

JUSTIFICATION METHODS COUNTERBALANCE THE MAGNETIC MOMENTS AND AXIAL GAP STABILIZATION CONTACTLESS MAGNETOELECTRIC ARCSTATORE WIND TURBINE

This paper describes the principle of operation arcstatore wind power generator with permanent magnets and methods for balancing the magnetic moments at various sections of the stator and the number of non-contact air gap stabilization using magnetic conductors.

Key words: *magnetoelectric dugostatorny axial generator, direct-drive wind turbine, balancing the magnetic moments, the stabilization of the air gap.*

УДК 621.548

МОДЕЛЬ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ ІДЕАЛЬНИМ ВІТРОКОЛЕСОМ ТИХОХІДНОГО ВІТРОДВИГУНА

В.І. Жоров, канд. техн. наук
ННЦ „ІМЕСГ”

З метою наближення до реального вітроколеса запропоновано в класичній моделі ідеального вітроколеса враховувати втрати потоку перед вітроколесом, а динамічний тиск на вітроколесо віднаходити через залишкову швидкість потоку на лопатях. Модель дає можливість розрахувати оптимальну частоту обертання та раціональні кути заклинення лопатей вітроколеса.

Ключові слова: *вітроколесо, вітер, потоки повітря, швидкість, потужність, коефіцієнт використання, лопать, частота обертання, кут заклинення.*

Проблема. Нині загальний аналіз ефективності використання енергії вітру пропелерними вітродвигунами проводиться на основі класичної моделі ідеального вітроколеса. Останнє замінюється тонким напівпрозорим для вітру диском, при проходженні через який вітер віддає йому частину енергії. У розрахунках допускається, що вітроколесо діє без втрат енергії, розсіювання вітру на ньому відсутнє, а лінії току йдуть без розриву, у зв'язку з чим модель називається лінійною.

Проблема полягає у тому, що розраховані на цій моделі коефіцієнт використання енергії вітру та швидкість потоку за вітроколесом значно відрізняються від параметрів цих величин, отриманих на фізичній

моделі вітроколеса тихохідного вітродвигуна ТВ–2,5 експериментальної вітроелектричної установки. Отже, стосовно тихохідних вітроколес, лінійна модель потребує уточнення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Зазвичай схема перетворення енергії

вітру пропелерним вітродвигуном зображується у вигляді уповільненого потоку повітря, перерізаного трьома контрольними площинами A , B та C , одна з яких, наприклад B , співпадає з площиною обертання вітроколеса, а дві інші розташовані з одного та іншого боків у місцях розподілення стаціонарної та збуреної частин потоку. Площі перерізів S_A , S_B та S_C зростають у напрямку вітру, а відповідні швидкості u_0 , u та u_2 у перерізах B та C зменшуються [1]. У відповідності із цією схемою механічна потужність вітроколеса розраховується за такою формулою [2]:

$$N = F \cdot u = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_B \cdot (u_0^2 - u_2^2) \cdot \frac{1}{2} (u_0 + u_2), \quad (1)$$

де F – рушійна сила, яка діє на вітроколесо з боку вітру, Н; u – швидкість потоку через вітроколесо, м/с; ρ – густина повітря; за температури $+10$ °С та нормального атмосферного тиску 101,3 кПа $\rho = 1,25$ кг/м³; S_B – площа сліду лопатей у площині обертання, м²; u_0 – швидкість живого вітру, м/с; u_2 – швидкість вітру за вітроколесом, м/с.

З першої похідної від правої частини (1) віднаходиться швидкість потоку за вітроколесом, яка відповідає найвищій механічній потужності

$$u_2 = \frac{1}{3} u_0. \quad (2)$$

У вираз (1) вартість u^2 підставляється у відповідності з (2), в результаті чого визначається максимальна механічна потужність

$$N_{\max} = 0,593 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_B \cdot u_0^3 = 0,593 \cdot N_0, \quad (3)$$

де 0,593 – коефіцієнт використання енергії вітру ідеальним вітроколесом; N_0 – потужність живого вітру, Вт.

