

УДК 621.548

**В.М.Головко**, докт.техн.наук, **В.П.Коханевич**, канд.техн.наук,  
**М.О.Шихайлов** (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

## **Визначення впливу геометричних параметрів лопаті на енергетичні характеристики ротора**

*Наведено методичні положення та результати досліджень впливу аеродинамічних показників профілю на геометричні параметри лопаті при визначенні енергетичних характеристик ротора вітроустановки.*

**Ключові слова:** вітроенергетика, аеродинамічний профіль, енергетична характеристика ротора.

*Представлены методические положения и результаты исследований влияния аэродинамических показателей профиля на геометрические параметры лопасти при определении энергетических характеристик ротора ветроустановки.*

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, аэродинамический профиль, энергетическая характеристика ротора.

Сучасний розвиток вітроенергетики потребує удосконалення конструкцій вітроенергетичних установок (ВУ) з метою підвищення їх ефективності. Одним із таких шляхів є намагання максимально наблизити коефіцієнт використання енергії вітру ВУ до теоретично можливого. В роботі [1] було досліджено аеродинамічні характеристики профілю лопаті, при яких досягаються найвищі енергетичні показники ротора. При цьому питання їх впливу на геометричні параметри лопаті та подальший вплив геометричних параметрів лопаті на енергетичні характеристики ротора залишилися недослідженими.

Необхідно зазначити, що при визначенні геометричних параметрів необхідно враховувати технологію виготовлення лопаті, функціональне призначення ВУ, спосіб кріплення лопаті тощо.

Функціонально лопаті призначаються для двох основних типів вітроустановок:

- тихохідні вітроустановки;
- швидкохідні вітроустановки.

В свою чергу, швидкохідні вітроустановки мають два виконання:

- з жорстко встановленими лопатями;
- з поворотними лопатями.

Швидкохідні вітроустановки з поворотними лопатями мають два види регулювання:

- флюгерне;
- антифлюгерне.

Тихохідні вітроустановки використовуються для машин з високим початковим моментом зрушення. Даним вимогам найкраще відповідають лопаті веслоподібної форми, як було показано в [1], і в подальшому вони розглядатися не будуть.

Сучасні швидкохідні вітроустановки в основному агрегуються з електричними генераторами. При цьому у вітроелектричних установках (ВЕУ) малої потужності в даний час переважно використовуються генератори зі збудженням від постійних магнітів. Конструктивно ротор може з'єднуватися з генератором напряму або через мультиплікатор. І в першому, і в другому випадку збільшення частоти обертання ротора дозволяє зменшити масогабаритні параметри генератора та мультиплікатора відповідно. Тобто виконання даної вимоги потребує використання аеродинамічних профілів з високими числами швидкохідності та відповідної форми в плані (в основному це трапецієвидна форма).

Оскільки максимальний рушійний момент швидкохідні ротори розвивають у зоні номінальної швидкохідності, то основною їх проблемою є створення початкового моменту для зрушення ротора. Даний момент можна отримати за рахунок тиску повітря на лопаті, а саме за рахунок встановлення лопаті або її частини на кути установки  $10^\circ \dots 30^\circ$ . Встановлення всієї лопаті на дані кути не є доцільним, тому що призведе до

зниження як швидкохідності, так і ефективності ротора. Тобто для зрушення ротора з жорстко закріпленими лопатями останні повинні мати аеродинамічний закрут.

Для роторів з поворотними лопатями в разі флюгерного регулювання кут установки лопаті збільшується від початкового кута установки, який зазвичай складає  $0^\circ \dots 5^\circ$ , тобто в цьому випадку також доцільно використовувати лопаті з аеродинамічним закрутом. В разі антифлюгерного регулювання початковий кут установки складає  $15^\circ \dots 20^\circ$ , що дозволяє використовувати лопаті без аеродинамічного закруту.

