

УДК 620.91

**О. М. Беньковський**

## **ОДИН З ПІДХОДІВ АЕРОДИНАМІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ДВОЛОПАТЕВОГО РОТОРУ ВІТРОГЕНЕРАТОРА**

### **Вступ**

Зі зростаючим поширенням і використанням вітрогенераторів роторного типу аеродинамічний розрахунок лопатей таких вітрогенераторів постає все більшою проблемою [1]. Головною особливістю розрахунку таких роторів є те, що у його складі присутні декілька лопатей, які зустрічають набігаючий потік під різними кутами атаки [2].

Проблема аеродинамічного розрахунку неодноразово розглядалась різними авторами [3–5]. В їх роботах приділялась увага аеродинамічному розрахунку вітрогенераторів як з горизонтальною [3], так і вертикальною віссю обертання [4]. Для розрахунку були використані чисельні та аналітичні методи.

В той час, коли для роторів з горизонтальною віссю обертання було знайдено методику розрахунку роторів складної конструкції, в публікаціях не розглядався аеродинамічний розрахунок роторів складної форми з вертикальною віссю обертання [3]. В зазначених роботах розглядався розрахунок лише для роторів класичних схем Дар'є [4]. Методика розрахунку роторів вертикальної вісі обертання складної форми необхідна для оцінки ефективності новітніх винаходів у сфері вітроенергетики.

**Ціль роботи** Розробити підхід для аеродинамічного розрахунку дволопатевого ротора вітрогенератора з вертикальною віссю обертання, лопаті якого розташовані довільним чином в межах установки.

### **Аналіз методів аеродинамічного розрахунку**

Лопаті класичного вітрогенератора схеми Дар'є розташовані у межах ротора подібно до розташування крил у біпланній схемі літака [2]. Тому аеродинамічний розрахунок ротора з вертикальною віссю обертання подібний до розрахунку крил у біпланній схемі. Проте, є дві принципові відмінності між цими розрахунками. По-перше, це те, що у біпланній схемі обидва крила однонапрямлені, в той час, як у ротора носки роторів напрямлені у протилежні сторони (рис. 1). По-друге, для аеродинамічного розрахунку ротора необхідно розглянути всі кути атаки, від  $0^\circ$  до  $360^\circ$  [2].

В аеродинаміці дозвукових швидкостей для аеродинамічного розрахунку біпланних схем використовують такі методи, як: метод Бетца, метод Прандтля, графоаналітичний метод Козлова, спрощений метод Прандтля [5]. З перелічених методів, лише метод Бетца пристосований до розрахунку біпланної схеми крил складної геометрії. Проте метод Бетца не враховує різнонапрямленість лопатей ротора.

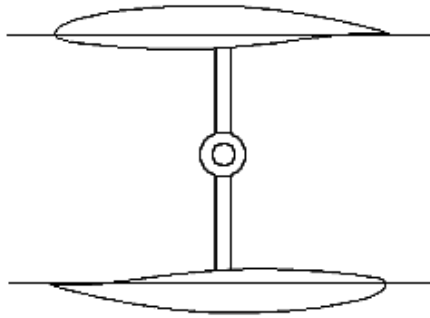


Рис. 1. Різноюнаправленість лопатей ротора вітрогенератора

### Дослідження взаємовпливу лопатей

Для того щоб врахувати різноюнаправленість лопатей, було вирішено використовувати для розрахунку графіки  $C_y(\alpha)$  для лопатей вітрогенератора на кутах атаки  $0^\circ$  для першої розглядуваної лопаті та  $180^\circ$  для другої лопаті замість графіків  $C_y(\alpha)$  крил біпланної схеми. Розрахункові формули скосу потоку і зміни горизонтальної швидкості за методом Бетца в такому випадку представляються таким чином [5]:

$$\Delta\alpha_{12} = \varepsilon_{12} \frac{C_{yII} b_2}{4\pi l_1} \cdot \frac{W_2}{W_1}, \quad (1)$$

