

Отже, розроблена математична модель руху пружного елемента шатуна лемішно-коливного органа, власна частота якої не залежить від маси коливної частини та маси вороху і на основі якої визначені основні конструктивні параметри лемішного копача.

1. Козібрда Я.І. *Механіко-математична модель коливання пружного елемента лемішно-коливного викопувального органу* // *Вест. національного технічного університету "ХПИ"*. – Т. 2. – С. 130–137. 2. Василенко П.М. *Теория движения частиц по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин.* – К.: УАСХИ, 1964. – 284 с. 3. Хвингия М.В. *Вибрация пружин.* – М.: Машиностроение, 1969. – 194 с.

УДК 621.548

**М.Б. Кудлик, І.С. Лозовий\***

Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра нарисної геометрії та графіки,  
\*кафедра теоретичної механіки

## **МОДЕЛЬ РОБОТИ АВТОНОМНОЇ ТИХОХІДНОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ**

© Кудлик М.Б., Лозовий І.С., 2003

**Подано математичну модель автономної тихохідної вітроенергетичної установки, яка призначена для роботи в умовах слабких та помірних потоків повітря. Рівняння дають змогу дослідити і прогнозувати режим її роботи за різних умов навантажень вітру, а також відбору потужності.**

**Ключові слова – автономна вітроенергетична установка, електродинамічне гальмо, оптимальний контроль.**

**Mathematical model of working of the autonomous wind-power plant is presented. The plant is designet for work in conditions of load due to weak and moderate wind. These equations allow to investigate and prognosticate regimes under different conditions of load due to wind and selection power plant, electrodynamic brake, optimum control.**

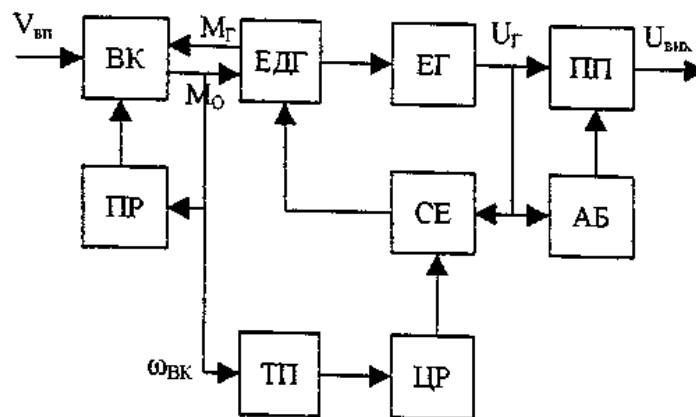
Важливий вплив на економічну ситуацію в Україні має енергетичний чинник, однак Україна знаходиться в несприятливих умовах щодо забезпечення класичними енергоносіями. Тому важливим напрямком стратегії економічного розвитку є розвиток нетрадиційних відновлюваних джерел енергії, зокрема використання енергії вітру. Так, в Україні буда прийнята "Комплексна програма будівництва вітрових електростанцій на період 1997–2010 років", затверджена Указом Президента України. Специфікою повітряних потоків України є їхня мала питома потужність [1], [2], що не дає змогу широко використовувати досвід світової практики будівництва вітроенергетичних установок (ВЕУ) [3].

Тому головною метою розробок, що проводяться в Національному університеті "Львівська політехніка" щодо збільшення можливих енергопотужностей країни, використовуючи нетрадиційні джерела енергії, є розробка, проектування та виробництво дешевих у виготовленні, простих в експлуатації та обслуговуванні, довговічних ВЕУ, що можуть працювати в автономному режимі [4], [5].

