

# ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

## СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ЛОПАТЕЙ

## METHOD FOR DETERMINING ANGULAR MOVEMENTS OF VANE

*Моргун Ю. Б.<sup>1</sup>, ст. викл., Прокопович І. В., д-р техн. наук, проф.,*

*Оборський Г. О., д-р техн. наук, проф., Моргун Б. О., канд. техн. наук, доц.*

*Одеський національний політехнічний університет, кафедра металорізальних верстатів, метрології та сертифікації, Україна; e-mail: i.v.prokorporovich@onu.ua*

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.01.016>

**Анотація.** Висвітлено особливості й специфіку реалізації нового високоточного безконтактного способу ідентифікації положення елементів обертового вітроколеса. У запропонований пристрій входять лазерне джерело з видимим світлом, світловідбивачі, встановлені на елементах лопаті, та світлоприймач для реєстрації відбитих сигналів. Розглянуто приклад оцінювання зміни положень елементів секційних лопатей вітродвигуна нового типу, який розробили і запатентували автори, залежно від швидкості вітру і навантаження на валу вітродвигуна. За цим способом отримано патент України на корисну модель № 123028 (опубл. 2.02.2018. – Бюл. № 3).

**Ключові слова:** кутові переміщення, вітродвигун, світловідбивачі, світлоприймач, лазерне джерело, багатосекційна лопать.

**Annotation.** Article describes the features and specificity of the identification of fast moving objects, mainly vane of wind turbines and helicopter rotors. Methods of non-contact determination of the coordinates of the points of various elements of rotating wind wheel are considered. New method and device for the high-precision determination of the deviations of multi-sectional vane of wind wheel developed elements are proposed. Blade sections are freely mounted on the wheel axle with eccentricity, which allows them to self-align and remain in aerodynamic equilibrium under the influence of wind force, the resistance to rotation from the counter flow of air and the load on the shaft of the windmill. Device for measuring the deflection angles of the vane section as function of external forces includes a laser source of visible light able to move the bunch vertically and to fix it on a tripod and laser reflectors. The last are installed on the sections surfaces, in front of the wheel rotating in the wind tunnel and screen with established measuring scale. It is located behind the laser source at a certain distance from the wheel. Passing the point of encounter with the laser beam, the reflectors guide it to the screen. Value of the beam deflection is proportional to the deflection angle of the vane element. Example of estimating the change in the elements positions for multi-section vane of new type wind turbine is considered depending on the wind speed and the load on the windmill shaft. To determine the accuracy of the proposed method for different angles of wedging of the vane elements the tests are conducted. It is established that the deflection of the laser beam on the screen does not exceed two percent of the calculated value. Increasing the accuracy is possible by growing the distance between the light detector and the rotating wind wheel. The method developed by the authors for measuring the angular positions of quickly rotating vane allows determine the parameters of aerodynamic characteristics promptly and exactly as well as research the promising ways for gaining the power of wind turbines. The method can also be applied for testing helicopter propellers and vane.

**Key words:** Angular displacements, windwheel, reflector, light detector, laser source, multi-section blade.

### Вступ

Безконтактне вимірювання геометричних параметрів лопатей вітроколеса під час їх обертання є однією з важливих технічних задач. Авторі розробили новий тип вітроколеса з адаптивним керуванням формою лопатей [1–3]. Лопаті складаються з окремих секцій, кожна з яких вільно встановлена на маху з ексцентриситетом. Це дає їй змогу амоналаштовуватися й перебувати в стані аеродинамічної рівноваги за дій сили вітру, сили опору обертанню, зустрічного потоку повітря і навантаження на валу вітродвигуна. Проте визначення аеродинамічних характеристик лопаті залежно від швидкості вітру та змінного навантаження на валу вітроколеса потребує вико-

ристання приладу для визначення кутових переміщень лопатей з високою точністю вимірювань, оперативністю та відносною простотою.