Тобто, якщо створити таке навантаження на вітроколесо, що швидкість потоку за ним становитиме третину від швидкості живого вітру, його потужність дорівнюватиме 0,593 від потужності вітру.

Проте шляхом експериментальних досліджень встановлюється, що найвищий коефіцієнт використання енергії вітру тихохідним вітроколе-

сом з плоскими лопатями при повному заповненні ними площини обертання не перевищує 0,42 [2], що суттєво відрізняється від коефіцієнта використання ідеального вітроколеса – 0,593. Також встановлюється, що причиною значної розбіжності між названими коефіцієнтами є розсіювання живого вітру перед вітроколесом. У режимах роботи від синхронного ходу до повного гальмування розсіюється від 0 до 0,2 живого вітру, причому у номінальному режимі розсіювання становить 0,1 живого потоку. Тобто, у номінальному режимі роботи на вітроколесо приходить 0,9 живого вітру. З врахуванням цього віднаходиться уточнене значення коефіцієнта використання енергії вітру ідеальним вітроколесом тихохідного вітродвигуна – $0,593 \cdot 0,9^3 = 0,432$ [2].

Крім того, також у результаті експериментальних досліджень встановлюється, що в номінальному режимі роботи швидкість вітру відразу за вітроколесом становить дві третини від швидкості живого вітру, що вдвічі вище від розрахункової u_2 ; на відстані до чвертини діаметра від вітроколеса швидкість u_2 не змінюється, а потім починає зростати [3]. Тобто, втрат швидкості вітру за тихохідним вітроколесом не спостерігається. У зв'язку з цим, швидкість вітру u_2 за класичним ідеальним вітроколесом дорівнює осьовій швидкості збігання лопатей (залишкової швидкості вітру на лопатях) ідеального тихохідного вітроколеса (рис. 1). Таке формулювання швидкості вітру за класичним ідеальним вітроколесом дає можливість узгодити результати розрахунків з експериментальними даними. Окрім того, з'являється можливість зв'язати швидкість збігання лопатей вітроколеса з їх лінійною швидкістю руху в розглядуваному кільцевому перерізі. Це дає можливість розрахувати кути заклинення профілів у залежності від відстані до осі обертання (табл. 1). Тобто, запропонована схема перетворення енергії вітру ідеальним тихохідним вітроколесом дає можливість розрахувати ще й його конструкційні параметри. Водночас, дана модель вже не відповідає ознакам класичного ідеального вітроколеса.

Таблиця 1. Залежність кута заклинення профілів лопаті удосконаленого ідеального тихохідного вітроколеса з коефіцієнтом заповнення площини обертання 1,0 від відстані профілів до осі обертання (r – відстань до осі обертання, м; R – радіус вітроколеса, м; φ – кут заклинення лопаті, град.)

r/R , в.о.	1,00	0,75	0,50	0,30
φ , град.	$16^{042'}$	$21^{048'}$	31^0	45^0

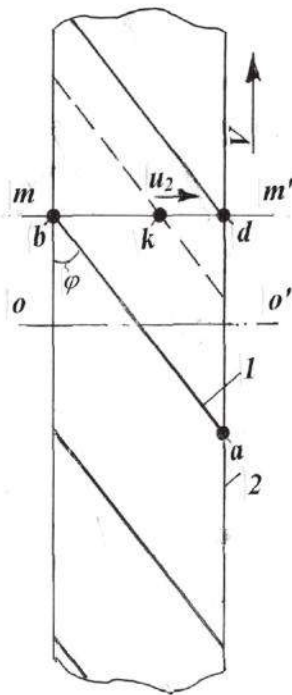


Рис.1. Розрахункова схема удосконаленого ідеального тихохідного вітроколеса (ВК): 1 – лопать; 2 – вітроколесо; u_2 – осьова швидкість збігання лопатей (залишкова швидкість вітру на лопатях) ВК (в класичній теорії ВК названа швидкістю вітру за вітроколесом); V – швидкість руху лопатей у розглядуваному кільцевому перерізі; $o - o'$ – ось ВК; $m - m'$ – пряма, яка паралельна осі ВК та перетинається з лопаттю в розглядуваному перерізі; k – точка перетину лопаті з прямою $m - m'$ (точка k рухається із швидкістю u_2 від точки b до точки d під час обертання ВК); ab – переріз лопаті 1; ad – проекція лопаті 1 на площину обертання; bd – товщина ВК; φ – кут заклинення лопаті

Мета досліджень. Узгодити класичну схему перетворення енергії вітру тихохідним ідеальним вітроколесом з експериментальними даними, які отримано на моделі вітроколеса тихохідного вітродвигуна ТВ–2,5 експериментальної вітроелектричної установки.