Для забезпечення цього режиму потрібно розв'язати задачу балансу потужності – під час довільного електроспоживання, забезпечити умови роботи електричного генератора у

широкому діапазоні зміни швидкості вітру. Можливий варіант розв'язання задачі полягає у використанні тихохідного вітроколеса з пружинним регулятором повороту лопатей та електродинамічного гальма. Застосування у конструкції ВЕУ тихохідного вітроколеса дає можливість використання їх у районах з малими і середніми швидкостями вітрових потоків, а також встановлення їх безпосередньо біля житлових будинків. Пружинний регулятор, окрім функції регулювання, забезпечує захист лопатей вітроколеса від uszkodжень під час шквальних поривів вітру.

При проектуванні автономної ВЕУ постають два завдання. По-перше, забезпечення умов роботи електричного генератора під час великих швидкостей або поривах вітру водночас з малим або відсутнім відбором генерованої потужності. По-друге, підтримання енергозабезпечення за умови малої швидкості вітру або штилю. Ці проблеми можна розв'язати комплексно, використовуючи у ланці передачі потужності від вітроколеса до споживача контур зворотного зв'язку з елементом регулювання зворотного перенаправлення потужності та акумулятора електричної енергії. Кількість потужності, відібраної від вітрового потоку для збереження загального балансу потужності здійснюється за допомогою пружинного регулятора, який змінює кут повороту лопатей вітроколеса відносно напрямку вітру. Структурна схема ВЕУ з електродинамічним гальмом і пружинним регулятором вітроколеса зображена на рисунку.



Структурна схема ВЕУ

На структурній схемі вітровий потік зі швидкістю  $V_{вп}$  діє на вітроколесо ВК. Обертний момент  $M_0$  через вал електродинамічного гальма ЕДГ передається на електричний генератор ЕГ. Вироблена електрична енергія проміжним перетворювачем ПП формується у якісну синусоїдну напругу  $U_{внх}$ , що передається споживачам. Невелика надлишкова потужність використовується для заряджання акумуляторної батареї АБ, яка за відсутності генерованої потужності створює резервне енергозабезпечення. Під час порушення балансу потужності, що виявляється у перевищенні норми вихідної напруги  $U_Г$  електричного генератора ЕГ або у перевищенні розрахункової швидкості обертання  $\omega_{вк}$  вітроколеса ВК з тахоперетворювача ТП та вихідних виводів електричного генератора ЕГ, на центральний регулятор ЦР надходять сигнали. Центральний регулятор ЦР виробляє керуючий сигнал для силового елемента СЕ, який частину вихідної потужності електричного генератора ЕГ передає електродинамічному гальму ЕДГ. Електродинамічне гальмо створює додатковий гальмівний момент  $M_Г$  на валу вітроколеса ВК, стабілізуючи швидкість його обертання за рахунок розвертання лопатей супроти опору елементів пружинного регулятора ПР. У роботах [6], [7], [8] розглянуто принцип дії профільованих поворотних

лопатеї вітроколiс у потоці повітря. Побудована на підставі структурної схеми автономна ВЕУ, розрахована на середньостатистичну швидкість вітру для місця її монтування, може забезпечити надійне й якісне генерування електричної енергії.

Розрахунок та конструювання автономної ВЕУ, які здійснюються за наперед заданими технічними характеристиками відповідно до умов території їх монтування, неможливі без аналізу типових режимів роботи. Номінальні параметри ВЕУ розраховуються за умов генерування номінальної потужності при середніх річних швидкостях вітру  $V_{ВП,ном}$ . Перевіркові розрахунки на надійність здійснюються за критичними умовами або особливими режимами. Параметри режимів задаються в узагальнену систему рівнянь для розрахунку основних характеристик та для конструктивних розрахунків. Аналізуючи умови роботи автономних ВЕУ, можна розрізнити чотири характерні режими: мінімальний, номінальний, надлишковий і критичний.