### Сучасний стан проблеми. Особливості ідентифікації об'єктів, що швидко рухаються

У літературі відсутні описи способів визначення дійсного положення лопатей у просторі, котрі дають змогу робити висновки про точність виконаних розрахунків і знаходити способи покращання конструкції та методики розрахунку механізму регулювання. Застосування для цього традиційних контактних методів вимірювання параметрів руху з використанням різноманітних давачів істотно ускладнить конструкцію вітродвигуна за

рахунок наявності додаткових мас, комунікацій та реєстраційної апаратури. Оперативне визначення положення будь-якої точки нестабільного елемента вітроколеса, яке швидко обертається, – складне технічне завдання.

Методи і засоби безконтактних вимірювань геометричних параметрів об'єктів, що обертаються, описано у численних публікаціях. Наприклад, у [4–7] викладено детальну характеристику засобів оптичних безконтактних вимірювань геометричних параметрів форми, положення, руху і деформації об'єктів у просторі, основаних на принципах фотограмметрії, коли використовують нанесення на поверхню об'єкта спеціальних маркерів і за отриманими зображеннями визначають координати точок об'єктів. Недоліком цих способів є складність приладів, у яких використовують декілька фотокамер, розташованих під різними кутами, та обчислювальну техніку з відповідним програмним забезпеченням. Крім того, під час швидкоплинних динамічних процесів ускладнюється синхронізація спрацювання декількох камер у момент проходження поверхні з маркерами через фіксовану зону фотографування, що може призвести до значних похибок вимірювань. У роботі [8] описано принцип дії, здійснено аналіз чутливості й визначено похибки лазерно-оптичного методу дослідження траєкторії руху та деформацій лопатей моделей несучих гвинтів у аеродинамічній трубі. За цим методом структура містить оптичну систему для формування двох когерентних пучків світла, що розходяться під кутом. У зоні їх зміщення унаслідок інтерференції виникає просторова періодична структура освітлення поверхні об'єкта, відображення якої сприймає світлоприймач, об'єктів якого з фоточутливим шаром фіксує систему інтерференційних ліній, яка дає інформацію про форму поверхні досліджуваного об'єкта чи його положення у просторі. Задача зводиться до визначення координат точок поверхні лопаті у певній системі координат, яка зв'язана, наприклад, з площиною обертання гвинта. Недоліки цього приладу – необхідність створення вимірвальної бази та знаходження способу порівняння координат точок поверхні з цією базою, складність приладу та довгий термін отримання кінцевого результату. У [9] розглянуто принципи побудови приладу для ідентифікації об'єктів, які швидко рухаються, переважно лопатей несучих гвинтів вертольотів. Прилад містить лазерний випромінювач з видимим променем, світлові відбивачі, які прикріплені до поверхонь лопатей, прилад заглушення бокового та заднього фонів та світлоприймач для реєстрації відхилень лазерного променя, який послідовно складається з фотоприймача для перетворення оптичного сигналу на електричний, підси-

лювача електричного сигналу, блока оброблення інформації та сполученого з ним пристрою для визначення координат лопатей. Основними недоліками цього приладу є складність конструкції, що містить світлоприймач з декількох послідовно сполучених пристроїв, сумарна похибка яких впливає на точність вимірювань, а також малий діапазон вимірювання кутових переміщень лопатей, обмежений розмірами об'єктива фотоприймача оптичних сигналів. Однак автори робіт [8, 9] розглядають запропоновані засоби як перспективні у майбутньому і не наводять конкретних приладів для їх упровадження в практику.

Аналіз відомих публікацій свідчить, що методи контролю положень у просторі об'єктів, що швидко рухаються, не дають змоги повною мірою достовірно оцінити кутові переміщення лопатей залежно від режимів їхньої роботи.

### Мета роботи

Розроблення способу і приладу для його реалізації для визначення кутових переміщень лопатей під час їхнього обертання, який відрізняється простою конструкції та високою точністю вимірювань.