Результати досліджень. Виходячи із згаданих результатів експериментальних досліджень, контрольна площа C переноситься безпосередньо на вихід із вітроколеса, площа B – безпосередньо на його вхід, а площа A залишається по місцю розподілення стаціонарної та збуреної частин потоку (рис. 2). За цих умов під робочою зоною розуміється відрізок потоку між площинами A та C , де створюються умови для відбору і здійснюється відбір частини потужності вітру. На створення тиску перед вітроколесом витрачається 0,1 частина потоку та, відповідно, $1 - 0,9^3 = 0,271$ частина потужності живого вітру. Залишкова потужність вітру на вході до вітроколеса становить $0,9^3 = 0,729$ потужності живого вітру, а на виході із вітроколеса – $0,9^3 - 0,432 = 0,297$

названої величини. Відповідна швидкість потоку u_{20} за вітроколесом дорівнює [4]

$$u_{20} = \sqrt[3]{0,297} \cdot u_0 \cong 0,666u_0. \quad (4)$$

У площині обертання вітроколеса, між контрольними площинами B та C , розсіюється $0,900 - 0,666 = 0,234$ живого вітру. Розсіювання вітру перед вітроколесом і в площині його обертання здійснюється у радіальних напрямках, перпендикулярних напрямку потоку. У зв'язку із цим вищезначену модель перетворення енергії вітру не можна назвати лінійною.

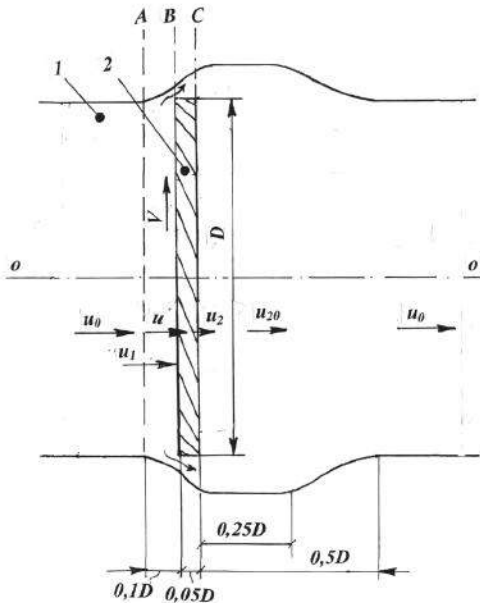


Рис 2. Розрахункова схема перетворення енергії вітру удосконаленим ідеальним вітроколесом (ВК): 1 – потік повітря; 2 – вітроколесо; A – площина розподілення стаціонарної та збуреної частин потоку перед вітроколесом; B – площина входу потоку у вітроколесо; C – площина виходу потоку із вітроколеса; D – діаметр вітроколеса; u_0 , u_1 , u , u_2 , u_{20} – швидкість живого вітру, потоку на вході до ВК, середня через ВК, залишкова на ВК (збігання лопатей ВК), за ВК, відповідно; V – лінійна швидкість руху лопатей у розглядуваному кільцевому перерізі; $o - o'$ – ось ВК

Порівнюючи характеристики класичного та запропонованого ідеальних вітроколiс, можна відзначити значну розбіжність повних втрат швидкості вітру на вітроколесі – $0,666 u_0$ та $0,234 u_0$ (табл. 2). Відповідно, значно різняться швидкості вітру за вітроколесом – $0,333 u_0$ та $0,666 u_0$. Коефіцієнти використання енергії вітру ідеальними вітроколесами відрізняються у варіантах на 27,2%, що є суттєвим. Всі показники запропонованого ідеального вітроколеса, окрім коефіцієнтів використання енергії вітру та осьового навантаження на вітроколесо, співпадають з реальними. Розбіжність коефіцієнтів використання енергії вітру та коефіцієнтів осьового навантаження на вітроколесо названих вітроколiс є порівняно невеликою – відповідно, 2,8% та 16,7%. Отже, запропонована схема перетворення енергії вітру ідеальним вітроколесом тихохідного вітродвигуна є точнішою від класичної.

