УДК 621.311.245 (045)

К. М. Сидоренко, асист., асп.,
П. С. Соченко, канд. техн. наук, доц.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТІВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ТЕРТЯ У ВІТРОЕЛЕКТРИЧНІЙ УСТАНОВЦІ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ

Національній авіаційний університет ІАСУ, e-mail: sknss@mail.ru

Досліджено можливості застосування електромагнітів у вітроелектричній установці з вертикальною віссю обертання. Наведено математичний опис магнітоелектричних процесів магнітного підвісу вітроелектричних установок , який показує ефективність використання електромагнітів для зменшення тертя в опорному підшипнику.

Ключові слова: вітроенергетика, вертикальновісьова вітроелектрична установка, електромагніт, тертя.

Вступ. Вітроенергетика у світі останнім часом розвивається надзвичайно динамічно. Світова спільнота приділяє багато уваги дослідженню вітроелектричних установок (ВЕУ), що підтверджується значними інвестиціями в цей сектор відновлювальної енергетики та рівнем зростання потужностей (близько 30 % щорічно). Енергетична криза, яка стає дедалі більш відчутною, виводить вітроенергетичну галузь на одне з перших місць в боротьбі з цією кризою та з існуючими екологічними проблемами людства.

Основне завдання малопотужної вітроелектричної установки (МВЕУ) – безперебійне і якісне забезпечення споживачів електроенергією. В умовах слабких і нестабільних вітрів, вирішення цього завдання постійно отримує нові предмети досліджень зумовлені технічним прогресом. Для середовища мігруючих вітрів надзвичайно перспективним є концентраційні ВЕУ [2; 3].

Аналіз і постановка завдання. Вітрові потоки в Україні мають поривчастий характер. 70 % території країни підпадає під слабкі повітряні потоки, швидкість яких становить до 4,5 м/с. Для ефективного перетворення таких вітрів у електроенергію необхідно використовувати ВЕУ з ефективною і якісною системою перетворення енергії потоку повітря в електроенергію. Світові тенденції розвитку та досліджень слабкопотокової енергетики зорієнтовані на ВЕУ з вітроприймальними пристроями: конфузорами, дифузорами, різних концентраторів потоку повітря і т. ін. Такі ВЕУ являють собою вертикально-вісьові турбіни, де максимально знижені втрати на тертя у підшипниках рухомих частин. Зменшити тертя у ВЕУ можна не лише технологічністю виробництва підшипників, але й зменшенням навантаження на підшипник ВЕУ завдяки електромагнітному опору.

Використання електромагнітів для зменшення тертя у ВЕУ. Як відомо, у ВЕУ з вертикальною віссю обертання відбуваються втрати енергії на тертя в опорних підшипниках, які залежать від ваги обладнання, закріпленого на вертикальній осі.

Силу тертя $F_{\text{тер}}$ в опорному підшипнику вертикальної осі визначають за формулою [1]

$$F_{\text{тер}} = \mu_{\text{т}} F_{\text{п}}, \qquad (1)$$

де $F_{\text{п}}$ – вага обладнання, що розташоване на осі ($F_{\text{п}} = mg$, m – маса обладнання; g – прискорення земного тяжіння); $\mu_{\text{т}}$ – коефіцієнт тертя (коли тіло перебуває в стані спокою і приводиться в обертання, для сталі $\mu_{\text{т}} = 0{,}15$ [1]).

Для компенсації від'ємного впливу сили тертя $F_{\text{тер}}$ застосовують магнітний підйом осі, що обертається, зокрема за допомогою електромагнітів. Силу магнітного підйому $F_{\text{м}}$ електромагнітів визначають відповідно до формули [1]:

$$F_{\text{м}} = BLI\,, \tag{2}$$

де l – довжина проводу електромагніта, м; I – струм у проводі, А; B – магнітна індукція, Тл = = В·с/м^2.

Магнітну індукцію B можна визначити за формулою

$$B = \mu_0 \mu H\,, \tag{3}$$

де μ_0 – магнітна стала (μ_0 = 1,257·10^{-6}), В·с/А·м; μ – відносна магнітна стала (μ = 600 для чавунного лиття, μ = 200 для сталі); H – напруженість магнітного поля, А/м.

Напруженість H визначають за формулою

$$H = \frac{IN}{l}\,, \tag{4}$$

де I – струм, А; N – кількість витків котушки електромагніту; l – довжина проводу, м.

