

Кузьо І. Теоретичні аспекти моделювання вітроенергетичних установок / Кузьо І., Корендій В. // Вісник ТНТУ. — 2011. — Том 16. — № 3. — С.85-94. — (машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).

УДК 621.548

І. Кузьо, докт. техн. наук; В. Корендій

Національний університет «Львівська політехніка»

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

**Резюме.** Наведено теоретичні аспекти моделювання вітроенергетичної установки, яке проводиться з метою розрахункової перевірки конструктивних рішень, розроблення та апробації можливих алгоритмів керування її роботою. Розглянуто загальну структурну схему вітроенергетичної установки, проаналізовано принципи її функціонування та розроблено графічну інтерпретацію потоків потужності. Проаналізовано загальні етапи моделювання – розробку математичних моделей та їх подальшу реалізацію за допомогою програмних комплексів на ЕОМ (комп'ютерне моделювання) для різних функціональних систем і елементів вітроустановки.

**Ключові слова:** математичне моделювання, вітроенергетична установка, структурна схема, потік потужності, вітроколесо, процес комп'ютерного моделювання.

I. Kuzyo, V. Korendiy

## THEORETICAL ASPECTS OF MODELING OF WIND-POWER PLANTS

**The summary.** Theoretical aspects of modeling of the wind-power plant, which is conducted with the purpose of estimated investigation of design concepts, development and approbation of possible algorithms of operation of its work, are introduced in the article. The general structure of the wind-power plant is considered, principles of her functioning are analyzed and graphic interpretation of flows of power is worked out. The general phases of modeling – development of mathematical models and their further realization by means of programmatic complexes on computer (computer simulation) are analyzed for different functional systems and elements of the wind-power plant.

**Key words:** mathematical modeling, wind-power plant, design of structure, flow of power, wind-wheel, process of computer modeling.

**Постановка проблеми.** Можливості вітроенергетики як альтернативного джерела електроенергії все ще залишаються нереалізованими у зв'язку з сукупністю проблем, розв'язання яких вимагає спільних зусиль інженерів-механіків, екологів, енергетиків, а також спеціалістів у галузі електроніки та систем керування.

До сучасної автономної вітроенергетичної установки (ВЕУ) висуваються наступні вимоги [1]: максимальне використання енергії вітру, висока надійність та безпека експлуатації, можливість функціонування в автоматичному режимі, забезпечення високої якості електроенергії тощо. Вимоги ефективності, надійності і безпеки функціонування ВЕУ частково забезпечуються при проектуванні за рахунок раціонального розміщення та встановлення обладнання з урахуванням аналізу вітрового ресурсу регіону його використання, а також шляхом розроблення оптимальної конструкції установки. Для стабільного функціонування ВЕУ, що розміщена у віддалених та важкодоступних районах, необхідна наявність надійно працюючої системи управління, яка забезпечить надійну експлуатацію обладнання без щоденного втручання оператора. При цьому гарантувати повну автоматизацію функціонування ВЕУ можна тільки за наявності ефективної системи автоматичного керування як у процесі відбору та перетворення енергії, так і при її накопиченні й живленні споживачів. Сучасна ВЕУ являє собою складний комплекс механічного, електротехнічного й електронного обладнання, що взаємодіє одне з одним у процесі виробництва, перетворення, накопичення і передавання електроенергії споживачам.

Тому з метою підвищення ефективності використання ВЕУ необхідно розвивати методи досліджень як кожного елемента зокрема, так і їх взаємодії як системи, що дозволить удосконалювати математичні моделі та системи керування ВЕУ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Моделюванню роботи, динаміки, систем керування вітроенергетичних установок присвячено багато публікацій [1–7]. Проте в більшості з них поверхнево описується сам процес моделювання, а увага, здебільшого, приділяється конкретній проблемі (певному типу ВЕУ, її системі або елементу). Наприклад, у роботі [1] описується робота адаптивної системи керування, у [2] – методика визначення оптимального складу вітроелектричної станції, у [3] – вітроенергетичний комплекс малої потужності, у публікації [4] – динамічні режими ВЕУ турбогенераторного типу, у [5] – динаміка горизонтально-пропелерної ВЕУ та робота активної системи керування шляхом зміни кута атаки лопатей, у [6] – обертання ротора генератора вітротурбіни, у [7] – функціонування механізму стабілізації кутової швидкості обертання вітроколеса. При цьому недостатньо аналізується загальний зміст кожного з етапів моделювання – розробки математичних моделей та їх реалізації у програмних комплексах.

**Метою даної роботи** є аналіз теоретичних аспектів побудови та реалізації математичних моделей роботи окремих систем вітроенергетичної установки на основі дослідження взаємозв'язків між механічними, електротехнічними та електронними елементами ВЕУ.