Для аналізу впливу аеродинамічних параметрів на геометричні розміри лопаті та отримання достовірних результатів використаємо методику Г.Х.Сабініна. У відповідності з рівнянням зв'язку, що пов'язує відносну ширину лопаті  $\bar{b}$ , коефіцієнт підйомної сили  $C_y$  та коефіцієнт гальмування повітряного потоку в площині ротора  $e$ , маємо наступні вирази:

$$z = Z \frac{r}{R};$$

$$z_u = \frac{1}{2} \left[ \frac{z}{1-e} - \mu \left( 1 + \frac{e}{1-e^2} \right) \right] \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left[ \frac{z}{1-e} - \mu \left( 1 + \frac{e}{1-e^2} \right) \right]^2 + \frac{e}{1-e^2} + \mu \frac{z}{1-e}}$$

де  $z$  – число модулів для будь-якого радіуса  $r$  ротора;  $Z$  – швидкохідність ротора;  $z_u$  – число відносних модулів;  $R$  – радіус ротора;  $\mu$  – обернений коефіцієнт якості лопаті.

Оскільки величина  $\mu$  незначна порівняно з іншими складовими залежності, то нею можна знехтувати, і вираз комплексу відносної сумарної ширини лопатей ротора прийме вигляд:

$$[i\bar{b}C_y] = \frac{8\pi \frac{r}{R} \frac{e}{(1+e)(1-e)^2}}{(z_u + \mu) \sqrt{1+z_u^2}},$$

де  $i$  – кількість лопатей ротора.

Тоді вираз для  $z_u$  набуде вигляду (значення зі знаком "-" відкидаємо, оскільки від'ємне значення  $z_u$  фізично неможливе) та з урахуванням, що

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

$$z_u = \frac{z}{2(1-e)} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{\xi_i}{z^2}} \right],$$

де  $\xi_i$  – значення коефіцієнта використання енергії вітру (приймається для заданого розрахункового значення  $Z_H$  [1]).

На рис. 1 наведено графіки залежностей  $[i\bar{b}C_y]$  для кінця лопаті ( $r=R$ ) для різних профілів.