З урахуванням залежностей (3) та (4) формула (2) набуває вигляду

$$F_{\text{м}} = \mu_0 \mu N I^2\,, \tag{5}$$

Якщо для компенсації від'ємного впливу сили тертя $F_{\text{тер}}$ застосувати два електромагніти, один з яких буде закріплений на вертикальній осі і обертатиметься разом з нею, а другий закріплений на корпусі навколо опорного підшипника, то в системі діятиме рівновага сил:

$$F_{\text{тер}} = F_{\text{м}}\,. \tag{6}$$

Підставляючи в рівняння (6) формули (1) і (5), отримуємо вираз для рівноваги сил:

$$F_{\text{п}} = 2\mu_0 \mu N I^2\,. \tag{7}$$

Із рівняння (7) можна визначити необхідне значення електричного струму для усунення від'ємного впливу опору на тертя:

$$I = \sqrt{\frac{F_{\text{п}}}{2\mu_0 \mu N}}\,. \tag{8}$$

Якщо, у формулу (8) підставити значення μ_0 μ = 1,257·10^{-6}·300 = 5·10^{-4}, то можна визначити необхідне значення струму I в електромагнітах залежно від ваги $F_{\text{п}}$, яка діє на опорний підшипник, та кількості витків N у котушках електромагнітів:

$$I = \sqrt{\frac{2000 F_{\text{п}}}{N}}\,.$$

Щоб визначити необхідну потужність, доцільно знайти електричну напругу U відповідно до формули

$$U = r_{\text{п}} I\,,$$

де $r_{\text{п}}$ – опір проводу; він становить:

$$r_{\text{п}} = \frac{\rho_e l}{S}\,, \tag{9}$$

де ρ_e – питома провідність (ρ_e=1,72·10^{-8} Ом·м для мідного проводу); S – площа перетину проводу ($S = \pi R_{\text{п}}^2$=3,14·10^{-6} м^2 для проводу з діаметром 2 мм).

Довжину l проводу електромагнітної котушки можна визначити за формулою

$$l = 2\pi R_{\text{к}} N\,, \tag{10}$$

де $R_{\text{к}}$ – середній радіус котушки електромагніта.

Якщо взяти радіус $R_к$ = 5 см, кількість витків у котушці N = 1000, то відповідно до формули (12) l=314 м, а опір $R_п$ проводу відповідно до формули (9) буде мати значення $R_п$=1,72 Ом.

Необхідну електричну потужність $P_{ел}$ можна визначити за формулою

$$P_{ел} = r_п I^2 . \tag{11}$$

Якщо використати формули (8) – (10), то формула (11) набуде такого загального вигляду:

$$P_{ел} = \frac{\rho_e R_к F_п}{R_п^2 \mu_0 \mu} . \tag{12}$$

Аналіз формули (12) показує, що електрична потужність $P_{ел}$, яка призначена для компенсації втрат ВЕУ на тертя в опорних підшипниках, залежить від ваги $F_п$ обладнання ВЕУ, яке обертається, від радіуса $R_к$ котушок електромагнітів та радіуса $R_п$. Із формули (14) не важко зробити дуже важливий висновок: якщо радіус $R_к$ не збільшувати, а збільшувати тільки радіус $R_п$ проводу обмотки, то електрична потужність $P_{ел}$ буде зменшуватись.

Таку конструкцію котушки можна забезпечити, якщо збільшувати довжину катушки при майже постійному радіусі $R_к$.

Таким чином, довга котушка електромагніту з малим радіусом $R_к$, яку виконано з товстого проводу, економічно більш вигідна, ніж широка котушка з великим радіусом $R_к$ і намотана тонким проводом.

Як відомо [5; 6], електрична потужність $P_{ВЕУ}(v)$ ВЕУ, яка залежить від швидкості вітру v, визначають формулою

$$P_{ВЕУ}(v) = 0,65 S_к W^3 (1-q)^3 v^3 \eta_1 \eta_2 , \tag{13}$$

де $S_к$ – площа вихідного отвору конфузора; W – коефіцієнт підвищення швидкості; q – коефіцієнт відносних утрат швидкості вітру в конфузорі; η_1 – ККД перетворення вітрової енергії в механічну (η_1 = 0,25 – 0,3); η_2 – ККД перетворення механічної енергії в електричну (η_2 = 0,8 – 0,9).