**Виклад основного матеріалу.** Математичне моделювання та його реалізація з допомогою програмних комплексів на ЕОМ (комп'ютерне моделювання) проводяться з метою розрахункової перевірки конструктивних рішень, розроблення та апробації можливих алгоритмів керування роботою ВЕУ. Для більш гнучкого використання комп'ютерна модель ВЕУ повинна мати блочну структуру. Кожен блок моделює окрему підсистему, яка описується власною математичною моделлю [1]. Тому спершу ми проаналізуємо загальну характеристику математичної моделі ВЕУ, а після цього опишемо основні блоки комп'ютерного моделювання та математичні моделі підсистем.

Нехай необхідно змоделювати роботу ВЕУ, структурна схема якої наведена на рис. 1. На схемі прийнято такі позначення:  $V_B$  – швидкість набігаючого на вітроколесо повітряного потоку, АДХ – аеродинамічна характеристика лопатей,  $M_A$  – аеродинамічний момент,  $J$  – момент інерції вітроколеса,  $\omega$  – кутова швидкість обертання вітроколеса,  $t$  – час,  $M_E$  – електромагнітний момент,  $\omega'_t$  – кутове пришвидшення вітроколеса,  $i_{зб}$  – струм обмотки збудження генератора,  $X$  – вплив навантаження на генератор,  $R$  – опір баластного навантаження,  $i_\Sigma$ ,  $U_\Sigma$  – сумарні струм і напруга генератора,  $i_K$ ,  $U_K$  – струм і напруга корисного навантаження,  $i_B$ ,  $U_B$  – струм і напруга баластного навантаження.

Обертання лопатевого горизонтально-осьового вітроколеса відбувається під дією аеродинамічних моментів, гальмівного моменту тертя, пропорційного кутовій швидкості, та моменту навантаження з боку електрогенератора [2]. Реалізація математичних моделей повинна давати змогу розраховувати аеродинамічні сили і моменти, які діють на кожну лопать окремо і на вітроколесо в цілому. Вони визначаються залежно від швидкості вітру  $V_B$ , кутової швидкості обертання  $\omega$  і кута повороту  $\varphi$  вітроколеса. При розрахунку аеродинамічних сил, що діють на кожну лопать, необхідно враховувати збурення діючого на неї повітряного потоку, яке спричиняється рухом інших лопатей. Ці збурення можна враховувати у вигляді поправок до швидкості набігаючого потоку – індуктивних швидкостей, які мають систематичну і випадкову складові.

Кут встановлення кожної лопаті відносно напрямку повітряного потоку може

задаватися постійною величиною, однаковою для всіх лопатей, або змінною, яка залежить від швидкості набігаючого потоку повітря, для кожної лопаті окремо. При цьому найперспективнішими є горизонтально-осьові ВЕУ з можливістю регулювання кута повороту лопатей навколо власної осі для забезпечення підтримки сталості кутової швидкості вітроколеса в умовах зміни швидкості й напрямку вітру, а також навантаження на вітроколесо [5].