### Спосіб визначення кутових переміщень лопатей і прилад для його застосування

Вітроколеса з багатосекційними адаптивними лопатями змінюють свій інтегральний профіль за найменшої зміни швидкості вітру або корисного навантаження на валу вітродвигуна, а кожна секція лопаті при цьому встановлюється під оптимальним кутом атаки, забезпечуючи тим самим вітродвигунам максимальну робочу потужність (рис. 1). Це дає змогу використовувати їх у широкому діапазоні швидкостей вітру, навіть за низьких, які переважають на території України.

Щоб встановити положення лопаті або її секцій під час обертання вітроколеса, ми розробили простий і надійний спосіб визначення кута відхилення лопаті від площини обертання вітроколеса з використанням джерела лазерного випромінювання [10]. Установка складається з лазерного випромінювача, що має можливість переміщатися по вертикалі й фіксуватися на штативі, розташованому перед вітроколесом, що обертається в аеродинамічній трубі, лазерних відбивачів, прикріплених до поверхонь секцій лопатей по осі маха, екрана з міліметровкою, встановленого за лазерним випромінювачем на певній відстані від обертального вітроколеса (рис. 2, а). Перед початком випробувань кожен секцію встановлюють під нульовим кутом до площини обертання вітроколеса у вертикальному положенні й суміщають лазерний

промінь з відбивачем, роблячи відмітку на екрані. В разі повороту лопаті лазерний промінь зміщується по горизонталі, а у випадку відхилення маха з лопаттю щодо осі вітроколеса промінь відхиляється по вертикалі (рис. 2, б).

Під час обертання колеса в аеродинамічній трубі з встановленою швидкістю секція з відбивачем самовстановлюється на маху під певним кутом і

відбивач, проходячи точку зустрічі з лазерним променем, відображає його на екран, де виникає мерехтлива, а для людського ока постійна, яскрава крапка. Знаючи відстань екрана від відбивача, за відхиленням променя на екрані можна визначити кут відбиття променя, який дорівнює двом кутам відхилення секції лопаті відносно площини обертання вітроколеса.

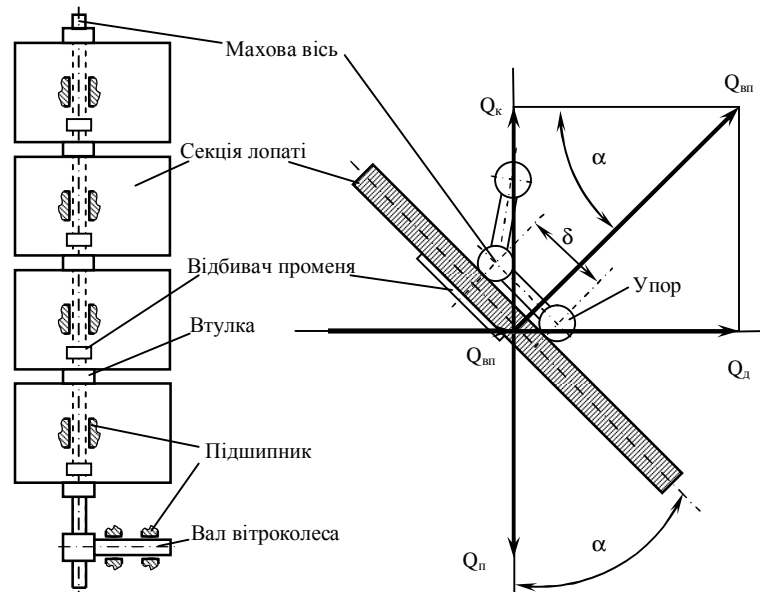


Рис. 1. Вітродвигун (а) та схема самоналаштування секції лопаті (б):  $Q_{вп}$  – сила вітрового потоку;  $Q_к$  – сила обертання;  $Q_п$  – сила опору зустрічного потоку повітря;  $Q_д$  – сила тиску на секцію лопаті;  $\alpha$  – кут самоналаштування секції лопаті;  $d$  – ексцентриситет

