

УДК 621.548

**В.М.Головко**, докт.техн.наук, **В.П.Коханевич**, канд.техн.наук, **М.О.Шихайлов** (Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, Київ), **Т.В.Зінченко** (Національний технічний університет України "КПІ", Київ)

## Аналіз характеристик параметрів лопаті ротора автономної вітроенергетичної установки

*В роботі проведено порівняльний аналіз характеристик профілів для лопатей вітроенергетичних установок та наведено методичні вказівки щодо їх вибору при проектуванні автономних вітроенергетичних установок малої потужності.*

*В работе проведен сравнительный анализ характеристик профилей для лопастей ветроэнергетических установок и приведены методические указания относительно их выбора при проектировании автономных ветроэнергетических установок малой мощности.*

Розвиток вітроенергетики потребує постійного вдосконалення конструкцій установок та методів їх розрахунку. Сучасні автономні вітроустановки (АВУ) являють собою взаємопов'язаний комплекс вузлів та механізмів, що вимагає узгодження їх параметрів і характеристик для ефективної та надійної роботи установки в цілому.

Головним вузлом, з якого починається проектування вітроустановки і який визначає ефективність роботи АВУ в цілому, є ротор, тому визначення його параметрів та характеристики складає одну з головних задач у подальшому проектуванні установки.

Роботи Жуковського М.Є., Бетца А., Юр'єва Б.М., Сабініна Г.Х. та інших учених дозволили сформулювати теорію ротора, яка була адаптована та удосконалена Г.Х.Сабініним для роторів вітроустановок. Розроблена цілісна методика розрахунку геометричних розмірів ротора та його аеромеханічних характеристик. У цій методиці розробнику пропонується самостійно вибрати аеродинамічний профіль для лопаті.

На сьогодні кількість видів аеродинамічних профілів оцінюється в межах тисячі, що ускладнює на практиці їх вибір. Така ситуація викликає необхідність розроблення певних системних підходів при виборі необхідного аеродинамічного профілю.

Як правило, основними вимогами при виборі профілю є вимоги до аеродинаміки, а потім уже вимоги до міцності лопаті, конструктивні і технологічні особливості при проектуванні та виготовленні лопаті. У зв'язку з цим вся гамма профілів

була згрупована за трьома основними критеріями:

- аеродинамічними;
- геометричними;
- технологічними.

Аеродинамічні характеристики профілів прийнято розглядати, в основному, в двох формах: у вигляді характеристик профілю від кута атаки  $\alpha$  та у вигляді поляри Лієнталя. Для аналізу використовувались профілі, характеристики яких отримані продувкою в аеродинамічних трубах [1, 2].

Однією з основних характеристик аеродинамічного профілю є залежність коефіцієнта підйомної сили  $C_y$  від кута  $\alpha$  (рис. 1). Використовуючи  $C_y$ , лопаті можна згрупувати за наступними критеріями:

- максимальна величина  $C_y$ ;
- величина зміни  $C_y$  в залежності від кута атаки  $\alpha \left( \frac{dC_y}{d\alpha} \right)$ ;
- величина  $C_y$  при  $\alpha = 0$ .

Наступною характеристикою, яка використовується в розрахунках роторів вітроустановок, є коефіцієнт оберненої якості  $\mu$ , що пов'язує коефіцієнт лобового опору  $C_x$  з коефіцієнтом підйомної сили  $\left( \mu = \frac{C_x}{C_y} \right)$  (рис. 2). В залежності від характеристик  $\mu$  профілі можна розбити на дві основні групи:

- за мінімальною величиною значення  $\mu$ ;
- за формою кривої  $\mu$ .

До основних геометричних параметрів профілю лопаті відносяться:

- хорда профілю лопаті;
- відносна товщина профілю;
- форма профілю.