Визначимо оптимальну, з точки зору виробітку енергії, частоту обертання удосконаленої моделі ідеального вітроколеса тихохідного вітродвигуна ТВ–2,5 експериментальної вітроелектричної установки.

Для заданої швидкості живого вітру u_{0i} оптимальна частота обертання вітроколеса n_i віднаходиться із такої залежності [3]:

$$u_2 = V \cdot \operatorname{tg} \phi, \quad (5)$$

де осьова швидкість збігання профілю лопаті запишеться із умови забезпечення максимального значення коефіцієнта використання енергії вітру вітроколесом, тобто $u_2 = 0,3u_{0i}$ [3]. Представивши лінійну швидкість кінцівок лопатей через куту, вираз (5) матимемо у вигляді

$$0,3u_{0i} = \frac{2\pi n_i R}{60} \cdot \operatorname{tg} \phi_0, \quad (6)$$

де ϕ_0 – кут заклинення профілю на кінці лопаті, $\phi_0 = 16^{\circ}42'$ (табл. 1); R – радіус вітроколеса, $R=1,25$ м.

Із рівняння (6) виводиться формула (7) для розрахунку оптимальної частоти обертання удосконаленого ідеального вітроколеса тихохідного вітродвигуна

$$n_i = \frac{9u_{0i}}{\pi R \cdot \operatorname{tg} \phi_0}. \quad (7)$$

Розраховані за виразом (7) оптимальні частоти обертання удосконаленого ідеального вітроколеса тихохідного вітродвигуна ТВ–2,5 (табл. 3) практично співпадають з експериментальними даними, отримани-

ми на фізичній моделі цього двигуна в аеродинамічній трубі. Отже, на відміну від класичної моделі, удосконалена модель ідеального вітроколеса тиххідного вітродвигуна дає можливість розрахувати його раціональні конструкційні параметри.

Таблиця 2. Характеристики процесу перетворення енергії вітру ідеальним та реальним вітроколесами тиххідного вітродвигуна ТВ–2,5 експериментальної вітроелектричної установки у режимі максимального використання енергії вітру

Назва показників	Вітроколесо			
	класичне	Ідеальне		Реальне
		за Г.Х. Сабініним	ННЦ «ІМЕСГ»	ННЦ «ІМЕСГ»
– Швидкість живого вітру, u_0	u_0	u_0	u_0	u_0
– Втрата швидкості вітру перед вітроколесом, v_0	–	–	$0,1u_0$	$0,1u_0$
– Швидкість потоку на вході до вітроколеса, u_1	u_0	u_0	$0,9 u_0$	$0,9u_0$
– Втрата швидкості вітру у площині обертання вітроколеса, v_1	$0,333 u_0$	$0,414 u_0$	$0,234 u_0$	$0,234 u_0$
– Повна втрата швидкості вітру на виході з вітроколеса, v_2	$0,666 u_0$	$0,586 u_0$	$0,234 u_0$	$0,234 u_0$
– Швидкість вітру за вітроколесом, u_{20}	$0,333 u_0$	$0,414 u_0$	$0,666 u_0$	$0,666 u_0$
– Залишкова швидкість вітру на лопатях вітроколеса (осьова швидкість збігання лопатей), u_2	–	–	$0,3 u_0$	$0,3 u_0$
– Середня швидкість вітру у робочій зоні, u	$0,666 u_0$	$0,707 u_0$	$0,65 u_0$	$0,65 u_0$
– Коефіцієнт використання енергії вітру, ξ	0,593	0,687	0,432	0,420
– Коефіцієнт осьового навантаження на вітроколесо, B	0,888	1,172	0,720	0,600

