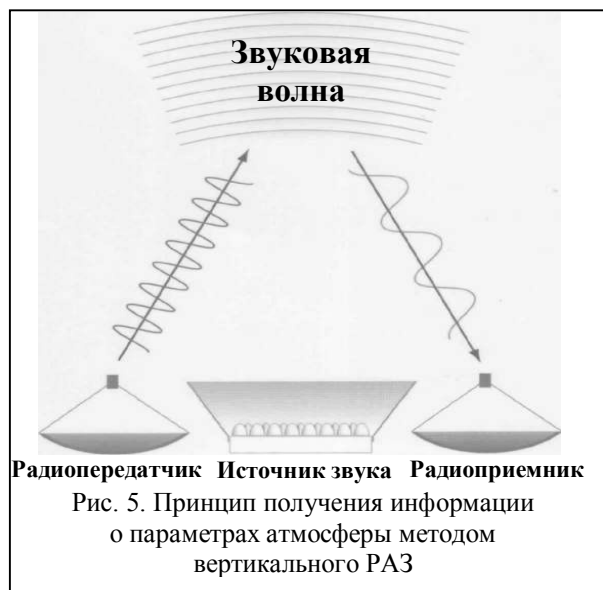
$$\Delta R_z = h_{\text{л}} c_{\text{оср}}, \quad (3)$$

где $h_{\text{л}}$ – ширина лопасти ВЭУ;

$c_{\text{оср}}$ – коэффициент осреднения, учитывающий связь лопастей в ветроколесе и их реакцию на изменение скорости ветра.

Горизонтальное радиоакустическое зондирование

Физически метод РАЗ основывается на радиолокационном "сопровождении" пакета акустических волн (акустического отражателя), распространяющегося в атмосфере [14] (рис. 5).



Частичное отражение радиоволны от акустической возможно в силу того, что звуковая волна, распространяясь в воздухе, модулирует плотность воз-

духа и, следовательно, диэлектрическую проницаемость ϵ_v . Максимальное отражение в обратном направлении наблюдается при выполнении условия Брэгга, т.е. когда длина электромагнитной волны λ_e в два раза больше длины звуковой волны $\lambda_{зв}$. Регистрируя величину доплеровского смещения частоты отраженного сигнала, можно определить скорость распространения звуковой волны, которая, в свою очередь, связана с температурой воздуха [15]. При двухчастотном зондировании по разности амплитуд отраженных сигналов на разных частотах возможно судить о влажности воздуха [16].

Слабым местом вертикального РАЗ является:

- вынос горизонтальным ветром звукового пакета из диаграмм направленности приемной и передающей антенн;

- невыполнение условия Брэгга из-за изменения температуры воздуха с высотой.

Установив систему РАЗ непосредственно на ВЭУ (например, под обтекателем ветроколеса) и сориентировав ее соосно, удастся избавиться от указанных выше недостатков, т.к.:

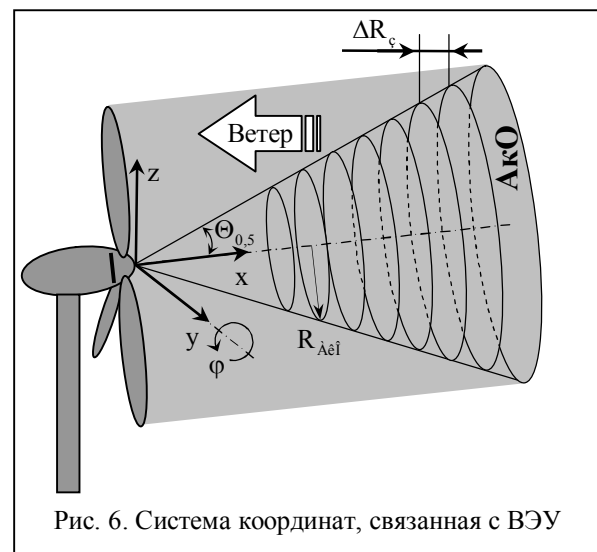
- а) вертикальная составляющая ветра много меньше горизонтальной [17];

- б) горизонтальные градиенты температуры много меньше вертикального [17].

Не рассмотренным остается влияние вертикального градиента скорости ветра на работу системы горизонтального РАЗ (ГРАЗ).

Влияние вертикального градиента горизонтального ветра на работу ГРАЗ

Введем прямоугольную систему координат, связанную с ветроколесом ВЭУ (рис. 6).



Разность скоростей ветра, действующего на акустический отражатель (АкО) в нижней и верхней точке $\Delta V_{\text{АкО}}$, приведет к повороту АкО радиусом

$R_{АКO}(R_3)$ вдоль оси y на угол φ , и, как следствие, выносу фокуса $АКO$ за пределы приемной антенны ГРАЗ.

Упрощенная геометрическая схема для оценки величины смещения фокуса $АКO$ под действием ветра показана на рис. 7.