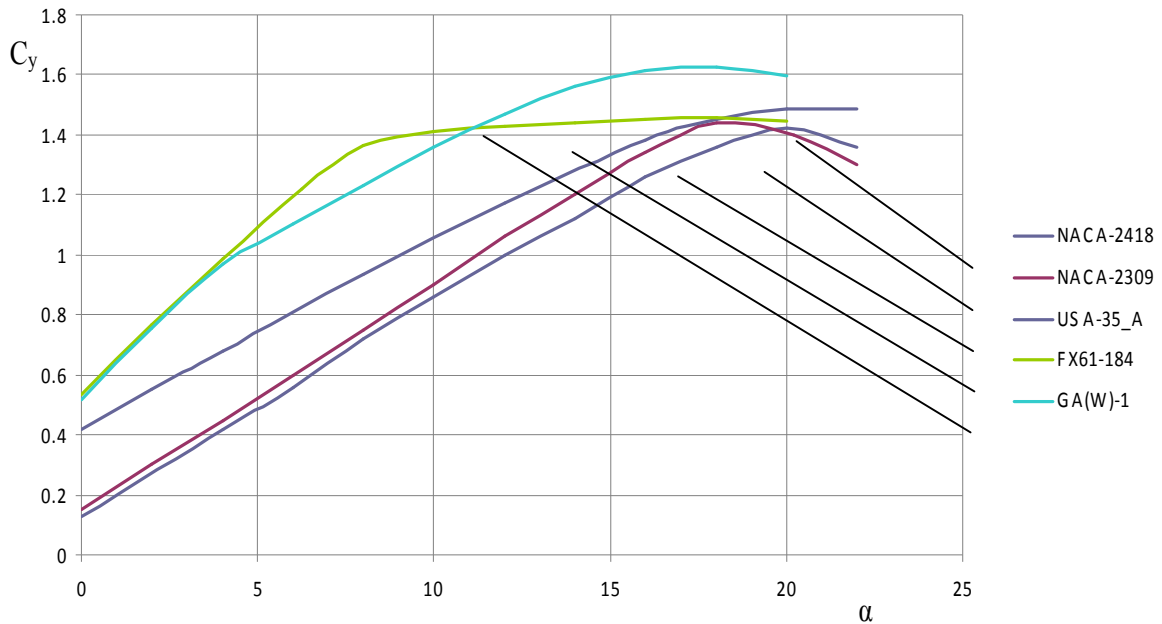


Рис. 1. Залежність коефіцієнта підйомної сили від кута атаки.

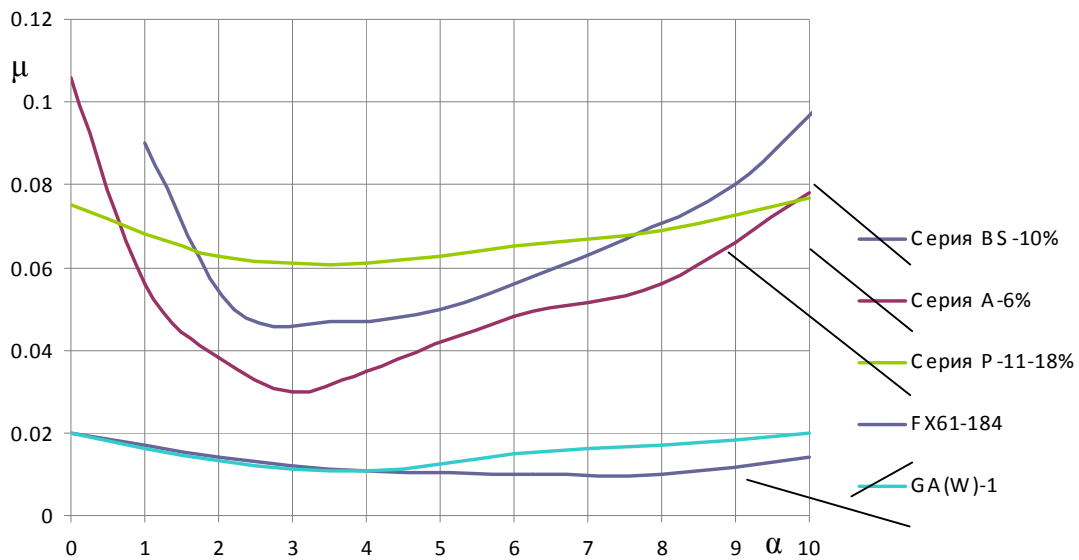


Рис. 2. Залежність коефіцієнта оберненої якості від кута атаки.