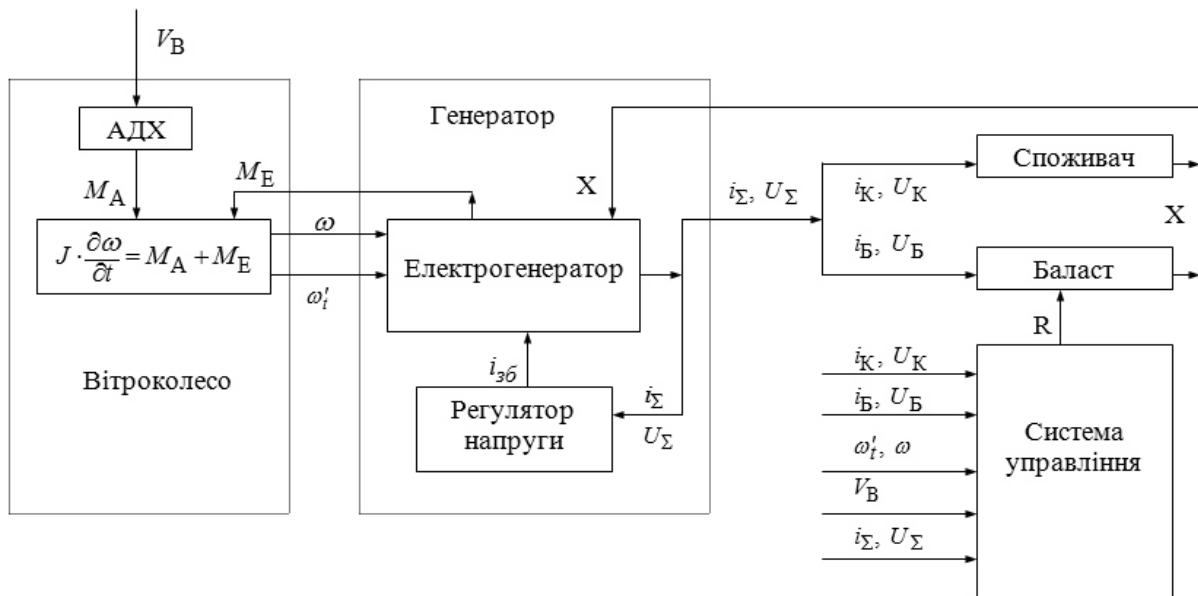


Рисунок 1. Структурна схема вітроенергетичної установки

У нашому випадку з метою стабілізації кутової швидкості обертання вітроколеса застосуємо механізм повороту лопатей навколо власної осі з допомогою пружинних регуляторів, який працює наступним чином: при збільшенні швидкості вітру, а отже, й тиску повітря на ділянки лопаті, збільшується кут атаки лопаті, долаючи опір пружинного регулятора. Таким чином, зменшується площа, яка обдувається потоком повітря, а частота обертання вітроколеса залишається практично незмінною [7]. Коефіцієнт пружності та сила початкового стиснення пружини підбирається, виходячи з розрахункової кутової швидкості обертання вітроколеса. Структурна схема і графічне зображення механізму повороту лопатей зображені на рис. 2.

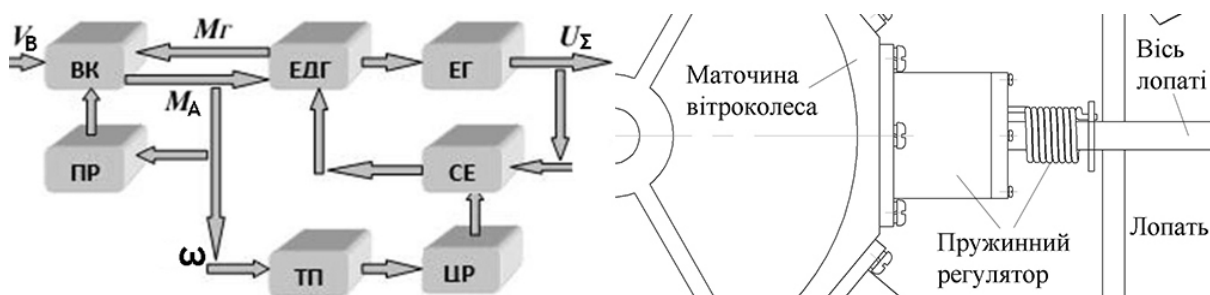


Рисунок 2. Структурна схема та графічне зображення механізму повороту лопатей

На структурній схемі вітровий потік зі швидкістю  $V_B$  діє на вітроколесо ВК. Обертний момент  $M_A$  через вал електродинамічного гальма ЕДГ передається на електричний генератор ЕГ. Під час порушення балансу потужності, що проявляється у перевищенні норми вихідної напруги  $U_\Sigma$  електричного генератора ЕГ або у перевищенні розрахункової швидкості обертання  $\omega$  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 ЕДГ створює додатковий гальмівний момент  $M_{\Gamma}$  на валу вітроколеса ВК, стабілізуючи швидкість його обертання за рахунок розвертання лопатей супроти опору елементів пружинного регулятора ПР [3, 7].

На одному валу з вітроколесом закріплений ротор електрогенератора. В нашому випадку генератор є багатополусною, синхронною електричною машиною зі змішаним збудженням. Магнітний потік у його повітряному зазорі створюється постійними магнітами та обмоткою збудження, яка розміщена на статорі. Для регулювання вихідної напруги генератор обладнаний регулятором, який керує струмом обмотки збудження. Для додаткового забезпечення стабільності частоти обертання вітроколеса система керування ВЕУ має можливість змінювати величину баластного навантаження. Це необхідно здійснювати таким чином, щоб сумарна поточна потужність споживача і баласту перевищувала поточну потужність вітроколеса, яка відбирається ним з потоку повітря, при швидкості його обертання, що перевищує задану, і навпаки.

Баланс потужності, необхідний для здійснення режимів рівномірного обертання, розгону і гальмування вітроколеса, виражається такими співвідношеннями:

$$W_B \cdot \xi = E_p + W_{\text{тр}} + W_{\Gamma}, \quad \text{або} \quad W_B \cdot \xi = J \cdot \omega \cdot \omega'_t + W_{\text{тр}} + Q + W_B + W_K, \quad (1)$$

де  $W_B$  – потужність набігаючого потоку повітря,  $\xi$  – коефіцієнт використання енергії вітру,  $E_p$  – зміна кінетичної енергії вітроколеса,  $W_{\text{тр}}$  – втрати потужності на тертя,  $W_{\Gamma}$  – потужність, яка надходить до генератора,  $Q$  – теплові втрати потужності,  $W_B$  – потужність баластного навантаження,  $W_K$  – потужність корисного навантаження.