Можливості врахування втрат електричної потужності $P_{ВЕУ}(v)$ вітру, яку створює ВЕУ можна визначити за допомогою коефіцієнта $k(v)$ співвідношення електричної потужності $P_{ел}$, яка призначена для компенсації втрат на тертя способом підняття вертикальної осі ВЕУ за допомогою електромагнітів до електричної потужності ВЕУ $P_{ВЕУ}(v)$:

$$k(v) = \frac{P_{ел}}{P_{ВЕУ}(v)} , \tag{14}$$

де $P_{ел}$ і $P_{ВЕУ}(v)$ – потужності, значення яких визначаються за допомогою формул (12) і (13).

Значення коефіцієнта $k(v)$, що визначаються за формулою (14) наведено в табл. 1. А на рис. 1 показано відповідний графік.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта $k(v)$

Швидкість вітру v	Вага осі $F_п$ = 10 кг	Вага осі $F_п$ = 20 кг	Вага осі $F_п$ = 30 кг
2	$1,28 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$3,84 \cdot 10^{-5}$
3	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$7,6 \cdot 10^{-6}$	$1,138 \cdot 10^{-5}$
4	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$
5	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$1,64 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$
6	$4,7 \cdot 10^{-7}$	$9,49 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$

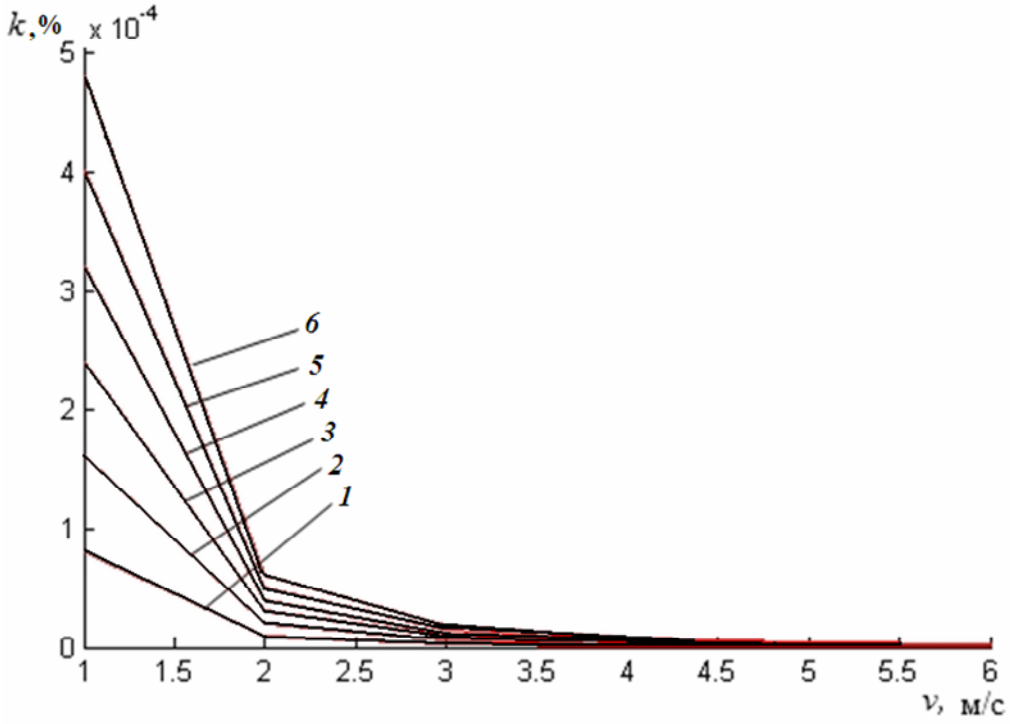

Рис. 1. Номограма залежності коефіцієнта k від швидкості вітру v та ваги $F_п$

1 – $F_п$ = 1 кг; *2* – $F_п$ = 2 кг; *3* – $F_п$ = 3 кг; *4* – $F_п$ = 4 кг; *5* – $F_п$ = 5 кг; *6* – $F_п$ = 6 кг

Для компенсації втрат енергії вітру на тертя можна лопаті вітродвигуна розташувати під кутом α відносно горизонтальної площини. За таких умов частина енергії вітру буде використана на під'ємну силу, яка буде компенсувати енергію витрачання на тертя. З цією метою необхідно напрям вектора швидкості v вітру змінити вверх під визначеним кутом α відносно горизонтальної площини за допомогою конфузорів, як це показано на рис. 2.