Величина хорди профілю лопаті впливає на число Рейнольдса, яке пов'язує розміри профілю зі швидкістю повітряного потоку. Число Рейнольдса, в свою чергу, впливає на аеродинамічні характеристики відповідного профілю. Вітроустановки автономних систем мають відносно малі значення хорди профілю, і при невеликих швидкостях вітру можуть попадати в зону критичних чисел Рейнольдса, що потрібно враховувати при розрахунку аеромеханічних характеристик роторів.

Відносна товщина профілю  $\bar{C}$  також впливає на аеродинамічні характеристики профілю. Для більшості відомих профілів при збільшенні

відносної товщини до значення 12%  $C_{y \max}$  зростає. Подальше збільшення товщини профілю не робить істотного впливу на його максимальну величину. У відповідності до відносної величини товщини профілю останні підрозділяються на:

- $\bar{C} = 25-12\%$  – товсті профілі;
- $\bar{C} = 12-8\%$  – середні профілі;
- $\bar{C} < 8\%$  – тонкі профілі.

У відповідності до форми профілю вони підрозділяються на [1]:

- симетричний (рис. 3а);
- подвійно-випуклий (рис. 3б);

- увігнуто-випуклий (рис. 3в);
- плоско-випуклий (рис. 3г);
- S-подібний (рис. 3д);
- суперкритичний (рис. 3е).

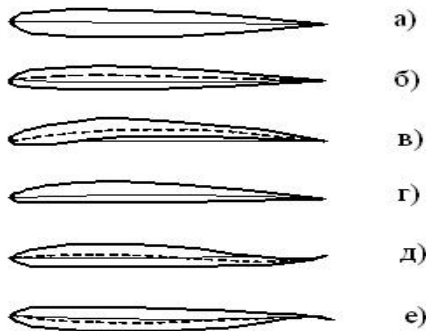


Рис. 3. Форми профілів лопаті ротора вітроустановки.

Надзвукові та плоскі профілі не включались у класифікацію, оскільки вони не знайшли використання у вітроенергетиці. З наведених форм профілів найбільше розповсюдження отримали симетричний, подвійно-випуклий, увігнуто-випуклий та плоско-випуклий.

Технологічні фактори тісно пов'язані з геометричними і включають:

- вимоги до шорсткості поверхні профілю;
- вимоги до точності виготовлення профілю.

Експериментально встановлено, що шорсткість поверхні, особливо поблизу передньої кромки, сильно впливає на несучі властивості профілю. Величина  $C_{y \max}$  помітно зменшується зі збільшенням шорсткості поверхні. Для профілю з шорсткою передньою кромкою  $C_{y \max}$  повільно збільшується із зростанням числа  $Re$ . У той же час шорсткість поверхні, що розташована за положенням максимальної товщини профілю, мало впливає на його несучі властивості і величину  $C_y$ .

Шорсткість поверхні профілю при відносних товщинах більше 18% призводить до зменшення  $dC_y/d\alpha$ , а для профілів з меншою відносною товщиною вплив шорсткості значно слабкіший.

В залежності від вимог до шорсткості поверхні профілю і точності його виготовлення профілі можна поділити на такі основні групи:

- профілі з невисокими вимогами до шорсткості поверхні та точності його виготовлення (класичні профілі, розроблені в 30-і роки минулого століття: Р-II, Р-III, ЦАГИ-846 та ін.);

- профілі з відносно невисокими вимогами до шорсткості поверхні та високими вимогами до точності профілю (NACA 230, NACA 430, GA(W)-1);

- профілі з високими вимогами до шорсткості поверхні та до точності виготовлення профілю (ламінізовані профілі серії FX).