$$\Delta\alpha_{21} = \varepsilon_{21} \frac{C_{yI} b_1}{4\pi l_2} \cdot \frac{W_1}{W_2}, \quad (2)$$

$$\Delta V_{12} = \mu_{12} \frac{C_{yII} b_2 W_2}{4\pi l_1} = \frac{\mu_{12}}{\varepsilon_{12}} W_1 \Delta\alpha_{12}, \quad (3)$$

$$\Delta V_{21} = \mu_{21} \frac{C_{yI} b_1 W_1}{4\pi l_2} = \frac{\mu_{21}}{\varepsilon_{21}} W_2 \Delta\alpha_{21}, \quad (4)$$

де  $C_{yI}$  та  $C_{yII}$  — коефіцієнти підйомної сили, віднесені до відносної швидкості потоку  $W_1$  и  $W_2$  (з урахуванням місцевих скосів від взаємної індукції крил); індекси (1) і (2) відповідають величинам „верхньої” та „нижньої” лопаті, відповідно. Індексом (12) відзначені величини, що відносяться до верхньої лопаті в присутності нижньої і навпаки. А  $\varepsilon$  та  $\mu$  — коефіцієнти взаємного впливу, залежні від геометричних розмірів ротора [2].

**Розділ 2. М е х а н і к а**

Швидкості  $W_1$  і  $W_2$  можна представити таким чином:  $W_1 = V + \Delta V_{12}$ ,  $W_2 = V + \Delta V_{21}$ . Тоді, підставляючи формули (3) і (4) відповідно у формули (1) та (2), отримуємо величини  $\Delta\alpha_{12}$  і  $\Delta\alpha_{21}$  у такому вигляді [5]:

$$\Delta\alpha_{12} = \varepsilon_{12} \frac{C_{yII} b_2}{4\pi l_1} \cdot \frac{V + \Delta V_{21}}{V + \Delta V_{12}} \approx \varepsilon_{12} \frac{C_{yII} b_2}{4\pi l_1} \cdot \frac{1 + \mu_{21} / \varepsilon_{21} \Delta\alpha_{21}}{1 + \mu_{12} / \varepsilon_{12} \Delta\alpha_{12}}, \quad (5)$$

$$\Delta\alpha_{21} = \varepsilon_{21} \frac{C_{yII} b_1}{4\pi l_2} \cdot \frac{V + \Delta V_{12}}{V + \Delta V_{21}} \approx \varepsilon_{21} \frac{C_{yII} b_1}{4\pi l_2} \cdot \frac{1 + \mu_{12} / \varepsilon_{12} \Delta\alpha_{12}}{1 + \mu_{21} / \varepsilon_{21} \Delta\alpha_{21}}. \quad (6)$$

Так як  $\frac{\mu_{21}}{\varepsilon_{21}} \Delta\alpha_{21}$  та  $\frac{\mu_{12}}{\varepsilon_{12}} \Delta\alpha_{12}$  набагато менші за одиницю, то з формули

(5)  $\Delta\alpha_{12}$  можна представити у вигляді [5]:

$$\Delta\alpha_{12} = \varepsilon_{12} \frac{C_{yII} b_2}{4\pi l_1} \left( 1 + \frac{\mu_{21}}{\varepsilon_{21}} \Delta\alpha_{21} - \frac{\mu_{12}}{\varepsilon_{12}} \Delta\alpha_{12} \right),$$

або

$$\Delta\alpha_{12} = \frac{1 + A_2 \Delta\alpha_{21}}{B_1 / C_{yII} + A_1}, \quad (7)$$

і аналогічно з формули (6):

$$\Delta\alpha_{21} = \frac{1 + A_1 \Delta\alpha_{12}}{B_2 / C_{yI} + A_2}. \quad (8)$$

де  $A_1 = \frac{\mu_{12}}{\varepsilon_{12}}$ ,  $A_2 = \frac{\mu_{21}}{\varepsilon_{21}}$  і  $B_1 = \frac{4\pi l_1}{\varepsilon_{12} b_2}$ ,  $B_2 = \frac{4\pi l_2}{\varepsilon_{21} b_1}$ .