Із формули (1) можна виразити значення потужності баластного навантаження для різних режимів роботи установки – ідеального регулювання ( $\omega'_t = 0$ ), розгону ( $\omega'_t > 0$ ), гальмування ( $\omega'_t < 0$ ) відповідно

$$W_B = W_B \cdot \xi - W_{\text{тр}} - Q - W_K, \quad W_B < W_B \cdot \xi - W_{\text{тр}} - Q - W_K, \quad W_B > W_B \cdot \xi - W_{\text{тр}} - Q - W_K. \quad (2)$$

Графічна інтерпретація потоків потужності у ВЕУ зображена на рис. 3.

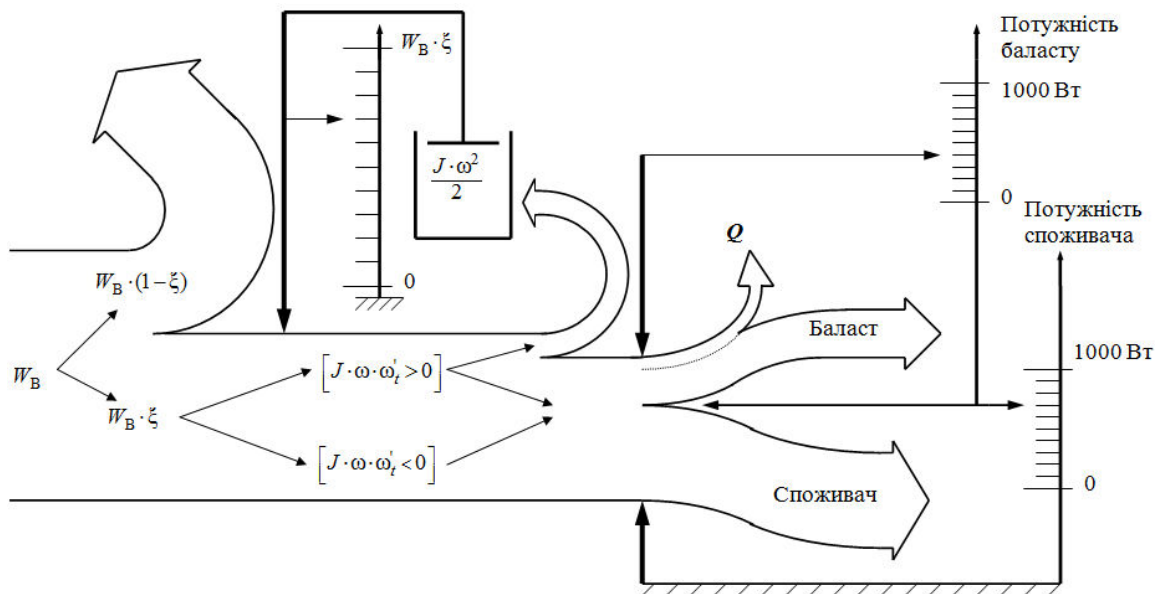


Рисунок 3. Графічна інтерпретація потоків потужності у вітроенергетичній установці

Тепер перейдемо до описання блоків математичного та комп'ютерного моделювання підсистем ВЕУ. Розпочнемо із блока розрахунку випадкової складової швидкості вітру. Випадкову складову вітру можна визначати двома варіантами. У першому варіанті зміна швидкості (пришвидшення) вітру  $a_B$  приймається кусково-постійною функцією часу. Інтервал постійності  $\tau$  не змінюється з часом. Значення пришвидшення розподілене за нормальним законом. Тому для обчислення зміни швидкості використовується формула

$$\Delta V_B = \int_0^T a_B(t) dt = \tau \cdot \sum_{k=1}^{N=T/\tau} a_{Bk}, \quad (3)$$

де  $T$  – загальний час роботи вітроустановки.

У другому випадку пришвидшення  $a_B$  приймається випадковою величиною з невідомим законом розподілу, тому

$$\Delta V_B = K \cdot \int_0^T a_B(t) dt, \quad (4)$$

де  $K$  – умовний коефіцієнт зміни швидкості повітряного потоку.

Отримана випадкова складова сумується з постійною, гармонічною і ступінчастою складовими, які визначаються відповідними операторами.

У блоці розрахунку процесу обертання вітроколеса інтегрується рівняння його обертального руху як твердого тіла під дією моменту аеродинамічних сил, моменту навантаження від електрогенератора і моменту сил в'язкого тертя

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} + R_{tr} \cdot \omega = M_A + M_H, \quad (5)$$

де  $R_{tr}$  – коефіцієнт моменту в'язкого тертя,  $M_H$  – момент навантаження від електрогенератора.