Для проведення порівняння з використанням методики, що наведена в [3], необхідно провести повний розрахунок геометричних розмірів ротора та його аеромеханічних характеристик для кожного профілю, але це потребує виконання значного об'єму розрахунків. Крім цього, на стадії проектування стоїть задача узгодження параметрів та характеристик вузлів і механізмів установки. Розглянемо ланцюг складників, що утворюють основний перетворювач кінетичної енергії повітряного потоку в електричну. В сучасних ВЕУ малої потужності в основному використовуються два варіанти:

- ротор – мультиплікатор – генератор;
- ротор – генератор малої потужності.

У першому випадку конструктор має більш широкі можливості при проектуванні ВЕУ, оскільки мультиплікатор дозволяє узгодити режими роботи ротора та генератора [4]; в другому випадку, в основному, генератор проектується з урахуванням параметрів ротора. Як у першому, так і в другому випадку параметри та характеристики ротора визначають ефективність роботи АБУ в цілому. Тобто, якщо використовувати методику проектування ротора, наведену в [3], то розробнику необхідно самостійно вибрати аеродинамічний профіль лопаті та визначити швидкохідність ротора:

$$Z = \frac{\omega R}{V},$$

де  $\omega$  – швидкість обертання ротора;  $R$  – радіус ротора;  $V$  – швидкість вітру.

Доцільно провести попередній аналіз профілів, використовуючи теорію реального вітряка [3]. Якщо розглянути сумарні втрати у реальному роторі, а саме: кінцеві  $\bar{T}_j$ , профільні  $\bar{T}_p$  та на кручення супутнього струменя  $\bar{T}_m$ , то загальний вираз для коефіцієнта використання енергії вітру матиме вигляд [3]:

$$\xi = \xi_i \left( 1 - \frac{r_0^2}{R^2} - \bar{T}_j - \bar{T}_p - \bar{T}_m \right).$$

Величина  $\frac{r_0^2}{R^2}$  враховує втрати із-за зменшення площі обмаху ротора ( $r_0$  – радіус маточни, для розрахунків прийнято 0,1). Коефіцієнт використання енергії вітру ідеальним ротором:

$$\xi_i = 4e \frac{1-e}{1+e},$$

де  $e$  – коефіцієнт гальмування повітряного потоку в площині ротора.

Проаналізуємо кожен вид втрат у роторі вітроустановки. Кінцеві втрати знаходять за виразом:

$$\bar{T}_j = \frac{8ke}{(1+e)(1-e)^2} \frac{\sqrt{1+\frac{1}{Z_u^2}}}{iZ_u \left(1+\frac{\mu}{Z_u}\right)^2} \frac{e}{(1-e) \sqrt{1+\left(\frac{iZ}{\pi(1-e/2)}\right)^2}}.$$

Коефіцієнт  $k$  враховує те, що індуктивний опір прикладений насправді не в кінці лопаті. Для проведення попереднього аналізу профілів

приймаємо  $k=1$  та допущення, що  $\frac{\sqrt{1+\frac{1}{Z_u^2}}}{\left(1+\frac{\mu}{Z_u}\right)^2} \cong 1$ .

Тоді отримаємо спрощений вираз кінцевих втрат:

$$\bar{T}_j \cong \frac{e}{1-e} \left[ \frac{8\sqrt{1+\left(\frac{1-e}{Z}\right)^2}}{(1+e)iZ} - \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{iZ}{\pi(1-e/2)}\right)^2}} \right].$$

Як видно із виразу, всі кінцеві втрати у роторі залежать від  $e$  та  $Z$ . Кінцеві втрати у роторі також залежать від кількості лопатей  $i$ , тому їх кількість для аналізу було прийнято 3.

Повний вираз для розрахунку профільних втрат:

$$T_p \cong \pi R^2 \frac{\rho V^3}{2} \frac{4e(1-e)^2}{1+e} \frac{V^2}{\omega^2 R^2} 2\mu' \left[ Z + \frac{Z^3}{3(1-e)^2} \right].$$

В даному виразі  $\mu'$  – середнє значення коефіцієнта оберненої якості за всією довжиною лопаті, і розрахувати його можливо при розрахунку аеромеханічних характеристик ротора після

того, як визначені його геометричні розміри. Тому для проведення аналізу використаємо мінімальне значення коефіцієнта оберненої якості (рис.