Кути атаки лопатей з урахуванням скошу потоку від взаємного впливу можуть бути обчислені за формулами [5]:

$$\alpha_{12} = \alpha_1 - \Delta\alpha_{12}, \quad \alpha_{21} = \alpha_2 - \Delta\alpha_{21}.$$

За  $\alpha_{12}$  та  $\alpha_{21}$  з поляр лопатей, як монопланів, можна визначити коефіцієнти  $C_{yI}$ ,  $C_{xI}$ ,  $C_{yII}$ , та  $C_{xII}$ .

Аеродинамічні характеристики верхньої лопаті, віднесені до швидкості незбуреного потоку, зважаючи на формули (7) та (8), після деяких спрощень можуть бути представлені в наступному вигляді [5]:

$$C_{yI} = C_{yI} (1 + 2A_1 \Delta\alpha_{12}), \quad (9)$$

$$C_{xI} = C_{xI} (1 + 2A_1 \Delta\alpha_{12}), \quad (10)$$

$$C_{m1} = C_{m1}(1 + 2A_1\Delta\alpha_{12}). \quad (11)$$

До виправленого на швидкість  $\Delta V_{12}$  коефіцієнту  $C_{x1}$  потрібно додати додатковий індуктивний опір від взаємоіндукції  $C_{x12} = C_{y1}\Delta\alpha_{12}$ , тоді:

$$C_{x12} = C_{x1} + C_{y1}\Delta\alpha_{12}. \quad (12)$$

Підставляючи формули (7), (8), (9), (10) у формулу (12), отримуємо:

$$C_{x12} = C_{x1} \left(1 + 2A_1 \frac{1 + A_2\Delta\alpha_{21}}{B_1 / C_{y11} + A_1}\right) + C_{y1} \left(1 + 2A_1 \frac{1 + A_2\Delta\alpha_{21}}{B_1 / C_{y11} + A_1}\right) \cdot \frac{1 + A_2\Delta\alpha_{21}}{B_1 / C_{y11} + A_1}$$

Для нижньої лопаті розрахунки аналогічні.

### Порядок проведення розрахунку для роторів зі складною геометрією

А. Для заданого кута атаки по кресленню визначаються аеродинамічний винос  $a$  (додатний, коли „нижня” лопать віднесена назад) і аеродинамічна висота коробки  $h$  (рис. 2).

