

# СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ЛОПАТЕЙ

## METHOD FOR DETERMINING ANGULAR MOVEMENTS OF VANE

*Моргун Ю.Б.<sup>1</sup>, ст. викл., Прокопович І.В., д.т.н., проф.,  
Оборський Г.О., д.т.н. проф, Моргун Б.О., к.т.н. доцент*  
кафедра металорізальних верстатів метрології та сертифікації Одеського національного  
політехнічного університету, Україна; e-mail: [i.v.prokopovich@onu.ua](mailto:i.v.prokopovich@onu.ua);

### Анотація

У статті описані особливості і специфіка здійснення нового високоточного безконтактного способу ідентифікації положення елементів обертового вітроколеса. Запропонований пристрій включає лазерне джерело з видимим світлом, світловідбивачі, встановлені на елементах лопаті, і світлоприймач для реєстрації відбитих сигналів. Розглянуто приклад оцінки зміни положень елементів багатосекційних лопатей вітродвигуна нового типу, розробленого і запатентованого авторами, в залежності від швидкості вітру і навантаження на валу вітродвигуна. За даним способом отримано патент України на корисну модель № 123028 (опубл. 2.02.2018. – Бюл. № 3).

### Abstract

Article describes the features and specificity of the identification of fast moving objects, mainly vane of wind turbines and helicopter rotors. Non-contact determination methods of the point coordinates 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 per cent of the computed 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.

### Ключові слова

Кутові переміщення, вітродвигун, світловідбивачі, світлоприймач, лазерне джерело, багатосекційна лопать

### Keywords

Angular Displacements, Wind wheel, Reflector, Light Detector, Laser Source, Multi-Section Blade.

## 1. Вступ

Безконтактне вимірювання геометричних параметрів лопатей вітроколеса в процесі їх обертання є одною з важливих технічних задач. Авторами розроблено новий тип вітроколеса з адаптивним керуванням формою лопатей [1, 2, 3], котрі складаються з окремих секцій, кожна з яких вільно встановлена на маху з ексцентриситетом. Це дозволяє їй самоналаштуватися й перебувати в стані аеродинамічної рівноваги від дій сили вітру, сили опору обертанню, від зустрічного потоку повітря і навантаження на валу вітродвигуна. Між тим, визначення аеродинамічних характеристик лопаті в залежності від швидкості вітру та змінного навантаження на валу вітроколеса потребує використання приладу для визначення кутових переміщень лопатей з високою точністю вимірювань, оперативністю та відносною простотою.

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

В літературі відсутні описи способів визначення дійсного положення лопатей у просторі, котрі дозволяють судити про точність проведених розрахунків і визначати пошук шляхів покращання конструкції і методики розрахунку механізму регулювання. Застосування для цих цілей 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, представляє собою складне технічне завдання.

Опису методів і засобів безконтактних вимірювань геометричних параметрів об'єктів, що обертаються, присвячена значна кількість публікацій. Наприклад, у [4, 5, 6, 7] викладено детальну характеристику засобів оптичних безконтактних вимірювань геометричних параметрів форми, положення, руху і деформації об'єктів в просторі, заснованих 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, в яких використовують декілька фотокамер, розташованих під різними кутами, та обчислювальну техніку з відповідним програмним забезпеченням. Крім того, під час швидкобіжучих динамічних процесів стає складною синхронізація спрацювання декількох камер в момент проходження поверхні з маркерами через фіксовану зону фотографування, що може привести до значних похибок вимірювань. Робота [8] присвячена опису принципу дії, аналізу чутливості і визначенню похибки лазерно-оптичного методу дослідження траєкторії руху та деформацій лопатей моделей несучих гвинтів в аеродинамічній трубі. За цим методом структура містить оптичну систему для формування двох когерентних пучків світла, що розходяться під кутом, і в зоні їх зміщення в наслідок інтерференції виникає просторова періодична структура освітлення поверхні об'єкта, відображення якої сприймається світлоприймачем, об'єктив якого з фоточутливим шаром фіксує систему інтерференційних ліній, яка несе в собі інформацію про форму поверхні об'єкта, що досліджується, чи його положення в просторі. Задача зводиться до визначення координат точок поверхні лопаті у певній системі координат, яка зв'язана, наприклад з площиною обертання гвинта. Недоліками цього приладу є необхідність створення вимірювальної бази та знаходження способу порівняння координат точок поверхні з цією базою, складність приладу та довгий термін отримання кінцевого результату. В [9] розглянуто принципи побудови приладу для ідентифікації об'єктів, які швидко рухаються, переважно лопатей несучих гвинтів вертольотів, що 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 в електричний, підсилювача електричного сигналу, блоку обробки інформації та сполученого з ним пристрою для визначення координат лопатей. Основними недоліками цього приладу є складність конструкції, що містить світлоприймач з декількох послідовно зв'язаних пристроїв, сумарна похибка яких впливає на точність вимірювань, а також малий діапазон вимірювання кутових переміщень лопатей, який обмежений розмірами об'єктива фотоприймача оптичних сигналів. Між тим, автори робіт [8, 9] розглядають засоби, які пропонуються, як перспективні у майбутньому і не наводять конкретних приладів для їх впровадження в практику.