2). Розділивши вираз на  $\pi R^2 \frac{\rho V^3}{2} \xi_i$  та з ураху-

ванням виразу  $\frac{V}{\omega R} = \frac{1}{Z}$  отримаємо вираз для величини профільних втрат:

$$\bar{T}_p \cong 2\mu_{min} \left[ \frac{1-e}{Z} + \frac{Z}{3(1-e)} \right].$$

Тобто величина профільних втрат залежить від трьох факторів:  $\mu_{min}$ ,  $Z$  та  $e$ .

Величина втрат на кручення за ротором визначається за формулою:

$$T_m = \pi R^2 \frac{\rho V^3}{2} \frac{\xi_i^2 \eta^2}{2Z^2} \ln \frac{R}{r_0}.$$

Розділивши вираз на потужність ідеального ротора  $T_i = \pi R^2 \frac{\rho V^3}{2} \xi_i$ , отримаємо величину втрат на кручення струменя за ротором:

$$\bar{T}_m = \frac{\xi_i \eta^2}{2Z^2} \ln \frac{R}{r_0},$$

де  $\eta = 1 - \frac{r_0^2}{R^2} - \bar{T}_j - \bar{T}_p - \bar{T}_m$ .

Враховуючи, що втрати на кручення струменя за ротором незначні, для аналізу приймаємо усереднене значення  $\eta = 0,7$ .

Таким чином, сумарні втрати у реальному роторі вітроустановки визначаються  $\mu_{min}$ ,  $Z$  та  $e$ . При цьому  $Z$  та  $e$  – взаємопов'язані параметри, на які не можна впливати, а можна варіювати параметром  $\mu$  при виборі певного профілю лопаті.

З урахуванням коефіцієнта оберненої якості всі профілі були поділені на дві групи:

- традиційні профілі (P-II);
- профілі серії GA(W) та ламінізовані профілі FX.

На рис. 4а, б, в, г наведено результати розрахунків залежності коефіцієнта потужності (коефіцієнта використання енергії вітру) від швидкості ротора та коефіцієнта гальмування повітряного потоку в його площині для різних видів профілів.