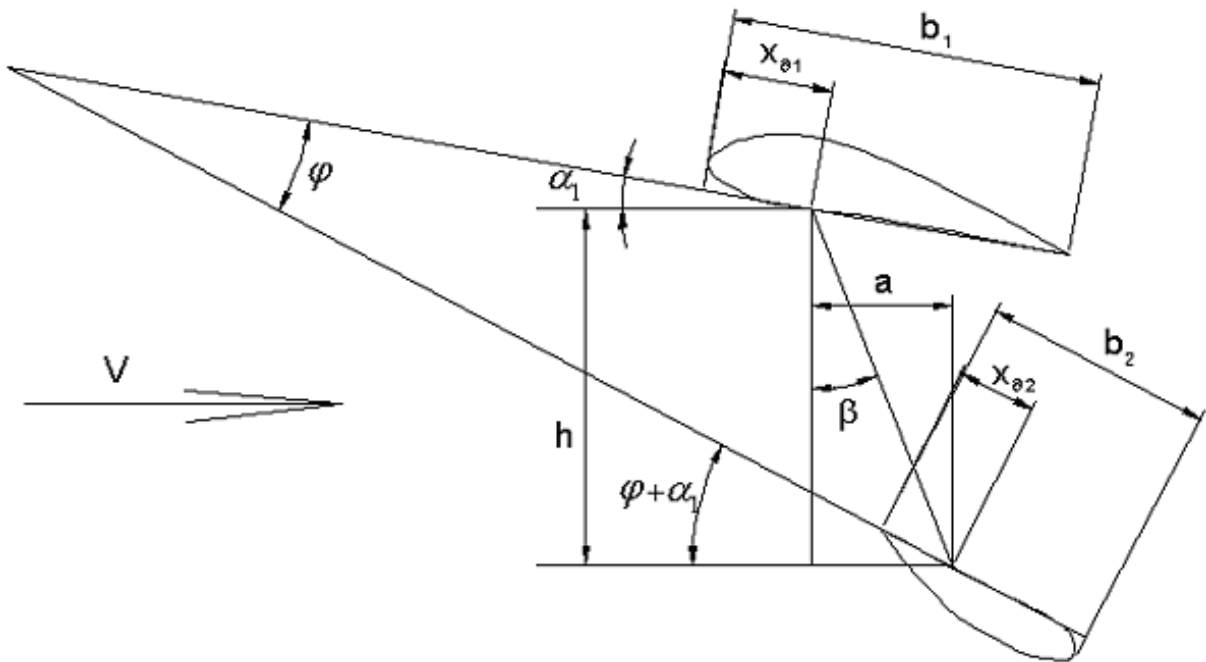


Рис. 2. Геометрія ротора вітрогенератора

В. Розраховуються коефіцієнти взаємного впливу за формулами Бетца [5]:

$$\varepsilon_{12} = \ln \frac{R_1 + a}{R_2 + a} - \frac{a}{a^2 h^2} (R_1 - R_2), \quad (13)$$

$$\varepsilon_{21} = \ln \frac{R_1 - a}{R_2 - a} + \frac{a}{a^2 + h^2} (R_1 - R_2), \quad (14)$$

$$\mu_{12} = -\mu_{21} = \frac{h}{a^2 + h^2} (R_1 - R_2), \quad (15)$$

де  $R_1 = \sqrt{a^2 + l^2 + h^2}$  та  $R_2 = \sqrt{a^2 + c^2 + h^2}$ ,

$l = \frac{l_1 + l_2}{2}$  — середній розмах ротору,

$c = \frac{l_1 - l_2}{2}$  — звис верхньої лопаті над нижньою.

С. За попередньо обчисленими з формул (13)-(15) величинами визначаються допоміжні величини [5]:

$$A_1 = \mu_{12} / \varepsilon_{12}, \quad A_2 = \mu_{21} / \varepsilon_{21}, \quad (16)$$

$$B_1 = 4\pi l_1 / \varepsilon_{12} b_2, \quad B_2 = 4\pi l_2 / \varepsilon_{21} b_1. \quad (17)$$

Д. Для визначення  $C_{yI}$ ,  $C_{yII}$ ,  $\Delta\alpha_{12}$  та  $\Delta\alpha_{21}$ , підставляючи значення з формул (16), (17), вирішуються спільно методом послідовних наближень два аналітичних рівняння [5]:

$$\Delta\alpha_{12} = \frac{1 + A_2 \Delta\alpha_{21}}{B_1 / C_{yII} + A_1}, \quad \Delta\alpha_{21} = \frac{1 + A_1 \Delta\alpha_{12}}{B_2 / C_{yI} + A_2},$$

а також два графічних рівняння з графіків коефіцієнтів аеродинамічних сил лопатей(рис. 3):  $C_{yI} = f_1(\Delta\alpha_{12})$ ,  $C_{yII} = f_2(\Delta\alpha_{21})$ .

Для цього, задавшись кутом скосу  $\Delta\alpha_{21}$  у верхньої лопаті та обчисливши  $\alpha_{12} = \alpha_1 - \Delta\alpha_{12}$  і  $\alpha_{21} = \alpha_2 - \Delta\alpha_{21}$ , визначається перше наближення  $C_{yI}$  і  $C_{yII}$  з графіків  $C_y(\alpha)$  для лопатей вітрогенератора(рис. 3) на кутах атаки  $0^\circ$  для першої розглядуваної лопаті та  $180^\circ$  для другої лопаті. Величини  $\Delta\alpha_{12}$  та  $\Delta\alpha_{21}$  обчислюються за формулами (7) і (8).