Для розрахунку усіх складових рівняння (5) необхідно спершу задати геометричні параметри вітроколеса, початкові умови для кута його повороту і кутової швидкості обертання, коефіцієнт моменту в'язкого тертя та миттєве значення потужності генератора  $M_G$ , яке визначатиме момент навантаження від нього

$$M_H = M_G / \omega. \quad (6)$$

Існує багато способів керування вихідними параметрами ВЕУ. Всі вони поділяються на активні й пасивні. Перевагою пасивного способу керування ВЕУ є відносна простота проектування таких систем та їх експлуатації, активного – висока точність вихідних керованих параметрів [5]. У даній статті розглянуто активне керування шляхом зміни кута атаки лопатей. Кутова швидкість обертання вітроколеса залежить від швидкості вітру, кута повороту лопаті відносно набігаючого потоку повітря і навантаження на генераторі. Відповідно, при зміні швидкості вітру і навантаження від генератора, змінюючи кут атаки, можна забезпечити сталість кутової швидкості. Розглянемо блок розрахунку механізму повороту лопатей навколо власної осі за допомогою пружинного регулятора, що прикріплений до маточини вітроколеса (рис. 2). Рух лопатей у даному випадку можна описати диференціальним рівнянням

$$J_{\text{л}} \cdot \frac{d\omega_{\text{л}}}{dt} + R_{\text{тр}} \cdot \omega_{\text{л}} = M_{\text{пр}} + M(\omega_{\text{л}}) + M(g) + M_{\text{А1}}, \quad (7)$$

де  $J_{\text{л}}$  – момент інерції лопаті відносно власної осі,  $\omega_{\text{л}}$  – кутова частота обертання лопаті,  $M_{\text{пр}}$ ,  $M(\omega_{\text{л}})$ ,  $M(g)$ ,  $M_{\text{А1}}$  – моменти, відповідно, поворотної пружини, інерційних (відцентрових), гравітаційних та аеродинамічних сил відносно осі обертання лопаті.

Розрахунок даного блока полягає в інтегруванні рівняння (7), зведеного до вигляду, що не містить операції диференціювання, із заданням початкових умов руху системи.

Перейдемо до аналізу блока моделювання роботи електрогенератора. У якості електричного генератора для ВЕУ залежно від його потужності, виду струму, умов експлуатації та режимів роботи (на власне навантаження або на мережу) можуть використовуватися генератори постійного струму, змінного струму (синхронні, асинхронізовані) або іншого типу, наприклад, вентильні. Не зважаючи на їх суттєві конструктивні відмінності, спільним для них є те, що при заданому навантаженні, яке визначається, наприклад, електричною потужністю  $M_G$  або струмом  $I_G$ , вони вимагають відповідної стабілізації, перш за все кутової швидкості обертання якоря або ротора. Таким чином, можна записати, що момент опору електрогенератора в загальному випадку є функцією двох основних змінних:  $M_H = M_H(M_G, \omega)$  або  $M_H = M_H(I_G, \omega)$ .

У нашому випадку генератор є багатополюсною, синхронною електричною машиною зі змішаним збудженням. Магнітний потік у його повітряному зазорі створюється постійними магнітами та обмоткою збудження, яка розміщена на статорі. Трифазна обмотка статора з'єднана зірочкою із заземленим центром. До кожної обмотки фази під'єднано омичне навантаження (рис. 4).

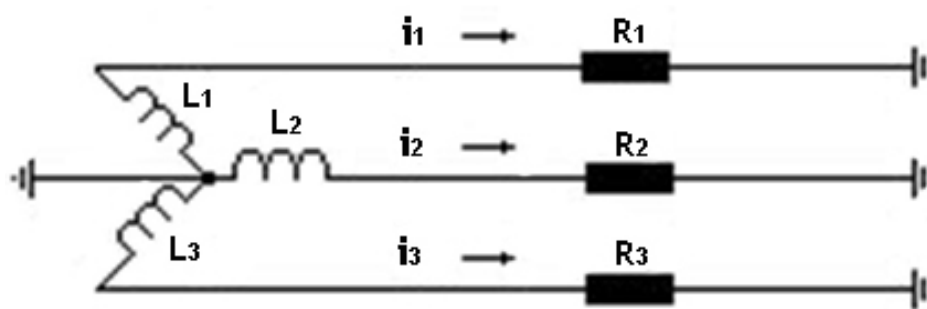


Рисунок 4. З'єднання фазових обмоток та опорів навантаження генератора

На рис. 4 використано наступні позначення:  $L_1 = L_2 = L_3$  – індуктивність фази,  $R_1 = R_2 = R_3$  – сума активного опору фази й навантаження фази,  $i_1, i_2, i_3$  – миттєві значення струмів у фазах.