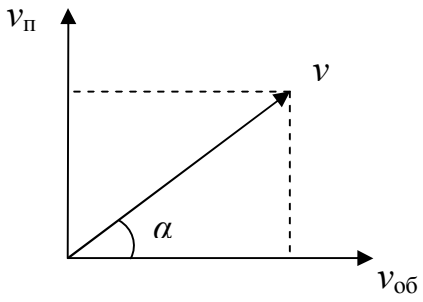

Рис. 2. Розкладення вектора швидкості

Як видно з рис. 1, вектор швидкості v вітру розкладається на два вектори: вектор швидкості вітру для обертання ВЕУ $v_{об}$ і вектор швидкості вітру, призначений для підняття осі обертання $v_п$ для компенсації втрат енергії ВЕУ на тертя. Ці вектори швидкості вітру $v_п$ і $v_{об}$ можна визначити залежностями від кута α нахилу конфузора відносно горизонтальної площини:

$$\left.\begin{aligned} v_п &= v\sin\alpha, \\ v_{об} &= v\cos\alpha. \end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

Як відомо [1], механічна потужність тертя $P_{тер}(v)$ буде залежати від швидкості обертання ВЕУ $v_{об}$ і із врахуванням формул (1) і (15) може бути визначена залежністю

$$P_{\text{тер}}(v) = \mu_{\text{т}} m(g - a\sin\alpha) v\cos\alpha\,. \tag{16}$$

Механічна потужність вітру у ВЕУ $P_{\text{ВЕУ}}(v)$ можна легко визначити за допомогою формули (13), якщо врахувати співідношення (15), тобто:

$$P_{\text{мв}}(v) = \frac{P_{\text{ВЕУ}}(v)\cos^3\alpha}{\eta_2}\,. \tag{17}$$

Як відомо, формули (18) та (19) неважко знайти коефіцієнт $k_1(v)$, який буде показувати, яка частина енергії вітру у ВЕУ буде витрачатись на компенсацію енергії тертя, яка визначається за допомогою формули (18), тобто

$$k_1(v) = \frac{P_{\text{тер}}(v)}{P_{\text{мв}}(v)}\,.$$

Розрахунки коефіцієнта $k_1(v)$ для різних значень швидкості вітру v та ваги $F_{\text{п}}$ і кута $\alpha = 15^\circ$ наведено в табл. 2. Відповідний графік показано на рис. 3.

Таблиця 2

Значення коефіцієнта $k_1(v)$

Швидкість вітру v	$F_{\text{п}} = 10$ кг, $\alpha = 15^\circ$	$F_{\text{п}} = 20$ кг, $\alpha = 15^\circ$	$F_{\text{п}} = 30$ кг, $\alpha = 15^\circ$
2	$k_1(v) = 3{,}6$	$k_1(v) = 7{,}123$	$k_1(v) = 10{,}7$
3	$k_1(v) = 1{,}6$	$k_1(v) = 3{,}166$	$k_1(v) = 4{,}75$
4	$k_1(v) = 0{,}89$	$k_1(v) = 1{,}781$	$k_1(v) = 2{,}67$
5	$k_1(v) = 0{,}57$	$k_1(v) = 1{,}14$	$k_1(v) = 1{,}71$
6	$k_1(v) = 0{,}396$	$k_1(v) = 0{,}791$	$k_1(v) = 1{,}19$