Під час мінімального режиму швидкість вітрового потоку  $V_{ВП}$  недостатня для створення мінімально можливої робочої напруги на виводах електричного генератора ЕГ. Енергозабезпечення споживачів підтримується завдяки заряду акумуляторних батарей АБ, а тривалість роботи у такому режимі  $T_p$  визначається ємністю акумуляторної батареї  $Q_{АБ}$  та середнім струмом споживання  $I_{сп}$ :

$$T_p = \frac{Q_{АБ}}{I_{сп}}. \quad (1)$$

За заданими значеннями  $T_p$  та  $I_{сп}$  визначається ємність акумуляторної батареї АБ.

Номінальний режим відповідає розрахунковій середньостатистичній швидкості вітру. Відібрана вітроколесом потужність дорівнює номінальній і напруга  $U_{Г}$  на виводах електричного генератора ЕГ дорівнює номінальній напрузі  $U_{Г,ном}$ , струм  $I_{АБ}$  заряду чи розряду акумуляторної батареї АБ та струм  $I_{ЕД}$  живлення електродинамічного гальма ЕДГ дорівнюють нулеві. Тобто в узагальнену систему рівнянь підставляються значення:

$$\begin{cases} V_{ВП} = V_{ВП,ном}; \\ \omega_{ВК} = \frac{d\varphi_{ВК}}{dt} = \omega_{ВК,ном}; \\ U_{Г} = U_{Г,ном}; \\ I_{Г} = I_{сп}; \\ I_{АБ} = I_{ЕД} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Надлишковий режим характеризується вищою від номінальної швидкістю  $V_{ВП}$  вітру, але такою, яка не виходить за межі можливих розрахункових значень. У такому режимі швидкість обертання  $\omega_{ВК}$  вітроколеса більша від номінального значення, напруга  $U_{Г}$  генератора дає можливість створити струм  $I_{АБ}$  заряду акумуляторної батареї АБ, а надлишковий струм генератора передається в електродинамічне гальмо ЕДГ; гальмівний момент та дія вітрового потоку стискають пружинні елементи, розвертають лопаті під меншим кутом повороту до вітрового потоку, наближаючи швидкість обертання вітрового колеса до номінального значення:

$$\begin{cases} V_{ВП} > V_{ВП,ном}; \\ \omega_{ВК} \geq \omega_{ВК,ном}; \\ U_{Г} \geq U_{Г,ном}; \\ I_{Г} = I_{сп} + I_{АБ} + I_{ЕД}. \end{cases} \quad (3)$$

Критичний режим відповідає шквальним поривам вітру зі швидкістю вітрового потоку  $V_{кр}$ . Під час різкого зростання кутової швидкості  $\omega_{ВК}$  обертання вітроколеса центральний регулятор ЦР повністю відкриває силовий елемент СЕ, і вся генерована потужність електричного генератора ЕГ передається на електродинамічне гальмо ЕДГ, яке створює максимальний гальмівний момент  $M_{Г}$  на валу вітроколеса. Вітровий потік, діючи на лопаті вітроколеса, долає опір пружинних елементів, повертаючи їх площини за напрямком вітрового потоку. Швидкість обертання вітроколеса і напруга на виводах електричного генератора менші від номінальних значень. Енергоспоживання здійснюється від акумуляторної батареї АБ. В узагальнену систему рівнянь підставляються значення розрахункових величин:

$$\begin{cases} V_{ВП} = V_{кр}; \\ \omega_{ВК} < \omega_{ВК.ном}; \\ U_{Г} \geq U_{Г.ном} \omega_{ВК}; \\ I_{Г} = I_{ЕД}; I_{сн} = I_{АБ}. \end{cases} \quad (4)$$

Регулювання потоків потужності у ВЕУ здійснюється пружинним регулятором та електродинамічним гальмом, момент опору якого є функцією кутової швидкості  $\omega_{ВК}$  обертання його ротора і струму  $I_{ЕД}$ , що протікає по обмотках статора. Напруга на виводах генератора залежить від кутової швидкості обертання ротора, струму збудження та вихідного струму. Тому загальний момент опору на валу вітроколеса описується степеневими функціями другого порядку від кутової швидкості  $\omega_{ВК}$  та інших параметрів. Використовуючи рівняння Лагранжа другого роду, можна записати рівняння руху лопатей вітроколеса, швидкості обертання вітроколеса, роторів електродинамічного гальма і генератора у вигляді (5).