Аналіз відомих публікацій свідчить, що існуючі методи контролю положень в просторі об'єктів, що швидко рухаються, не дозволяють у повній мірі провести достовірну оцінку кутових переміщень лопатей в залежності від режимів їх роботи.

## **3. Мета роботи**

Розробка способу і приладу для його реалізації для визначення кутових переміщень лопатей при їх обертанні, який відрізняється простотою конструкції та високою точністю вимірювань.

## **4. Спосіб визначення кутових переміщень лопатей й прилад для його застосування**

Вітроколеса з багатосекційними адаптивними лопатями змінюють свій інтегральний профіль при найменшій зміні 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 дозволяє їх використовувати у широкому діапазоні швидкостей вітру, включно і при низьких, які переважають на території України.

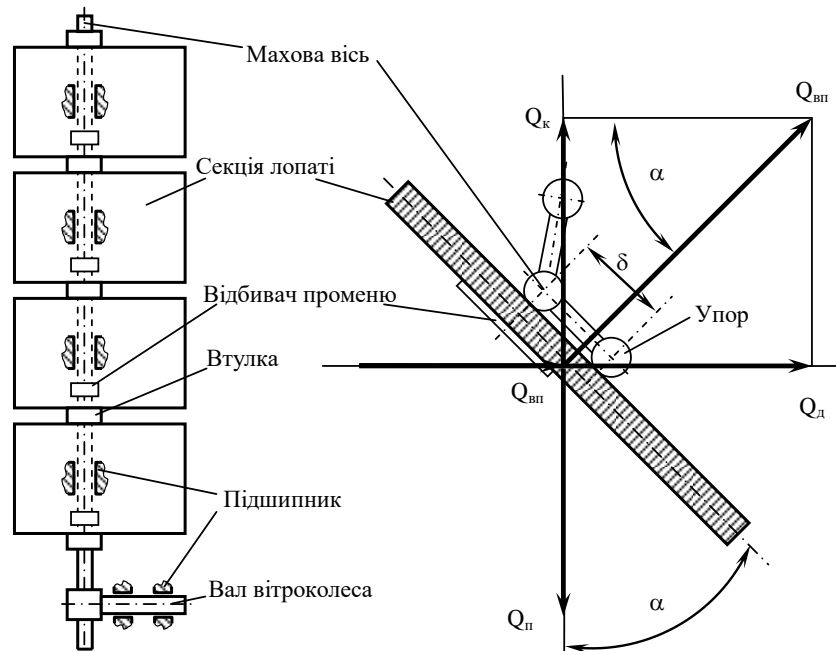


Рис. 1. Вітродвигун (а) та схема самоналаштування секції лопаті (б):  $Q_{вп}$  – сила вітрового потоку;  $Q_k$  – сила обертання;  $Q_{оп}$  – сила опору зустрічного потоку повітря;  $Q_d$  – сила тиску на секцію лопаті;  $\alpha$  – кут самоналаштування секції лопаті;  $\delta$  – ексцентриситет

Figure 1. Wind turbine (a) and scheme of self-adjusting section of the vane (b):  $Q_{вп}$  – force of the wind flow;  $Q_k$  – force of rotation;  $Q_{оп}$  – resistance force of the counter air stream;  $Q_d$  – force of pressure on the vane section;  $\alpha$  – self-adjusting angle of the vane section;  $\delta$  – eccentricity

З метою встановлення положення лопаті або її секцій при обертанні вітроколеса, нами розроблено 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 і фіксуватися на штативі, розташованім перед вітроколесом, що обертається в аеродинамічній трубі, лазерних відбивачів, прикріплених до поверхонь секцій лопатей по осі маха, і екрану з міліметровкою, встановленого за лазерним випромінювачем на певній відстані від обертового вітроколеса (рис 2, а). Перед початком випробувань кожен секцію встановлюють під нульовим кутом до площини обертання вітроколеса у вертикальному положенні і суміщають лазерний промінь з відбивачем, роблячи відмітку на екрані. При повороті лопаті лазерний промінь зміщується по горизонталі, при відхиленні маха з лопаттю щодо осі вітроколеса – промінь відхиляється по вертикалі (рис. 2, б).