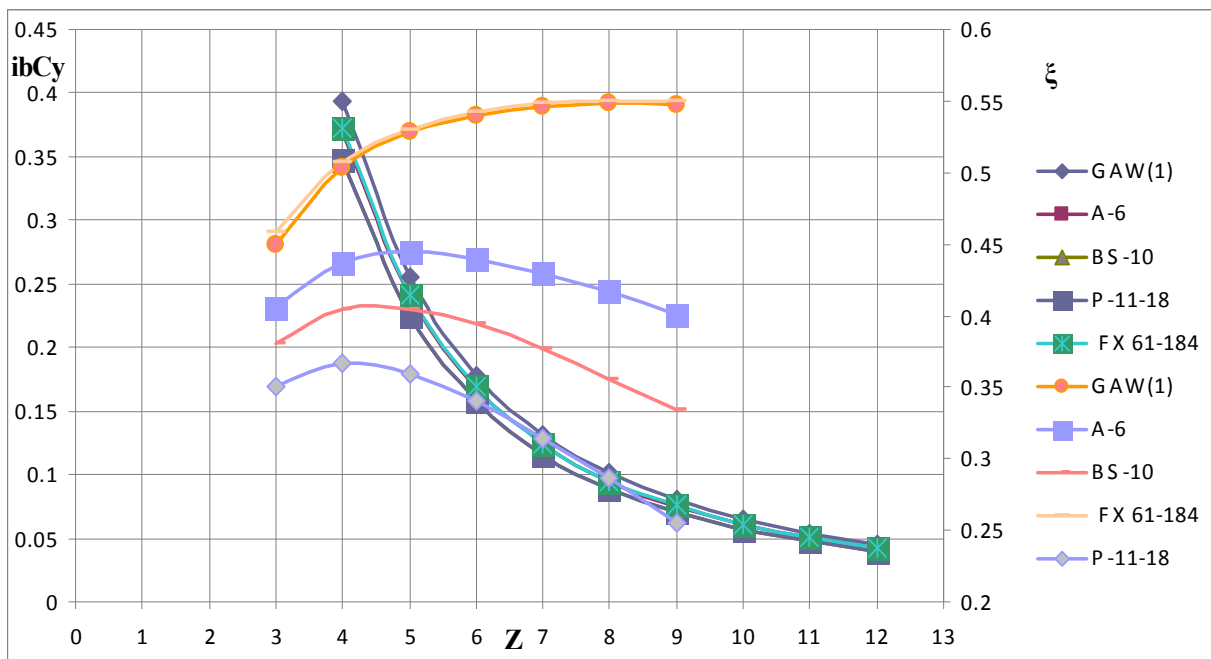


Рис. 1. Графіки залежностей  $[i\bar{b}C_y]$  для кінця лопаті та  $\xi$  від швидкохідності  $Z$  для різних профілів.

З аналізу графіків видно, що вибір аеродинамічного профілю практично не впливає на величину  $[i\bar{b}C_y]$ , а в основному вона залежить від вибору конструктором швидкохідності  $Z$ . Даний аналіз доцільно доповнити результатами, отриманими із визначення впливу  $Z$  на коефіцієнт використання енергії вітру  $\zeta$  [1], що дозволяє вибрати величину  $[i\bar{b}C_y]$  з урахуванням отримання максимально можливого коефіцієнта використання енергії вітру.

У відповідності з методикою [2] профілювання лопаті починається з її кінцевої частини. Це обумовлено тим фактором, що кінцева частина лопаті створює найбільший рушійний момент. При цьому для кінця лопаті приймається значення  $C_y$  при мінімальному значенні  $\mu$ , що дозволяє мінімізувати втрати на кінці лопаті.

При розрахунку геометричних параметрів лопаті використовуються графіки  $C_y$  та  $\mu$  (згідно довідкових значень для вибраних профілів). У відповідності з розрахунковими значеннями  $C_{y_i}$

вибираються за даними графіками значення  $\alpha$  (кут атаки) та  $\mu$ .

На рис. 2 наведено залежності ширини хорди лопаті на її кінці від модуля швидкохідності для ряду профілів.

Крім швидкохідності на ширину лопаті впливає вибір показників аеродинамічного профілю, а саме величина коефіцієнта підйомної сили при мінімальному значенні  $\mu$ , тобто профілі з більшими значеннями дозволяють отримати лопаті з меншою шириною хорди вздовж лопаті.

Для роторів з профілями BS-10, P-11-18, A6, GA(W)-1 та FX розраховані їх енергетичні характеристики. При цьому швидкохідність для всіх роторів приймалась така, що відповідає максимальному значенню коефіцієнта використання енергії вітру для конкретного профілю. Для всіх роторів форма лопаті в плані була прийнята трапецієвидною зі співвідношенням ширини лопаті поблизу комеля до ширини лопаті на кінці  $h = 2$ . На рис. 3 та 4 наведено дані розрахунку залежності коефіцієнта потужності від швидкохідності ротора.