У системі рівнянь  $I_{Л}$ ,  $I_{К}$ ,  $I_{ЕД}$ ,  $I_{ЕГ}$  – моменти інерції відповідно лопатей, вітроколеса, роторів електродинамічного гальма і електричного генератора відносно власних осей обертання;  $\beta$ ,  $\phi_{К}$ ,  $\phi_{ЕД}$ ,  $\phi_{ЕГ}$  – відповідно кути повороту лопатей відносно маху, вітроколеса, роторів електродинамічного гальма і електричного генератора відносно власних осей обертання;  $C_{Л}$  – жорсткість пружинного елемента зворотного руху лопатей;  $C_{КГ}$ ,  $C_{ЕД,ЕГ}$  – відповідно жорсткості пружинних елементів, за допомогою яких з'єднані між собою вітроколесо з електродинамічним гальмом та електродинамічне гальмо з електричним генератором;  $\beta_{п}$  – початковий кут установлення лопатей;  $\rho$  – питома маса повітря;  $V_{ВП}$  – швидкість потоку повітря;  $h_{Л}$  – плече рівнодіючої сили дії потоку повітря на лопать відносно осі маху;  $R_{вн}$ ,  $R_{зв}$  – відповідно внутрішня та зовнішня довжини лопатей;  $r$  – змінний радіус;  $\gamma_r$  – кут профілю лопаті на відстані  $r$ ;  $A_{ЕД}$ ,  $A_{ЕГ}$  – зовнішні механічні параметри відповідно електродинамічного гальма й електричного генератора;  $M_{ВК}$ ,  $M_{ЕД}$  – відповідно обертальний та гальмівний моменти вітроколеса та електродинамічного гальма;  $i_{ЕГ}$ ,  $i_{ЕД}$ ,  $i_{АБ}$ ,  $i_{СП}$  – миттєві значення струмів відповідно електричного генератора, електродинамічного гальма, акумуляторної батареї та навантаження ВЕУ;  $U_{Г}$  – напруга на виводах електричного генератора;  $C_{М}$ ,  $C_{Е}$  – конструкційні постійні електродинамічного гальма та електричного генератора відповідно;  $R_{О}$  – опір силової обмотки електричного генератора.

Подана система рівнянь (5) є математичною моделлю роботи автономної ВЕУ, що є набором взаємопов'язаних нелінійних диференціальних рівнянь, аналітичний розв'язок яких є проблематичним. Тому для її числового розв'язку був розроблений пакет прикладних програм "VEUEDG".