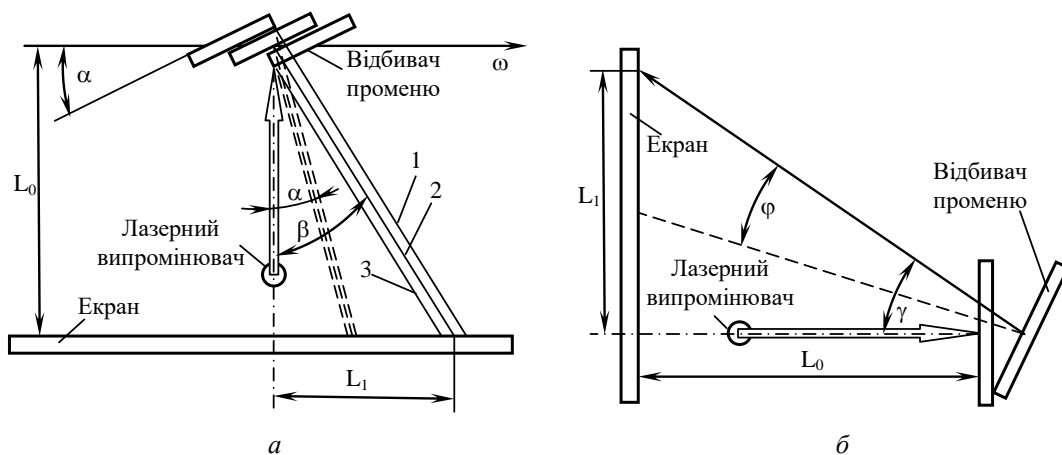


Рис. 2. Схема вимірювань кутів відхилення секції лопаті по горизонталі (а) та вертикалі (б) :  $\alpha, \varphi$  – кут відхилення секції лопаті;  $\beta, \gamma$  – кут відхилення лазерного променя;  $L_0$  – відстань екрану від колеса;  $L_1$  – відхилення лазерного променя; 1, 2, 3 – шлях променя від світловідбивача

Figure 2. Scheme of measurement of angles of deviation of vane section horizontally (a) and vertical (b):  $\alpha, \varphi$  – angle of deflection of the vane section;  $\beta, \gamma$  – 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

При обертанні 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, при цьому виникає мерехтлива, а для людського ока постійна, яскрава крапка. Знаючи відстань екрана від відбивача, за відхиленням променя на екрані можливо визначити кут відбиття променя, який дорівнює двом кутам відхилення секції лопаті відносно площини обертання вітроколеса. При випробуванні точності приладу секція лопаті з світловідбивачем нерухомо закріплювалась під фіксованим кутом  $\alpha$  до площини обертання колеса, задавалось обертання колесу –  $5 \text{ s}^{-1}$ , включався лазерний випромінювач і фіксувалось відхилення лазерного променя  $L_1$  від нульової відмітки на екрані з міліметровою шкалою, який знаходився на відстані від колеса  $L_0=1 \text{ m}$ . Після десяти випробувань по середньому значенню відхилення розраховували кут відхилення променя  $\beta$  і кут закріплення секції лопаті  $\alpha$ :

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

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

Таблиця 1. Результати досліджень положення секції лопаті при різних кутах закріплення  
Table 1. Results of research of position of a section of a vane at different angles of fastening

№ експерименту	Відхилення лазерного променя $L_1$ (mm) при кутах закріплення секції лопаті $\alpha$			
	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>

Оцінювання невизначеності результатів вимірювання виконувалось згідно [11]. Стандартну невизначеність вимірювань типу А вхідних величин знаходили по формулі:

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

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 Стюдента,

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

Невизначеність результатів вимірювань відхилення променя лазера згідно проведених обчислень становила  $U_A(X) = 1,889 \text{ mm}$ , що відповідає невизначеності вимірювань кута відхилення лопаті –  $0,114$  кутових градусів.

При випробуваннях в аеродинамічній трубі вітроколеса з чотирма лопатями діаметром  $0,52 \text{ m}$ , кожна лопать якого складалася з двох секцій, що самовстановлюються, визначалося їхнє положення при різних швидкостях вітрового потоку і величини навантаження на валу вітроколеса. Встановлені відхилення обох секцій лопатей при обертанні 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).