Постійні магніти, розміщені на роторі, створюють при його обертанні змінний магнітний потік (потокосцеплення  $\Psi$ ), який індукуює у фазових обмотках змінну напругу

$$E_{\text{об}} = -\partial\Psi/\partial t. \quad (8)$$

Форма залежності потокозчеплення від кута повороту ротора визначається геометрією обмотки та постійних магнітів. Наближене її значення можна знайти за допомогою таких формул:

$$\Psi(\gamma) = \begin{cases} A \cdot (-1 + a \cdot \gamma^2), & \text{при } |\gamma| < \Delta\gamma; \\ A \cdot (1 - a \cdot (-\pi + |\gamma|)^2), & \text{при } (|\gamma| - \pi) \leq \Delta\gamma; \\ A \cdot C \cdot |\gamma| + b, & \text{у решті випадків,} \end{cases} \quad (9)$$

де  $A = -\frac{814,85 \cdot F}{N \cdot C}$ ,  $a = \frac{1}{\Delta\gamma \cdot (\pi - \Delta\gamma)}$ ,  $C = \frac{2 - 2 \cdot a \cdot \Delta\gamma^2}{\pi - 2 \cdot \Delta\gamma}$ ,  $b = -\frac{C \cdot \pi}{2}$ ,  $\Delta\gamma = 0,314159$ ,  $\gamma = N \cdot \omega_{\Gamma} \cdot t$

– електричний кут, який зводиться перед підстановкою у (9) до діапазону  $-\pi < \gamma < \pi$ ,  $t$  – поточний час,  $N$  – кількість пар полюсів,  $F$  – амплітуда магнітного потоку в повітряному зазорі генератора, яка залежить від струму збудження,  $\omega_{\Gamma}$  – кутова швидкість обертання ротора генератора.

Графіки залежності фазової ЕРС обертання та потокозчеплення обмотки фази від кута повороту ротора, які визначаються за формулами (8) і (9), відповідно, зображено на рис. 5.

На статорі є обмотка підмагнічування, яка живиться постійним струмом. Вона розміщена так, що її взаємні індуктивності з фазовими обмотками дорівнюють нулю, а магнітний потік від постійних магнітів, що проходить через неї, не має змінної складової. Таким чином, в обмотці підмагнічування не діє додаткова ЕРС, а струм визначається лише величиною керуючої ЕРС. При розрахунку останньої необхідно задати індуктивність та активний опір обмотки збудження.

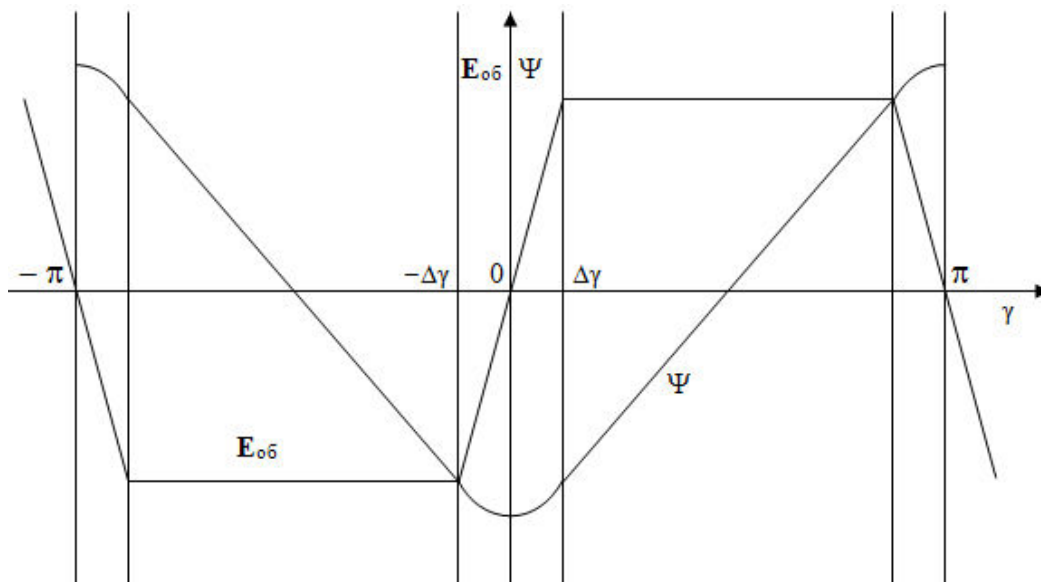


Рисунок 5. Залежність фазової ЕРС обертання та потокозчеплення обмотки фази від кута повороту ротора