Fig. 1. Wind turbine (a) and scheme of self-adjusting section of the vane (b):  $Q_{вп}$  – force of the wind flow;  $Q_к$  – village of rotation;  $Q_п$  – resistance force of the counter air stream;  $Q_д$  – force of pressure on the vane section;  $\alpha$  – self-adjusting angle of the vane section;  $d$  – eccentricity

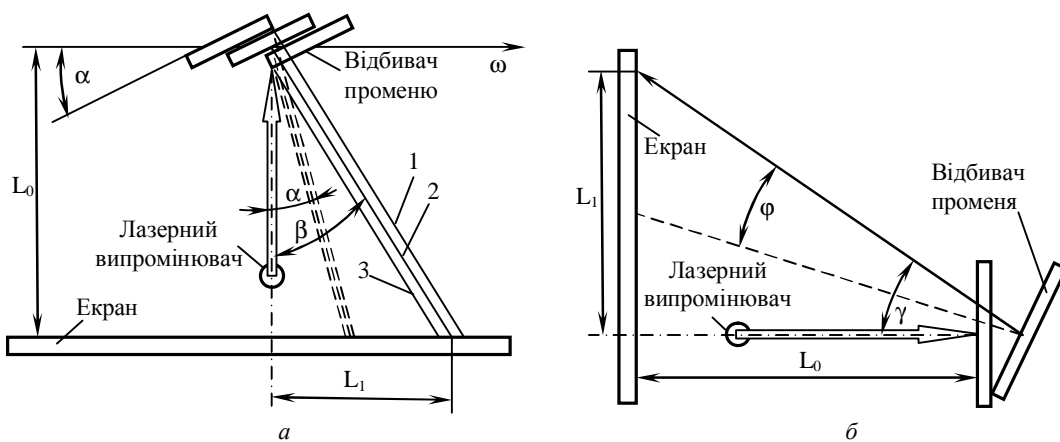


Рис. 2. Схема вимрювань кутів відхилення секції лопаті по горизонталі (а) та вертикалі (б):  $a, j$  – кут відхилення секції лопаті;  $b, g$  – кут відхилення лазерного променя;  $L_0$  – відстань екрана від колеса;  $L_1$  – відхилення лазерного променя; 1, 2, 3 – шлях променя від світловідбивача

Fig. 2. Scheme of measurement of angles of deviation of vane section horizontally (a) and vertical (b):  $a, j$  – angle of deflection of the vane section;  $b, g$  – angle of deviation of the laser beam;  $L_0$  – screen distance from the wheel;  $L_1$  – deviation of the laser beam; 1, 2, 3 – ray path from reflective light

**Результати досліджень положення секції лопаті за різних кутів закріплення**  
**Results of research of position of a section of a vane at different angles of fastening**

№ експерименту	Відхилення лазерного променя $L_1$ за кутів закріплення секції лопаті $\alpha$ , мм			
	5°	10°	15°	20°
1	175	361	580	842
2	170	365	584	840
3	182	358	583	851
4	177	356	572	840
5	172	362	575	842
6	170	370	570	841
7	181	375	586	835
8	184	360	581	832
9	168	357	577	844
10	172	368	575	841
<b>Середнє значення</b>	<b>175</b>	<b>363</b>	<b>578</b>	<b>841</b>