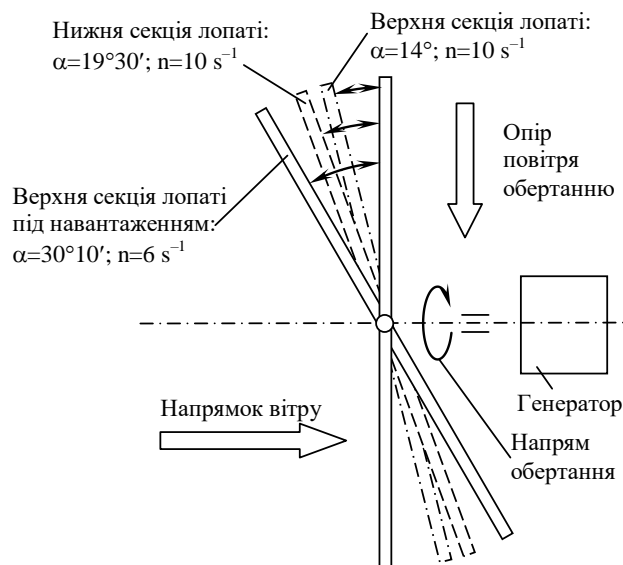


Рис. 3. Схема зміни положення вітроколеса за результатами вимірювань  
 Fig. 3. Scheme of changing the position of the wind wheel on the results of measurements

## 5. Висновки

Розроблений авторами спосіб вимірювання кутових положень лопатей, які швидко рухаються, дозволяє оперативнo і з високим рівнем точності визначити параметри його аеродинамічних характеристик і здійснювати пошуки перспективних шляхів підвищення енергетичних характеристик вітродвигунів. Спосіб також може бути використаний при випробуваннях 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 ветроколес 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. Москва: 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 движение и изгибно-крутильных колебаний лопастей моделей несущих винтов/ Д.Д. Грибанов, В.П. Кулеш, А.Н. Мартынов, А.А. Орлов. Учёные записки ЦАГИ. 1980. № 6, т. XI. С. 88–96.
9. Устройство для идентификации быстро движущихся 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, Comparison between the conventional and Bayesian approaches to evaluate measurement data, Metrologia 43 (2006) S249.

## References

- [1] O. Oborskiy, B. Morgun, Iu. Morgun, “Wind turbine”. Patent UA no.112368. 2016.
- [2] G. Oborskiy, B. Morgun, A. Bundyuk, “Technique of constructing a wind wheel with a self-tuning blade”, in *Proc. Odesa Polytechnic University*, vol.2 (22), p.143–149. 2014.
- [3] G. Oborskiy, B. Morgun, A. Bundyuk, “Development of windmills with multi-section self-adjusting blades”, in *Proc. Sc.-Techn. Conf. “New and non-traditional technologies in resource and energy saving”*, Sept.22–24, Odesa, Ukraine: Kyiv, ATM of Ukraine, 2014, p.124–126.
- [4] A. Lobanov, *Photogrammetry*. Moscow, RF: Nedra, 1984.
- [5] V. Yurchenko, “Method of non-contact determination of the spatial coordinates of points of an object”, Patent RU

no.2173445. 2000.

[6] O. Zhiltsov, A. Bondarenko, “Method for measuring small deformations in structural materials”, Patent RU no.2316726, 2006.

[7] Yu. Tyuflin, D. Stepanyantz, V. Prince, S. Zheglov, “Precision of the accuracy of determining the coordinates of the object's point in the near photogrammetry”, *Geodesy and cartography*, vol.11, p.29–32. 2004.

[8] , D. Gribanov, V. Kulesh, A. Martynov, A. Orlov, “Laser optical method for studying the trajectory of motion and flexural-torsional vibrations of the rotor blades of rotor models”, *Scientific notes TsAGI*, vol.11, no.6, p.88–96, 1980.

[9] Device for identification of fast moving objects, mainly helicopter main rotor blades, Patent RU 38950, G01C 11/00, 2004.

[10] H. Oborskyi, B. Morhun, Iu. Morhun, I. Prokopovych, “Device for determining the angular displacements of blades”, Patent UA no.123028, 2018.

[11] I. Lira, W. Woger, “Comparision between the conventional and Bayesian approaches to evaluate measurement data”, *Metrologia*, vol.43, p.249, 2006.