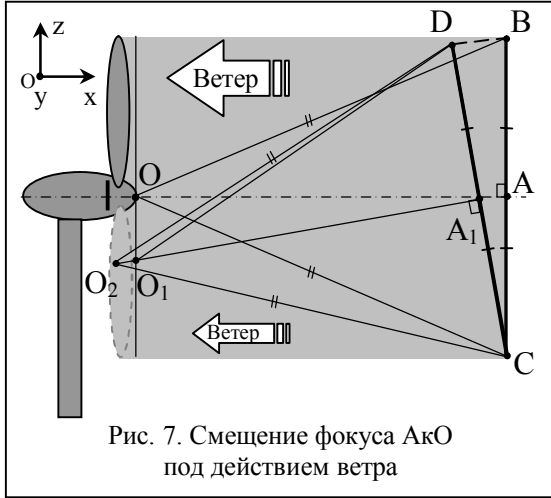


Рис. 7. Смещение фокуса АКO под действием ветра

Приемная антенна ГРАЗ размещена в плоскости uoz . Как видно из геометрических построений, фокус $АКO$ (точка O_2) смещается как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. В результате чего на поверхности антенны образуется "фокальное пятно" с центром в точке O_1 .

Величина смещения верхнего края $АКO$ относительно нижнего DB пропорциональна времени воздействия ветра (времени зондирования t_3) и величине $\Delta V_{АКO}$.

Длину отрезка DB найдем как:

$$DB = \int_0^{t_3 \max} \Delta V_{АКO} dt_3, \quad (4)$$

где $t_3 \max = \frac{R_3 \max}{c_{зв}}$ – время перемещения $АКO$ на дальнюю границу ОПДВ;

$c_{зв}$ – скорость движения $АКO$ (скорость звука).

Величину $\Delta V_{АКO}$ определим как [18, 19]:

$$\Delta V_{АКO} = V_{ВЭУ} \left[\left(\frac{z_{ВЭУ} + R_{АКO}}{z_{ВЭУ}} \right)^\alpha - \left(\frac{z_{ВЭУ} - R_{АКO}}{z_{ВЭУ}} \right)^\alpha \right], \quad (5)$$

где $V_{ВЭУ}$ – скорость ветра, измеренная на уровне оси ветроколеса (рис. 1);

$z_{ВЭУ}$ – высота ВЭУ (рис. 4);

α – показатель степени (в [18] рекомендовано $\alpha=0,2$).

Величину $R_{АКO}$ находим как:

$$R_{АКO} = R_3 \operatorname{tg} \Theta_{0,5}, \quad (6)$$

где $R_3 = c_{зв} t_3$;

$$\Theta_{0,5} = \operatorname{arctg} \left(\frac{R_{обм}}{R_3 \max} \right).$$

Величину смещения фокусного пятна OO_1 не трудно найти из геометрических построений рис. 7. Однако итоговая формула достаточно громоздка и здесь не приводится. Результаты количественного анализа приведены ниже.

Для защиты антенн от действия неблагоприятных внешних факторов их размещают под радиопрозрачными обтекателями. В нашем случае антенну ГРАЗ можно разместить под обтекателем ветроколеса. Оценим реализуемость такого технического решения, для чего найдем числовые значения OO_1 для некоторых современных ВЭУ. В качестве образцов возьмем ВЭУ типа Enercon E101/3000 (как одну из самых крупных и работающих при наибольших скоростях ветра) и ВЭУ-20М (как ВЭУ отечественного производства и одну из распространенных на Украине). Технические характеристики установок и результаты расчетов приведены в табл. 1 [12, 13].

Таблица 1
Характеристики современных ВЭУ

Параметр	Enercon E101/3000	ВЭУ-20М
$V_{p \max}$, м/с	34	25
$z_{ВЭУ}$, м	135	20
$\tau_{ВЭУ}$, с	3	3
$R_{обм}$, м	50,5	6,25
OO_1 , м	0,78	0,34
Радиус обтекателя, м	1,5	0,4

Как следует из табл. 1, радиус обтекателя ветроколеса больше OO_1 и выноса фокусного пятна за пределы антенны ГРАЗ не будет.

Выводы

Из вышеизложенного материала следует:

- перспективным средством измерения скорости ветра для метеорологического обеспечения ВЭУ являются системы горизонтального радиоакустического зондирования;
- под воздействием вертикального градиента горизонтальной скорости ветра происходит наклон акустического отражателя и смещение фокуса;
- вынос фокусного пятна для скоростей ветра, при котором работают современные ВЭУ, незначителен и позволяет размещать антенны систем ГРАЗ под обтекателем ветроколеса.