Під час випробування точності приладу секцію лопаті зі світловідбивачем нерухомо закріплювали під фіксованим кутом  $\alpha$  до площини обертання колеса, задаючи обертання колесу –  $5 \text{ s}^{-1}$ . Вмикався лазерний випромінювач і фіксувалось відхилення лазерного променя  $L_1$  від нульової відмітки на екрані з міліметровою шкалою, розташованому на відстані від колеса  $L_0=1 \text{ m}$ . Після десяти випробувань за середнього значення відхилення розраховували кут відхилення променя  $\beta$  і кут закріплення секції лопаті  $\alpha$ :

$$\text{tg } \alpha = \frac{L_1}{2L_0}, \quad (1)$$

$$\text{tg } \beta = \frac{L_1}{L_0}. \quad (2)$$

Оцінювання невизначеності результатів вимірювання виконували згідно з [11]. Стандартну невизначеність вимірювань типу А вхідних величин знаходили за формулою:

$$U_A(X) = \alpha \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (3)$$

де  $n$  – кількість повторних вимірювань;  $S$  – середньоквадратичне відхилення (СКВ) результатів повторних вимірювань,

$$S = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

$\alpha$  – СКВ немасштабованого розподілу Стьюдента,

$$\alpha = \sqrt{\frac{n-1}{n-3}}.$$

Невизначеність результатів вимірювань відхилення променя лазера згідно з результатами обчислень становила  $U_A(X) = 1,889 \text{ мм}$ , що відповідає невизначеності вимірювань кута відхилень лопаті –  $0,114$  кутового градуса.

Під час випробувань в аеродинамічній трубі вітроколеса з чотирма лопатями діаметром  $0,52 \text{ m}$ ,

кожна лопать якого складалася з двох секцій, що самовстановлюються, визначали їхнє положення за різних швидкостей вітрового потоку і величини навантаження на валу вітроколеса. Встановлено відхилення обох секцій лопатей під час обертання колеса під впливом вітрового потоку зі швидкостями від  $2$  до  $8 \text{ m/s}$  у неробочому режимі та під навантаженням. Частота обертання колеса коливалася від  $2$  до  $30 \text{ s}^{-1}$ , кут відхилення секцій – від  $12^\circ$  до  $36^\circ$ , максимальна різниця відхилень між двома лопатями – до  $16^\circ$ , найбільші відхилення викликають навантаження на валу вітрогенератора (рис. 3).

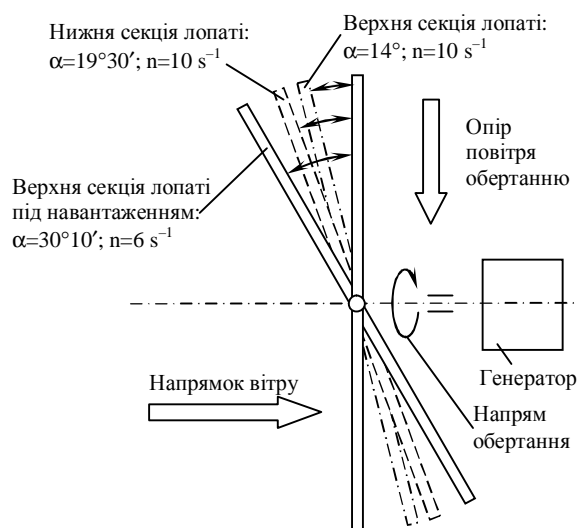


Рис. 3. Схема зміни положення вітроколеса за результатами вимірювань

Fig. 3. Scheme of changing the position of the wind wheel on the results of measurements

**Висновки**

Спосіб вимірювання кутових положень лопатей, що швидко рухаються, який розробили

автори, дає змогу оперативно і з високим рівнем точності визначати параметри його аеродинамічних характеристик і здійснювати пошуки перспективних способів підвищення енергетичних характеристик вітродвигунів. Спосіб також можна використовувати для випробувань авіаційних гвинтів і лопатей гелікоптерів.