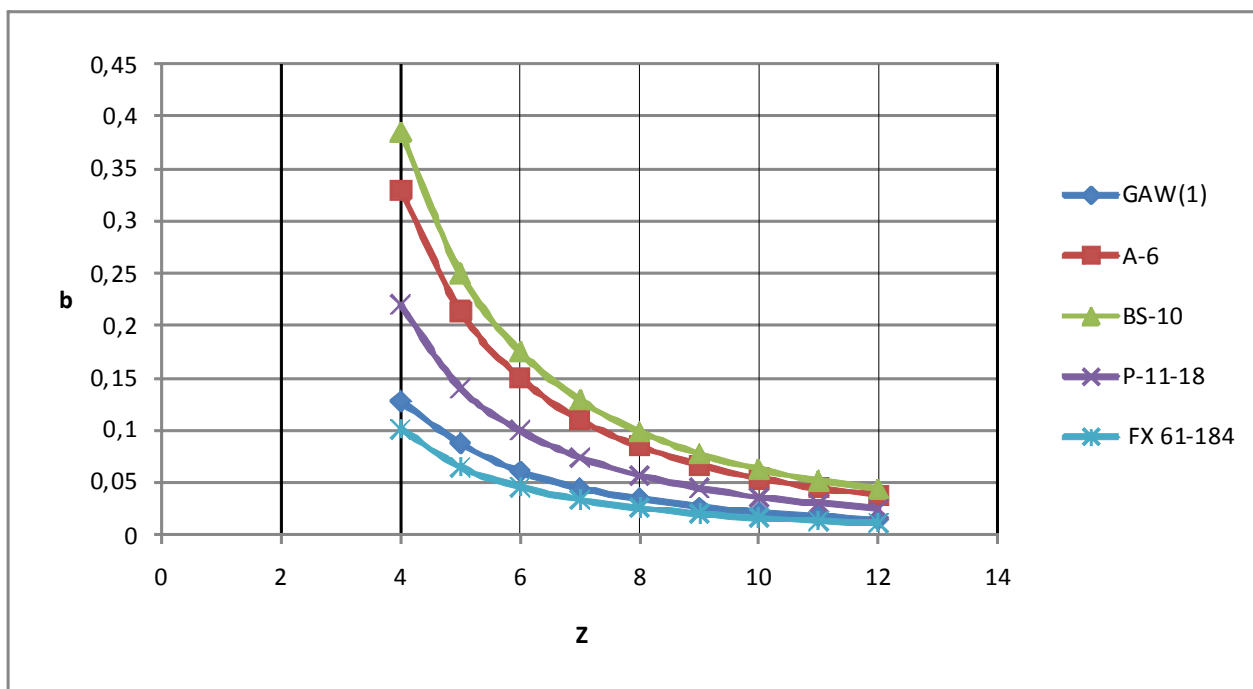


Рис. 2. Залежності ширини хорди лопаті на її кінці від модуля швидкохідності.

Отримані значення коефіцієнта потужності з урахуванням геометричних параметрів лопаті не перевищують максимальні його значення.

Оскільки одним із основних узагальнених показників ротора є  $Z$ , то для профілів А6 та GA(W)-1 енергетичні характеристики були розраховані для ряду значень  $Z_H$ , що знаходяться в зоні максимальних значень  $\xi$  [1], тобто для А6  $Z_H = 4...6$ , для

GA(W)-1  $Z_H = 7...9$ . Результати розрахунку наведені на рис. 5 та 6. Максимальне значення коефіцієнта потужності для традиційних профілів зсувається в бік нижньої межі значень модуля швидкості, що отримана при аналізі попередніх результатів досліджень [1], тому що не вдається досягти однакового значення величини зворотного коефіцієнта якості вздовж лопаті.