Е. Обчислюються коефіцієнти  $C_{y1}$ ,  $C_{x1}$ ,  $C_{y12}$  і аналогічно  $C_{y2}$ ,  $C_{x2}$ ,  $C_{y21}$ , віднесенні до швидкості незбуреного потоку.

Ф. За правилом змішання визначаються сумарні коефіцієнти  $C_y$  та  $C_x$  ротора за формулами [5]:

$$C_y = \frac{C_{y1} S_1 + C_{y2} S_2}{S_1 + S_2}, \quad C_x = \frac{C_{x12} S_1 + C_{x21} S_2}{S_1 + S_2}.$$

Г. Сумарний момент ротора визначається безпосередньо щодо заданого центру ваги (рис. 4).

## Розділ 2. М е х а н і к а

Він обчислюється як сума  $M = M_1 + M_2$ , яку одержують з формул [5]:

$$qS_1b_1(C_{m1} - C_{y1} \frac{x_1}{b_1} - C_{x1} \frac{y_1}{b_1}), \quad (18)$$

$$qS_2b_2(C_{m2} - C_{y12} \frac{x_2}{b_2} - C_{x12} \frac{y_2}{b_2}). \quad (19)$$

Для отримання коефіцієнта моменту ротора ділять, як правило,  $M$  на загальну площу  $S = S_1 + S_2$  та на хорду верхньої лопаті. Підставляючи фо-