Список литературы

1. Burton T. *Wind Energy Handbook [Текст] / T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi. – Chichester: John Wiley & Sons, 2001. – 642 p.*
2. Erih Hau. *Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics 2nd edition [Текст] / Erih Hau – Berlin: Springer, 2006. – 791p.*
3. *Remote sensing, turbulence sensing. [Електрон. ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.scintec.com/products.htm>.*
4. *Measuring wind. Know-how for successful wind measurements. [Електрон. ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.ammonit.com/images/stories/download-pdfs/WindInfo/en_ammonit_windinfo_knowhow_2010_a.pdf.*
5. *Model VT-1 at the Fenner Wind Park [Електрон. ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.sodar.com/model_vt-1_at_fenner_new_york.htm.*
6. *Energy from Offshore Wind [Електрон. ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.nrel.gov/wind/pdfs/39450.pdf>.*
7. *Использование радиочастотного спектра в метеорологии: прогнозирование и мониторинг погоды, климата и качества воды: справочник. Изд. 2008 г. Бюро радиосвязи. [Електрон. ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.itu.int/publ/R-HDB-26/publications.aspx?lang=en&media=electronic&parent=R-HDB-26-1996>.*
8. *Lidar for Turbine Control [Електрон. ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.wired.com/images_blogs/wiredscience/2010/03/lidar-for-turbines-nrel-2005.pdf.*
9. *Lidar wind speed measurements from a rotating spinner [Електрон. ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.risoe.dk/Research/sustainable_energy/wind_energy/projects/VEA_wind_scanner/-/media/Risoe_dk/Research/VEA_wind_scanner/Documents/2009_83.ashx.*
10. *LIDAR-based wind turbine control system [Електрон. ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.windmeup.org/2010/03/lidar-based-wind-turbine-control-system.html>.*
11. *Бабкин С.И. Применение радиоакустического метода для количественного анализа ветровых условий в АПС [Текст] / С.И. Бабкин, В.И. Куценко, Ю.Н. Ульянов // Труды всесоюзного семинара по радиометеорологии. – Таллинн, 1982. – С. 330-332.*
12. *Fernando D. Bianchi. Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design. [Текст] / Fernando D. Bianchi, Hernán De Battista, Ricardo J. Mantz. – London: Springer, 2007. – 218 p.*
13. *The Windpower. Wind turbines and windfarms database [Електрон. ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.thewindpower.net/turbines_list.php?tri=2&PHPS ESSID=963c9e586c8913e8916669d7451ccd76.*
14. *Каллистратова М.А. Радиоакустическое зондирование атмосферы [Текст] / М.А. Каллистратова, А.И. Кон. – М.: Наука, 1985. – 197 с.*
15. *Орлов М.Ю. Точность измерения температуры и компонент ветра радиоакустическим методом [Текст] / М.Ю. Орлов, Б.С. Юрчак // Труды института экспериментальной метеорологии. – 1978. – № 9/72. – С. 128-140.*
16. *Орлов М.Ю. О возможности определения влажности в приземном слое атмосферы радиоакустическим способом [Текст] / М.Ю. Орлов, Б.С. Юрчак // Труды института экспериментальной метеорологии. – 1985. – № 38/121. – С. 14-20.*
17. *Решетов В.Д. Изменчивость метеорологических элементов в атмосфере [Текст] / В.Д. Решетов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 215 с.*
18. *Шефтер Я.И. Использование энергии ветра [Текст] Издание второе, переработанное и дополненное / Я.И. Шефтер. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.*
19. *Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружение [Текст] / Г.А. Савицкий. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. – 111 с.*

Поступила в редколлегию 22.12.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ГОРИЗОНТАЛЬНЕ РАДІОАКУСТИЧНЕ ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРУ ДЛЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Ю.М. Ульянов, В.Л. Місайлов, Г.Ю. Мартиненко

Виконаний порівняльний аналіз засобів отримання інформації для метеорологічного забезпечення вітроенергетичних установок (ВЕУ). Показано, що перспективними є системи горизонтального радіоакустичного зондування (ГРАЗ). Визначені параметри області простору, в якій необхідно отримувати дані про вітер. Оцінений вплив вертикального градієнта горизонтальної швидкості вітру на нахил акустичного відбивача і зсув фокусу. Показано, що для швидкостей вітру, при яких працюють сучасні ВЕУ, винесення фокусної плями незначне і дозволяє розміщувати антени систем ГРАЗ під обтічником вітроколеса.

Ключові слова: вітроенергетична установка, горизонтальне радіоакустичне зондування, вітер, акустичний відбивач.

HORIZONTAL RADIO ACOUSTIC SOUNDING SYSTEMS FOR WINDSPEED MEASURING FOR WIND TURBINES

Yu.N. Uliyanov, V.L. Misailov, G.Yu. Martynenko

The comparative analysis of information receipt facilities for the meteorological supply of wind turbines (WT) is executed. It is shown, that horizontal radio acoustical sounding systems (HRASS) are perspective. The parameters of space area in which it is necessary to get information about wind are defined. Influence of vertical gradient of horizontal windspeed is appraised on inclination of acoustic reflector and focus displacement. It is shown, that for speeds of wind which modern WT work at, and the deflection of focal spot is insignificant and allows placing antennas of HRASS under the windwheel cowling.

Keywords: wind turbine, horizontal radio acoustic sounding system, wind, acoustic reflector.