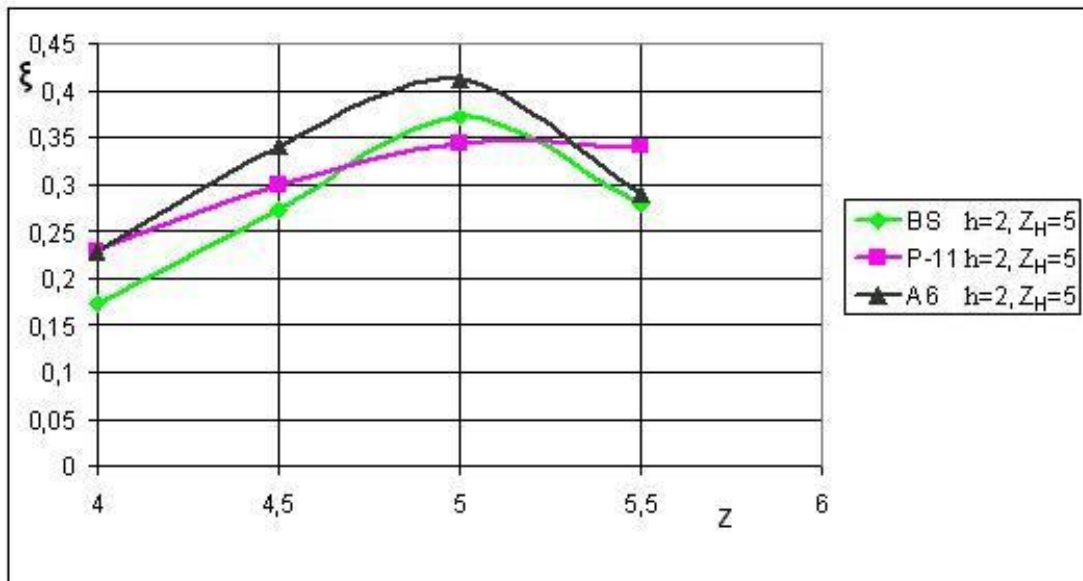


Рис. 3. Залежність коефіцієнта потужності від швидкохідності ротора для традиційних профілів.

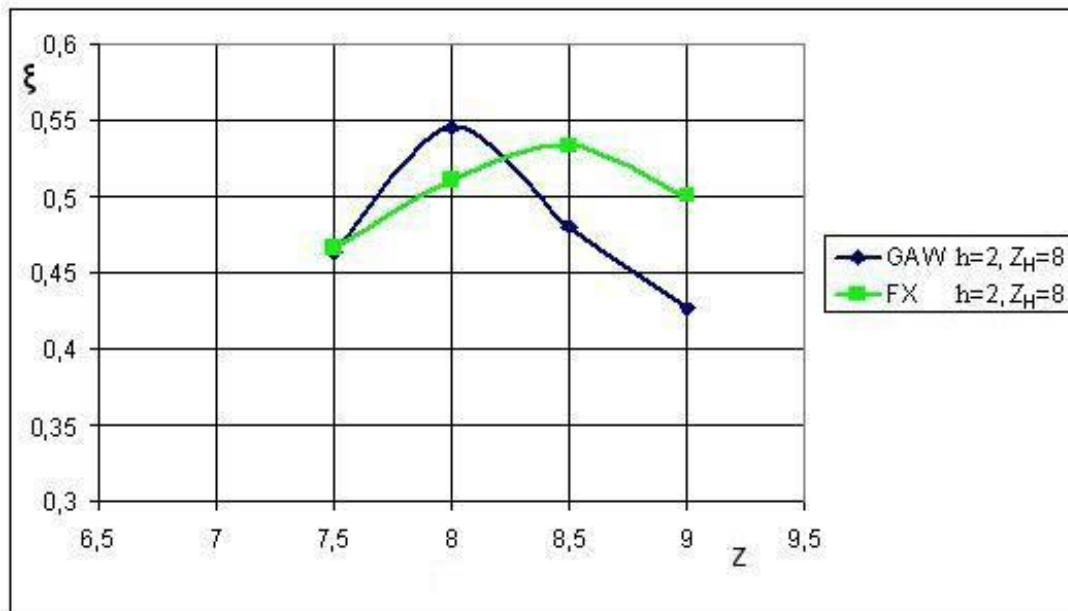


Рис. 4. Залежність коефіцієнта потужності від швидкохідності ротора для ламінованих та подібних до них профілів.