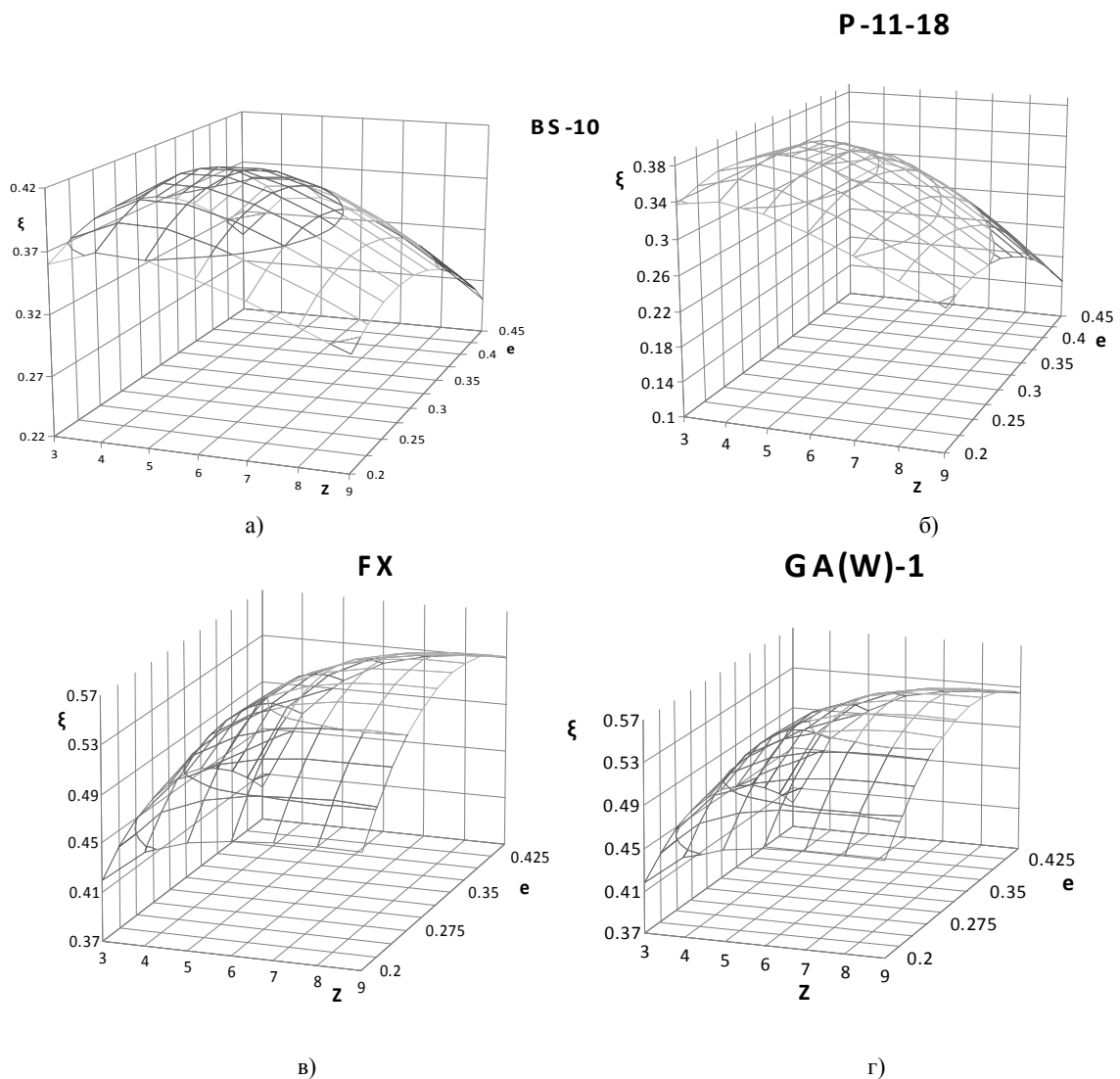


Рис. 4. Залежність коефіцієнта використання енергії вітру (коефіцієнта потужності) від швидкохідності ротора та коефіцієнта гальмування повітряного потоку в його площині для різних видів профілів.

Проведений аналіз показав, що профілі групи 1 дозволяють отримати  $\xi = 0,36-0,4$  в діапазоні швидкохідностей  $Z = 4-5$ , а профілі групи 2 дозволяють отримати  $\xi = 0,53-0,57$  в діапазоні швидкохідностей  $Z = 6-11$ . При цьому профілі групи 2 в діапазоні швидкохідностей  $Z = 5-6$  забезпечують коефіцієнт потужності  $\xi = 0,49-0,53$ , що вище, ніж у профілів групи 1 в даному діапазоні швидкохідності.

**Висновки.** При виборі профілів для лопатей вітроелектричних установок малої потужності перевага повинна надаватися профілям серії GAW та серії FX, що забезпечує вищий коефіцієнт використання енергії вітру в порівнянні з традиційними профілями та дозволяє проектувати ротори ВЕУ з високою швидкохідністю. Це, в

свою чергу, дозволяє збільшувати оберти електрогенератора та зменшувати їх масогабаритні показники.

1. *Кравець А.С.* Характеристики авиационных профилей / Кравець А.С. – М.-Л.: Оборонгиз, 1939. – 340 с.
2. *Кашафутдинов С.Т.* Атлас аэродинамических характеристик крыловых профилей / С.Т. Кашафутдинов, В.Н. Лушин. – Новосибирск: Сибирский НИИ Авиации им. Чаплыгина, 1994. – 74 с.
3. *Сабинин Г.Х.* Теория и аэродинамический расчет ветряных двигателей / Г.Х. Сабинин // Труды ЦАГИ. – 1931. – Вып.104. – С. 1–67.
4. *Головко В.М.* Разработка и испытание генераторов с постоянными магнитами для ветроустановок на базе серийных асинхронных двигателей / В.М.Головко, В.П.Коханевич, Ю.Н.Перминов, Н.А.Шихайлов, Н.В.Марченко // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – №7(111). – С. 48–55.