Закон Ома для кожної фази може бути записаний у такому вигляді:

$$\begin{aligned} 0 &= i_1 \cdot R_1 + \frac{\partial}{\partial t}(L_1 \cdot i_1 + M_{12} \cdot i_2 + M_{13} \cdot i_3) + \frac{\partial \Psi_1}{\partial t}; \\ 0 &= i_2 \cdot R_2 + \frac{\partial}{\partial t}(L_2 \cdot i_2 + M_{21} \cdot i_1 + M_{23} \cdot i_3) + \frac{\partial \Psi_2}{\partial t}; \\ 0 &= i_3 \cdot R_3 + \frac{\partial}{\partial t}(L_3 \cdot i_3 + M_{32} \cdot i_2 + M_{31} \cdot i_1) + \frac{\partial \Psi_3}{\partial t}. \end{aligned} \quad (10)$$

де  $M_{kn}$  ( $k=1,2,3$ ;  $n=1,2,3$ ;  $k \neq n$ ) – взаємні індуктивності фазових обмоток.

Оскільки осі обмотки однакові й повернуті одна відносно іншої на кут  $120^\circ$ , то можна з достатньою точністю стверджувати, що

$$L_1 = L_2 = L_3 = L, \quad i \quad M_{12} = M_{13} = M_{21} = M_{23} = M_{31} = M_{32} = -L/2. \quad (11)$$

Обертання ротора майже не змінює власних та взаємних індуктивностей фазових обмоток, тому  $\partial L_k / \partial t = 0$  і  $\partial M_{kn} / \partial t = 0$  ( $k=1,2,3$ ;  $n=1,2,3$ ;  $k \neq n$ ). При цьому рівняння (11) можна переписати у вигляді

$$\begin{aligned} L \cdot \left( \frac{\partial i_1}{\partial t} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial i_3}{\partial t} \right) &= -R_1 \cdot i_1 - \frac{\partial \Psi_1}{\partial t}; & L \cdot \left( \frac{\partial i_2}{\partial t} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial i_3}{\partial t} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial i_1}{\partial t} \right) &= -R_2 \cdot i_2 - \frac{\partial \Psi_2}{\partial t}; \\ L \cdot \left( \frac{\partial i_3}{\partial t} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial i_1}{\partial t} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t} \right) &= -R_3 \cdot i_3 - \frac{\partial \Psi_3}{\partial t}. \end{aligned} \quad (12)$$

Після переходу до форми рівнянь, яка не містить операції диференціювання, отримаємо

$$\begin{aligned} i_1 - \frac{i_2}{2} - \frac{i_3}{2} &= -\frac{1}{L} \cdot \int_0^t R_1 \cdot i_1 \cdot dt - \Psi_1 \cdot \frac{1}{L}; & i_2 - \frac{i_3}{2} - \frac{i_1}{2} &= -\frac{1}{L} \cdot \int_0^t R_2 \cdot i_2 \cdot dt - \Psi_2 \cdot \frac{1}{L}; \\ i_3 - \frac{i_1}{2} - \frac{i_2}{2} &= -\frac{1}{L} \cdot \int_0^t R_3 \cdot i_3 \cdot dt - \Psi_3 \cdot \frac{1}{L}. \end{aligned} \quad (13)$$

За допомогою рівнянь (13) моделюється робота електрогенератора вітроенергетичної установки. Також у моделі генератора повинна бути передбачена можливість встановлення регулятора вихідної напруги. Найоптимальніший закон регулювання може визначатися на кожному етапі розроблення ВЕУ з урахуванням порівняльного моделювання різних його варіантів. Для прикладу, наведемо один із можливих варіантів закону керування у вигляді

$$\frac{\partial i_{об}}{\partial t} = Z \cdot (U_c - U_3), \quad (14)$$

де  $i_{об}$  – струм обмотки збудження,  $Z$  – деяка константа,  $U_c$  – середнє за оберт ротора значення напруги генератора,  $U_3$  – задана напруга генератора.

Тепер перейдемо до блока розрахунку аеродинамічних сил і моментів, які діють на лопать вітроколеса. Цьому питанню присвячена численна література [5, 6]. Як відомо, момент, який створюється потоком повітря на вітроколесі, можна описати залежністю

$$M_A(t) = \frac{C_p}{\lambda} \cdot \frac{\pi \rho}{2} \cdot R^3 \cdot V_B^3, \quad (15)$$

де  $C_p$  – коефіцієнт використання енергії вітру (коефіцієнт потужності),  $\lambda$  – швидкохідність вітроколеса,  $\rho$  – густина повітря,  $R$  – радіус вітроколеса. Швидкохідність залежить від типу вітроколеса та визначається за формулою  $\lambda = (\omega \cdot R) / V_B$ . Коефіцієнт використання енергії вітру знаходиться в суттєвій нелінійній