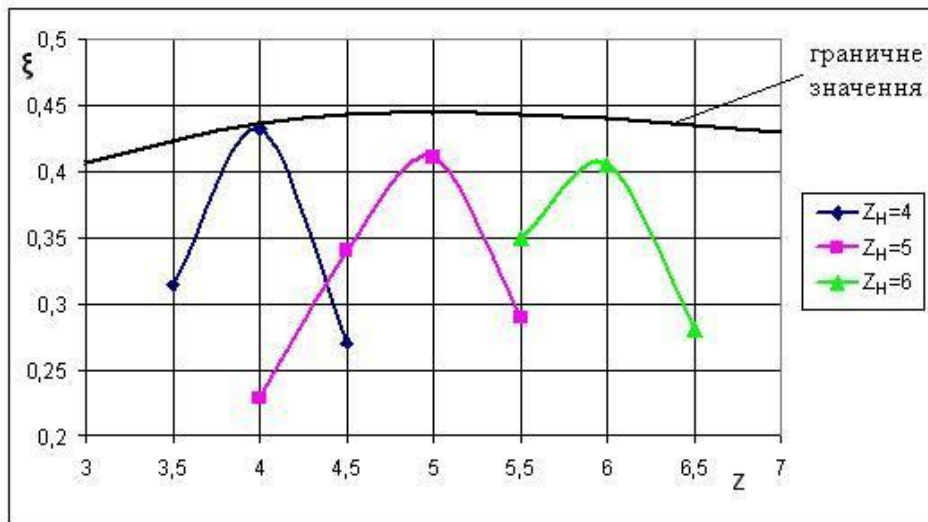


Рис. 5. Енергетичні характеристики ротора з профілем А6 при різних прийнятих модулях швидкохідності.

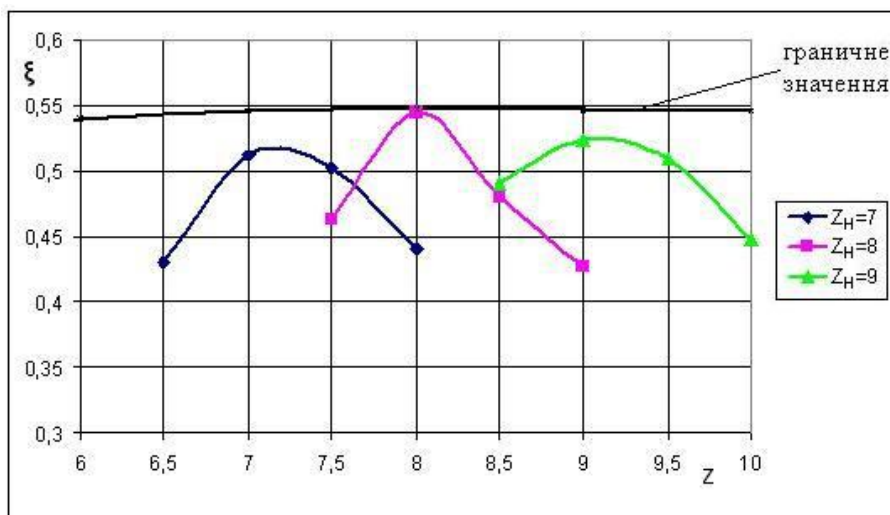


Рис. 6. Енергетичні характеристики ротора з профілем при різних прийнятих модулях швидкохідності GA(W)-1.

Максимальне значення коефіцієнта потужності для ламінованих і наближених до них профілів збігається зі значенням модуля швидкохідності, що отримане при аналізі попередніх результатів досліджень [1].

Максимальні значення енергетичних характеристик роторів, що розраховані для ряду аеродинамічних профілів та різних заданих швидкохідностей ротора, знаходяться нижче граничної межі, отриманої в [1], через вплив геометрії лопаті. Оскільки дані розрахунки були проведені тільки для трапецієвидної форми лопаті з  $h = 2$  та геометричним закрутом, то доцільно визначити вплив параметра  $h$  на енергетичні характеристики ротора, що й було проведено для ротора з лопатями з аеродинамічним профілем А6 і показано

на рис. 7. На основі даних енергетичних характеристик отримана залежність максимальних значень енергетичних характеристик від параметра  $h$ , що наведена на рис. 8.

Якщо у вітроустановках малої потужності регулювання обертів ротора здійснюється за рахунок використання обертових лопатей, то для спрощення матриць для виготовлення лопатей та зниження їх вартості використовують лопаті без аеродинамічного закруту. При жорсткому закріпленні лопатей в маточині необхідно здійснювати в лопатях аеродинамічний закрут. На рис. 9 наведено енергетичні характеристики для даних виконань лопатей.

Як видно з рис. 9, ротори, лопаті яких виконані з аеродинамічним закрутом, мають кращі енергетичні показники, ніж без нього.