### Список літератури

1. Вітродвигун: пат. 112368 Україна. № а 201501365; заявл. 18.02.2015; опубл. 25.08.2016, Бюл. № 16.
2. Оборский Г. А., Моргун Б. А., Бундюк А. Н. Методика конструирования ветроколеса с самонастраиваемой лопастью // *Праці Одеського політехнічного університету*. 2014. Вып. 2(22). С. 143–149.
3. Оборский Г. А., Моргун Б. А., Бундюк А. Н. Разработка ветроколеса с многосекционными самонастраиваемыми лопастями // *Новые и нетрадиционные технологии в ресурс- и энергосбережении: материалы науч.-техн. конф. 22–24 сент. 2014 г.* Одесса, Киев: АТМ України, 2014. С. 124–126.
4. Лобанов А. Н. Фотограмметрия. – М.: Недра, 1984. – 360 с.
5. Способ бесконтактного определения пространственных координат точек объекта: пат. 2173445 Россия. № 2000110174/28; заявл. 24.04.2000; опубл. 10.09.2001.
6. Способ измерения малых деформаций материала конструкций: пат. 2316726 Россия. № 2006129050/28; заявл. 10.08.2006; опубл. 10.02.2008, Бюл. № 4.
7. Предвычисление точности определения координат точки объекта в ближней фотограмметрии / Ю. С. Тюфлин, Д. Г. Степаньянц, В. А. Князь, С. Ю. Жеглов // *Геодезия и картография*. 2004. № 11. С 29–32.
8. Лазерно-оптический метод исследования траектории движения и изгибно-крутильных колебаний лопастей моделей несущих винтов / Д. Д. Грибанов, В. П. Кулеи, А. Н. Мартынов, А. А. Орлов // *Учёные записки ЦАГИ*. 1980. № 6, т. XI. С. 88–96.
9. Устройство для идентификации быстродвижущихся объектов, преимущественно лопастей несущего винта вертолёта: патент РФ № 38950, МПК G01C 11/00, 2004.

10. Прилад для визначення кутових переміщень лопатей: пат. 123028 Україна. № у 201707245; заявл. 10.07.2017; опубл. 12.02.2018, Бюл. № 3.

11. I. Lira W. Woger, *Comparision between the conventional and Bayesian approaches to evaluate measurement data*. *Metrologia* 43 (2006) S. 249.

### References

1. Oborskyi, H. O., Morgun, B. O., & Morgun Iu.B. (2016). *Wind turbine*. *Ukraine Patent: UA 112368*
2. Oborskiy, G. A., Morgun, B. A., & Bundyuk A. N. (2014) *Technique of constructing a wind wheel with a self-tuning blade*. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 2 (22), 143–149.
3. Oborskiy G. A., Morgun, B. A., & Bundyuk A. N. (2014). *Development of windmills with multi-section self-adjusting blades. New and non-traditional technologies in resource and energy saving: materials of scientific and technical conference on September 22–24, Odessa*, (pp. 124–126) Kiev: ATM of Ukraine.
4. Lobanov A. N. (1984). *Photogrammetry*. Moscow: Nedra.
5. Yurchenko V. I. (2000). *The method of non-contact determination of the spatial coordinates of points of an object*. *Russia Patent: RU 2173445*.
6. Zhiltsov O. A., & Bondarenko A. A. (2006). *Method for measuring small deformations in structural materials*. *Russia Patent: RU 2316726*.
7. Tyufin Yu. S., Stepanyantz D. G., Prince V. A., & Zheglov S. Yu. (2004). *Precision of the accuracy of determining the coordinates of the object's point in the near photogrammetry*. *Geodesy and cartography*, 11, 29–32.
8. Griбанov D. D., Kulesh V. P., Martynov A. N., Orlov A. A. (1980). *Laser optical method for studying the trajectory of motion and flexural-torsional vibrations of the rotor blades of rotor models*. *Scientific notes TsAGI, Vol. XI*, 6, 88–96.
9. *Device for identification of fast moving objects, mainly helicopter main rotor blades: Russia Patent RU 38950, G01C 11/00, 2004*.
10. Oborskyi H. O., Morhun B. O., Morhun Iu. B., & Prokopovych I. V. (2018). *Device for determining the angular displacements of blades*. *Ukraine Patent: UA 123028*.
11. I. Lira W. Woger, *Comparision between the conventional and Bayesian approaches to evaluate measurement data*, *Metrologia* 43 (2006) S249.