$$\left\{ \begin{aligned}
 I_{\text{Л}} \frac{d^2 \beta}{dt^2} &= -C_{\text{Л}} (\beta - \beta_{\text{П}}) + 2\pi\rho V_{\text{ВП}} h_{\text{Л}} \int_{R_{\text{вн}}}^{R_{\text{в}}} r \cdot \\
 &\cdot \left( V_{\text{ВП}} \cos(\gamma_r + \beta) - \dot{\varphi}_R r \sin(\gamma_r + \beta) \right) dr; \\
 I_{\text{К}} \frac{d^2 \varphi_{\text{К}}}{dt^2} &= -C_{\text{КГ}} (\varphi_{\text{К}} - \varphi_{\text{ЕД}}) + M_{\text{БК}}; \\
 I_{\text{ЕД}} \frac{d^2 \varphi_{\text{ЕД}}}{dt^2} &= -C_{\text{КГ}} (\varphi_{\text{ЕД}} - \varphi_{\text{К}}) - \\
 &- C_{\text{Г.ЕГ}} (\varphi_{\text{ЕД}} - \varphi_{\text{ЕГ}}) - A_{\text{ЕД}} \frac{d\varphi_{\text{ЕД}}}{dt} i_{\text{ЕД}}; \\
 I_{\text{ЕГ}} \frac{d^2 \varphi_{\text{ЕГ}}}{dt^2} &= -C_{\text{ЕД.ЕГ}} (\varphi_{\text{ЕГ}} - \varphi_{\text{ЕД}}) - A_{\text{ЕГ}} \frac{d\varphi_{\text{ЕГ}}}{dt} i_{\text{ЕГ}}; \\
 \frac{M_{\text{БК}} - M_{\text{ЕД}}}{U_{\text{Г}}} \cdot \frac{d\varphi_{\text{ЕГ}}}{dt} &= i_{\text{ЕГ}} = i_{\text{СП}} + i_{\text{ЕД}} + i_{\text{АБ}}; \\
 M_{\text{БК}} &= 2\pi\rho V_{\text{ВП}} \int_{R_{\text{вн}}}^{R_{\text{в}}} r^2 (V_{\text{ВП}} \cos(\gamma_r + \beta) - \\
 &- \dot{\varphi}_R r \sin(\gamma_r + \beta)) \sin(\gamma_r + \beta) dr; \\
 M_{\text{ЕД}} &= C_{\text{М}} \omega_{\text{БК}} i_{\text{ЕД}}; \\
 U_{\text{Г}} &= C_{\text{Е}} \omega_{\text{БК}} i_{\text{ЗБ}} - i_{\text{ЕГ}} R_{\text{О}}.
 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Використовуючи математичну модель, можна з достатньою для виробництва точністю розрахувати характеристики електродинамічного гальма, пружинних елементів і центрального регулятора відповідно до параметрів вітроколеса автономної ВЕУ та умов її роботи, що дозволяє підвищити ефективність її використання на 5–18% залежно від зони використання на теренах України. Створені програми чисельного аналізу дозволяють автоматизувати ці розрахунки, проаналізувати роботу ВЕУ на всіх режимах її експлуатації.

1. Гос. ком. по гидрометеорологии. Украинское республиканское управление по гидрометеорологии: Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 10. Украинская ССР. Кн. 1, кн. 2. Ленинград. Гидрометеиздат, 1990. – 420 с. 2. Кудлик М. Развитие альтернативной энергетики – актуальна задача розбудови України // Вісн. Львівського державного аграрного університету. – 2001. – № 5. – С. 337. 3. Твайдел Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии / Пер. с англ. под ред. В. А. Коробкова. – М.: Энергоатомиздат, 1990, – 392 с. 4. Кудлик М., Лозовий І. Оптиміальні швидкість обертання тихохідного колеса та профіль його лопатей за критерієм максимального відбору потужності зі слабких потоків повітря // Вісн. Національного університету «Львівська політехніка». – Львів. – 2001. 5. Кудлик М., Лозовий І. Вплив профілю лопаті тихохідного вітроколеса, орієнтації та швидкості його обертання та відбір ним потужності з потоку повітря // Вісн. Національного університету «Львівська політехніка». – Львів. – 2002. 6. Тези доповідей 5-того міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові (МСУІМЛ-5). – Львів, 16–18 травня 2001 р. – С. 24. 7. Лозовий І., Кудлик М. Моделювання роботи лінійно-профільованої лопаті вітроколеса з горизонтальною віссю обертання // Сб. тр. IV Международной научно-практической конференции «Современные проблемы геометрического моделирования». Ч. 2. Мелитополь, 1997. – С. 96–97. 8. Лозовий І., Придиба В., Кудлик М. Взаємодія повітряного потоку з робочими лопатями горизонтально-осьового вітроколеса та аналіз впливу їх геометрії на ефективність його роботи // Машинознавство. – 1998. – № 9–10. – С. 17–20.