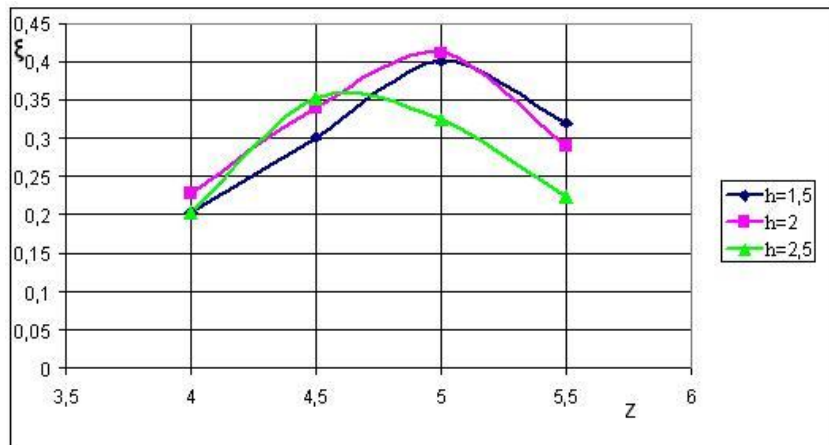


Рис. 7. Вплив параметра  $h$  на енергетичні характеристики ротора.

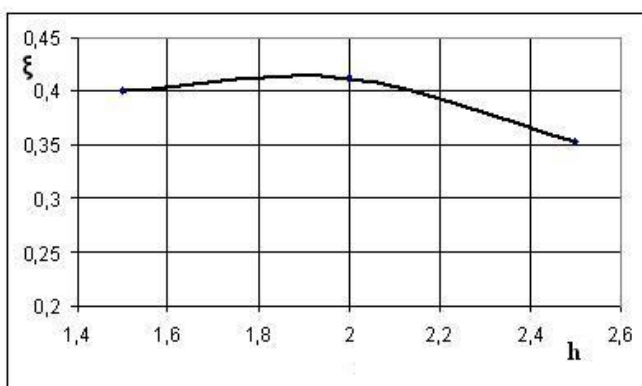


Рис. 8. Залежність максимальних значень енергетичних характеристик від параметра  $h$ .

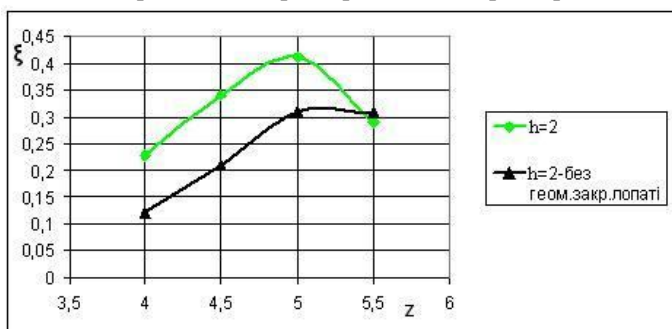


Рис. 9. Порівняння енергетичних характеристик роторів з різним виконанням лопатей.

**Висновки.** 1. Проведено оцінку впливу аеродинамічних параметрів на геометричні розміри

лопаті, яка доводить, що вид аеродинамічного профілю практично не впливає на величину комплексу, який пов'язує геометричні та аеродинамічні показники. Дана величина в основному залежить від вибору модуля швидкості та коефіцієнта підйомної сили (тобто профілі з більшими значеннями коефіцієнта підйомної сили дозволяють отримати лопаті з меншою шириною хорди вздовж лопаті).

2. При визначенні впливу аеродинамічних характеристик профілю лопаті на енергетичні характеристики ротора встановлено, що максимальне значення коефіцієнта потужності для традиційних профілів зсувається в бік нижньої межі значень модуля швидкості, оскільки не вдається досягти однакового значення величини зворотного коефіцієнта якості вздовж лопаті.

1. Головка В.М., Коханевич В.П., Шихайлов Н.А., Зінченко Т.В. Аналіз характеристик параметрів лопаті ротора автономної вітроенергетичної установки // Відновлювана енергетика. – 2013. – №3. – С. 49–53.

2. Сабинин Г.Х. Теория и аэродинамический расчет ветряных двигателей / Г. Х. Сабинин // Труды ЦАГИ. – 1931. – Вып.104. – С. 1–67.