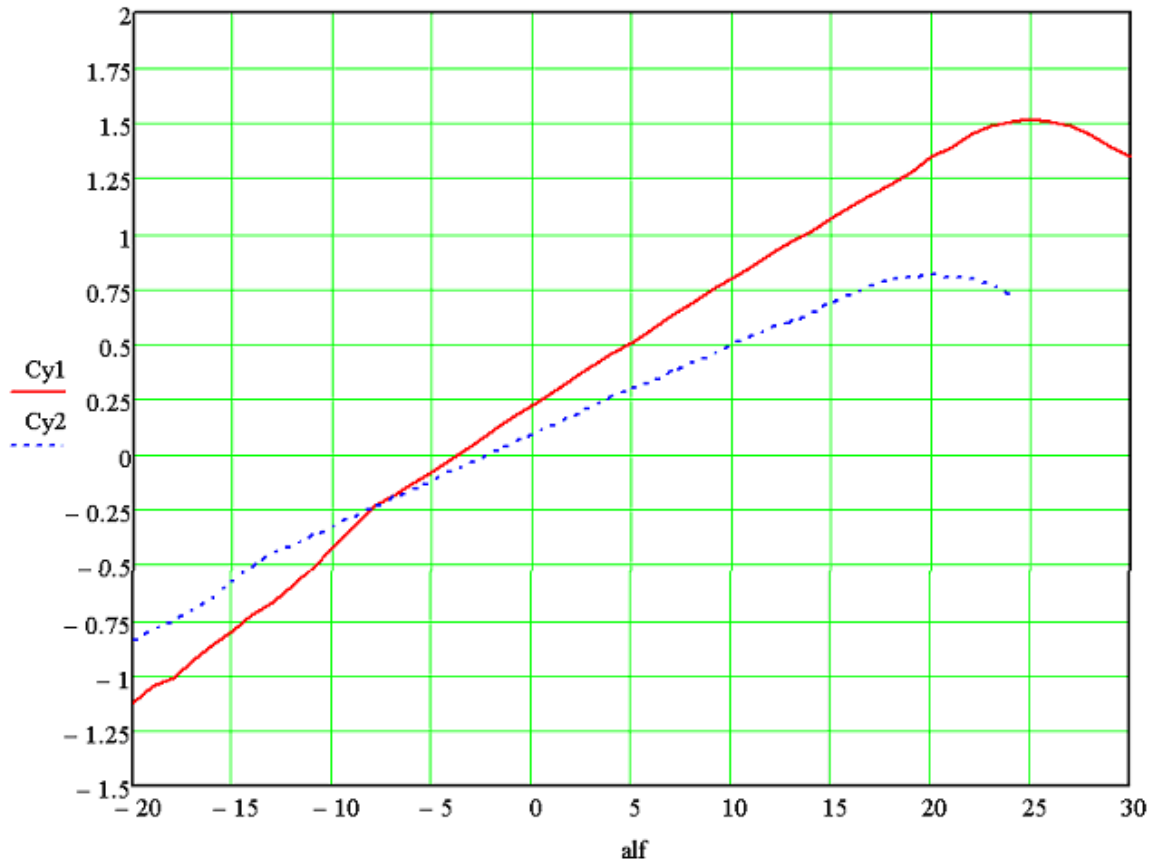


Рис. 3. Коефіцієнти підйомної сили лопатей ротора

рмули (18), (19) у вираз  $C_m = \frac{M_1 + M_2}{S_1 + S_2}$ , отримуємо:

$$C_m = \frac{M}{qSb_1} = \frac{S_1}{S} (C_{m1} - C_{y1} \frac{x_1}{b_1} - C_{x1} \frac{y_1}{b_1}) + \frac{S_2b_2}{Sb_1} (C_{m2} - C_{y12} \frac{x_2}{b_2} - C_{x12} \frac{y_2}{b_2}).$$

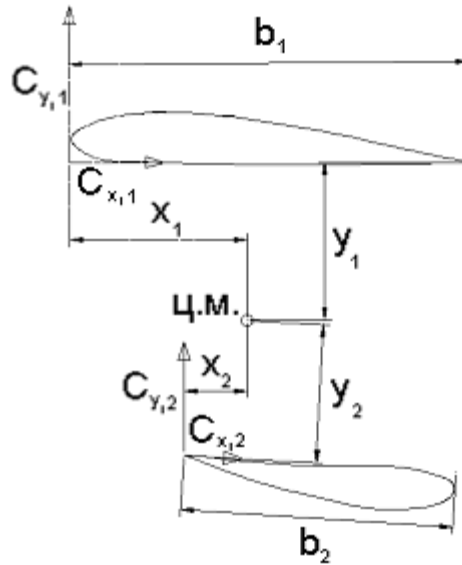


Рис. 4. Положення центра мас ротора

### Висновок

Запропоновано підхід, за допомогою якого визначаються коефіцієнти опору та підйомної сили для кожної з лопатей, а також коефіцієнт обертового моменту ротора. Даний підхід дозволяє проводити аеродинамічний розрахунок дволопатевого роторів з установчими кутами, різним профілюванням та різними габаритами і виносом лопатей.

У разі необхідності отриманий підхід може бути використаний при аеродинамічному розрахунку модифікованих дволопатевого роторів з вертикальною віссю обертання, що мають значні ускладнення у конструкції або додаткові пристрої, які можуть впливати на аеродинаміку лопатей. У таких випадках рекомендується застосовувати отриманий підхід у якості засобу для отримання першого наближення до шуканого результату аеродинамічного розрахунку, або у якості основи для розробки методики, яка б задовольняла новим вимогам розрахунку.

### Список використаної літератури

1. *Нефедова Л. В.* Состояние, проблемы и перспективы развития мировой ветроэнергетики // Возобновляемые источники энергии: лекции ведущих специалистов. - М.: Географ. фак-т МГУ, 2002. - С.283-297.
2. Ветроэнергетика / Под. ред. Д. де Реизо: Пер. с англ.; под ред. Я. И. Шефтера.-М.: Энергоатомиздат, 1982. - 272 с
3. *Кураев А. А.* Основы теории и аэродинамический расчет ветроколеса: учеб.-метод. пособие. - Новосибирск: НГТУ, 2008. - 36 с.
4. Методика расчета магнитоэлектрического синхронного ветрогенератора / Сергеев В.Д. и др. // Тр. ДВГТУ. - 2000. - Вып.127. - С181-185.

5. *Петров К. П.* Аэродинамика элементов летательных аппаратов -М.: Машиностроение, 1985. - 272с.