Таблиця 3. Залежність оптимальної частоти обертання удосконаленого ідеального вітроколеса тихохідного вітродвигуна ТВ–2,5 експериментальної вітроелектричної установки від швидкості живого вітру (n_i – оптимальна частота обертання, об/хв; u_{0i} – швидкість живого вітру, м/с)

u_{0i} , м/с	2	4	6	8	10	12
n_i , об/хв	15,3	30,6	45,8	61,2	76,4	91,6

Висновки. Запропонована модель ідеального вітроколеса дає можливість наблизити розрахункові характеристики вітроколеса до дійсних параметрів їх величин, визначити раціональні кути заклинення лопатей та оптимальну частоту його обертання. Отже така модель точніша і продуктивніша від відомих моделей, ділянка її застосування обмежується тихохідними вітроколесами з коефіцієнтом заповнення площини обертання в межах 0,7 – 1,2.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. *Твайделл Дж., Уэйр А.* Возобновляемые источники энергии. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
2. *Жарков В.Я., Жоров В.І., Жоров С.В.* Визначення верхньої межі коефіцієнта використання енергії вітру тихохідного вітроколеса. В зб.: Праці Таврійського держ. агротехнологічного ун-ту. Вип. 9. Т. 2. – Мелітополь: ТДАТУ, 2009. – С. 90-95.
3. *Жоров В.І.* Теоретичні засади підвищення ефективності тихохідної вітроустановки / Вісник аграрної науки. Спец. вип. №10. – 2010, травень. – С. 101 – 105.
4. *Жарков В.Я., Жоров В.І., Жоров С.В.* Енергетичні діаграми тихохідного вітроколеса. В зб.: Праці Таврійського держ. агротехнологічного ун-ту. –Т.3. – Мелітополь: ТДАТУ. – 2011. –Вип. 11. – С. 89-93

МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРА ИДЕАЛЬНЫМ ВЕТРОКОЛЕСОМ ТИХОХОДНОГО ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ

С целью приближения к реальному ветроколесу предложено в классической модели идеального ветроколеса учесть потери потока перед ветроколесом, а динамическое давление на ветроколесо находить через остаточную скорость потока на лопастях. Модель дает возможность рассчитать оптимальную частоту вращения и рациональные углы заклинивания лопастей ветроколеса.

Ключевые слова: ветроколесо, ветер, потоки воздуха, скорость, мощность, коэффициент использования, лопасть, частота вращения, угол заклинивания.

MODEL OF WIND ENERGY CONVERSION BY IDEAL WINDWHEEL OF SLOW – SPEED WINDMILL

With the purpose of approaching the real windwheel, it is suggested that in the classical model at the ideal windwheel the slow loss before the windwheel should be taken into account and the dynamic pressure on the windwheel should be determined using the remaining velocity of the flow on blades. The model allows calculations of the optimum rotation frequency and rational angles of locking of the windwheel blades.

Key words: windwheel, wind, air flows, velocity, power, rotation frequency, blade, angle of locking, coefficient of utilization.

УДК 621.548, 631.311.24

РЕГУЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ВІТРОДВИГУНА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

В.І. Жоров, Р.В. Мельник, кандидати технічних наук
Д.В. Тимощук, інженер
ННЦ «ІМЕСГ»

Обґрунтовані електрична схема та конструкція силових кіл блока автоматичного керування режимом навантаження тихохідного вітродвигуна експериментальної вітроелектричної установки.

Ключові слова: вітродвигун, навантаження, регулювання, блок керування, конструкція, виробіток енергії.

Проблема. При нерегульованих лопатях та стабільному вітрі потужність, яку вітродвигун віддає навантаженню, залежить від величини навантаження. При надмірному навантаженні вітродвигун зупиняється, його корисна потужність дорівнює нулю. При відсутності навантаження він обертається з синхронною частотою, не виконуючи роботи. Між цими режимами існує безліч робочих режимів, серед

© В.І. Жоров, Р.В. Мельник, Д.В. Тимощук.

Механізація та електрифікація сільського господарства. Вип. 97. 2013.