залежності від швидкості і кута атаки лопаті  $\alpha$   $C_p = f(\lambda, \alpha)$ . Для того, щоб коефіцієнт використання енергії вітру  $C_p$  виразити у явному вигляді, необхідно розглянути його зміну при різних кутах відхилення осі обертання вітроколеса від напрямку вітру. Згідно з [5] із достатньою для практики точністю можна вважати, що потужність вітроколеса при виводі його з-під вітру змінюється пропорційно кубу косинуса кута відхилення вітроколеса від напрямку потоку. Таким чином, можна прийняти, що даний ефект аналогічний дії вітру на вітроколесо при повороті лопатей на цей же кут. Враховуючи це припущення, вираз для коефіцієнта використання енергії вітру набуде вигляду  $C_p = C_{p0} \cdot \cos^3 \alpha$ , де  $C_{p0}$  – коефіцієнт використання енергії вітру при  $\alpha = 0$ .

Тож вихідний параметр цього блока (аеродинамічний момент, що діє на лопать і приведений до точки її кріплення), який використовується в інших блоках моделювання, згідно з (15) запишемо у вигляді

$$M_A(t) = \frac{\pi \rho}{2} \cdot C_{p0} \cdot R^2 \cdot \frac{V_B^4}{\omega} \cdot \cos^3 \alpha. \quad (16)$$

Для регулювання кутової швидкості вітроколеса система керування ВЕУ може змінювати величину баластного навантаження. Для задавання закону регулювання використовується блок моделювання регулятора кутової швидкості. Аналогічно як із регулятором напруги, найоптимальніший закон регулювання може визначатися на кожному етапі розроблення ВЕУ з урахуванням порівняльного моделювання різних його варіантів. Як приклад, подамо один із можливих варіантів закону управління у вигляді

$$\frac{\partial R}{\partial t} = K_R \cdot (\omega_c - \omega_z), \quad (17)$$

де  $R_1 = R_2 = R_3 = R$  – сумарний активний опір навантаження,  $K_R$  – деякий коефіцієнт,  $\omega_c$  – середнє значення кутової швидкості ротора генератора за певний час  $t$ ,  $\omega_z$  – задане значення кутової швидкості ротора генератора.

**Висновки.** Математичне і комп'ютерне моделювання будь-яких машин і механізмів дозволяє уже на етапі проектування оцінювати відповідність конструкторських рішень очікуваним результатам, визначати оптимальні принципи і закони керування цими об'єктами в умовах змінного навантаження або нестационарності вхідних параметрів (наприклад, повітряного потоку для ВЕУ). У статті розглянуто загальну структурну схему вітроенергетичної установки, проаналізовано принципи її функціонування та розроблено графічну інтерпретацію потоків потужності. Подано короткий опис теоретичних аспектів моделювання вітроенергетичних установок в різних експлуатаційних умовах: зміни напрямку і швидкості вітрового потоку, навантаження вітроколеса та кутів встановлення лопатей. Проаналізовано окремі особливості процесів математичного моделювання руху вітроколеса, роботи генератора та механізму зміни кута положення лопатей відносно напрямку вітрового потоку. Подано відповідні рівняння, які дають можливість моделювати вказані процеси у програмних комплексах.

У подальших етапах дослідження планується зосереджувати увагу на процесах математичного і комп'ютерного моделювання роботи конкретних систем і елементів ВЕУ (руху лопатей, обертання вітроколеса, повороту гондоли за напрямком потоку повітря тощо), а також розробляти експериментальні стенди для імітації режимів функціонування цих систем і елементів.

**Література.**

1. Барабанов, Г. Система управления автономной ветроэлектрической станцией [Текст] / Г. Барабанов, Р. Кулагин, К. Ковынев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2005. – № 2. – С. 48–51.
2. Медиковський, М. Використання цілочисельного програмування для визначення складу вітрової електростанції [Текст] / М. Медиковський, О. Шуневич // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2010. – № 57. – С. 230–233.
3. Жлобіч, В. Шляхи забезпечення альтернативною енергією сільськогосподарського виробництва [Текст] / В. Жлобіч // Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 2008. – № 2 (45). – С. 208–213.
4. Гвоздева, И. Моделирование динамики ветроэнергетической установки большой мощности [Текст] / И. Гвоздева, В. Миргород, О. Глазева // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2010. – № 1 (77) . – С. 53–57.
5. Суббота, А. Система управления ветроэнергетической установкой / А. Суббота, И. Дыбская, А. Заболотный // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 3 (37). – С. 61–67.
6. Буяльский, В. Повышение эффективности управления ветротурбиной [Текст] / В. Буяльский // Вісник Севастопольського державного технічного університету. – 2008. – № 88. – С. 152–156.
7. Корендій, В. Аналіз проблем експлуатації та ефективності роботи тихохідної вітроенергетичної установки [Текст] / В. Корендій // 68-ма студентська науково-технічна конференція: Збірник тез доповідей. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 108–109.

*Отримано 25.08.2011*