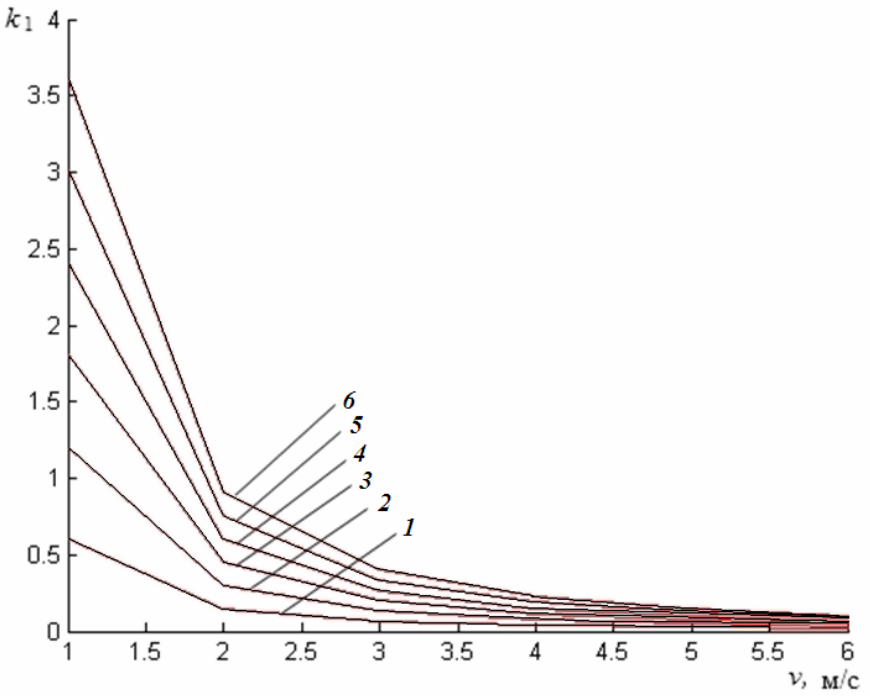

Рис. 3. Номограма залежності коефіцієнта k_1 від швидкості вітру v та ваги $F_{\text{п}}$:
1 – $F_{\text{п}} = 1$ кг; *2* – $F_{\text{п}} = 2$ кг; *3* – $F_{\text{п}} = 3$ кг; *4* – $F_{\text{п}} = 4$ кг; *5* – $F_{\text{п}} = 5$ кг; *6* – $F_{\text{п}} = 6$ кг

Аналіз отриманих результатів досліджень, які наведено в табл. 1 та 2, показують, що доцільно застосовувати електромагнітну компенсацію втрат енергії вітру на тертя.

Висновки. Метод електромагнітної компенсації слід застосовувати за допомогою електроенергії, нагромадженої в електричному акумуляторі. За таких умов ВЕУ буде успішно працювати за дуже малих швидкостей вітру, які існують більш тривалий час, ніж вітри з великими швидкостями. Тому такий метод дозволить ВЕУ працювати більш тривалий час і виробляти більше електроенергії.

Список літератури

1. *Кухлинг Х.* Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М.: Изд-во «Мир», 1982. – 276 с.
2. *Пат. 59964 А* Україна, МПК F03D 9/02. Вітроенергетична установка/ О. А. Зеленков, П. С. Соченко, К. М. Сидоренко, О. В. Пазюк; заявник і патентовласник Національний авіаційний університет. – №2002129981 заявл. 11.12.2002; опубл. 15.09.2003 бюл. № 9/2003.
3. *Пат. 18476* Україна, МПК F03D 9/02. Пристрій підвищення ефективності використання енергії вітру/ Синєглазов В.М., Зеленков О. А., Соченко П. С., Голік А. П., Клебанівський С. В., Сидоренко К. М.; заявник і патентовласник Національний авіаційний університет. – №u200604663; заявл. 26.04.2006; опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11/2006.
4. *Пат. 45474* Україна, МПК G05B 17/00. Спосіб оперативного управління комбінованою системою використання енергії малопотужних вітрів та сонячного випромінювання / Синєглазов В. М., Зеленков О. А., Соченко П. С., Захарчевська І. К., Сидоренко К. М., Голік А. П., Галяс І. Г.; заявник і патентовласник Національний авіаційний університет. – №u200905973; заявл. 10.06.2009; опубл. 10.11.2009. Бюл. № 21/2009.
5. *Борсук Є. П.* Перспективи концентрації вітру для видобутку електроенергії. Енергетика та електрифікація / Є. П. Борсук, К. М. Сидоренко. – 2007. – №3. – С. 66 – 69.
6. *Сидоренко К. М.* Регулювання напруги електрогенератора концентраційних вітроустановок / К. М. Сидоренко. – Львів: ЕлектроІнформ, – 2009 – №4 – С. 6 – 8.
7. *Иванов Ю. И.* Микропроцессорные устройства систем управления / Ю. И. Иванов, В. Л. Югай – Таганрог: ТРТУ. – 2005. – 133 с.

К. Н. Сидоренко, П. С. Соченко

Эффективность использования электромагнитов для уменьшения трения в ветроэлектрической установке с вертикальной осью вращения

Исследованы возможности применения электромагнитов в ветроэлектрической установке с вертикальной осью вращения. Приведено математическое описание магнитоэлектрических процессов магнитного подвеса ветроэлектрической установки, которое показывает эффективность использования электромагнитов с целью уменьшения трения в опорном подшипнике.

K. M. Sydorenko, P. S. Sochenko

The effectiveness of the use of magnets to reduce friction in the vertical wind power plant

A study of the possibility of using electromagnets to vertical wind power plant. Show a mathematical description of the magnetoelectric processes of magnetic bracket of vertical wind power plant, which shows the effectiveness of using magnets to reduce friction in the support bearing.