

УДК 621.311.24:681.511.46

I. З. ЩУР (д-р техн. наук, проф.), Ю. О. БІЛЕЦЬКИЙ  
 Національний університет «Львівська політехніка»  
[i\\_shchur@meta.ua](mailto:i_shchur@meta.ua) [shadovv00@gmail.com](mailto:shadovv00@gmail.com)

## ЕНЕРГОФОРМУЮЧЕ ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ З СИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ

Розроблено систему енергоформуючого керування навантаженням вітроелектроустановки з синхронним генератором на постійних магнітах як гамільтонової системи з керованими входами/виходами. Запропоновано спосіб роботи з оптимальною швидкістю  $C_{pR}$ , яка забезпечує отримання максимальної енергії на виході установки. Наведено результати порівняльних досліджень синтезованої енергоформуючої системи керування з поширеною (за Morimoto) при роботі на турбулентних вітрах з різною середньою швидкістю.

**Ключові слова:** вітроелектроустановка, синхронний генератор з постійними магнітами, система керування за Morimoto, енергоформуюче керування, гамільтонова система з керованими входами/виходами, оптимальне керування.

**Постановка проблеми.** Останнім часом щораз більшого поширення набуває так звана “зелена” енергетика, зокрема зростає використання вітроелектроустановок (ВЕУ). Оскільки в Україні середня швидкість вітру коливається в межах 3-6 м/с, то доцільним є використання спеціальних автономних установок малої потужності, зорієнтованих на індивідуальних споживачів [1]. Для роботи на малих швидкостях вітру найефективнішим є використання ВЕУ з вертикальною віссю обертання та з синхронним генератором на постійних магнітах (СГПМ) [1]. Такі установки не потребують орієнтації на вітер і тому мають перевагу при поривчастих і турбулентних вітрах (ТВ) [2]. Зважаючи на низький вітровий потенціал, в малих ВЕУ гостро постає проблема максимальної енергоефективності, що вимагає, окрім електромеханічної частини, спеціальних підходів до розроблення системи оптимального керування, який забезпечуватиме максимальний відбір енергії від вітру.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як відомо, потужність та крутний момент вітроротора (ВР) при дії вітру певної швидкості  $V_B$  визначаються відповідними рівняннями [3]:

$$P_{BP} = 0,5 \rho_{п} A C_p(\lambda) V_B^3, \quad (1)$$

$$M_{BP} = \frac{P_{BP}}{\omega} = 0,5 \rho_{п} A C_p(\lambda) \left(\frac{R}{\lambda}\right)^3 \omega^2, \quad (2)$$

де  $\rho_{п}$  – густина повітря;  $A$  – площа омивання ВР;  $C_p(\lambda)$  – коефіцієнт відбору ВР потужності від вітру;  $\lambda = \omega R / V_B$  – швидкохідність ВР;  $R$  – радіус ВР;  $\omega$  – кутова швидкість ВР.

Залежність  $C_p(\lambda)$  відображає аеродинамічні властивості ВР і, як приклад, показана на рис. 1. Для забезпечення максимального відбору потужності від вітру, відповідно до рівняння (1), потрібно підтримувати максимальне значення коефіцієнта потужності  $C_p$ :  $C_{pmax} = C_p(\lambda_{opt})$ , а отже – оптимальну кутову швидкість ВР  $\omega_{opt} = \lambda_{opt} V_B / R$ . Це досягається шляхом зміни навантаження генератора.

Зважаючи на нелінійний характер  $C_p(\lambda)$  (рис. 1), для максимального відбору ВР потужності від вітру

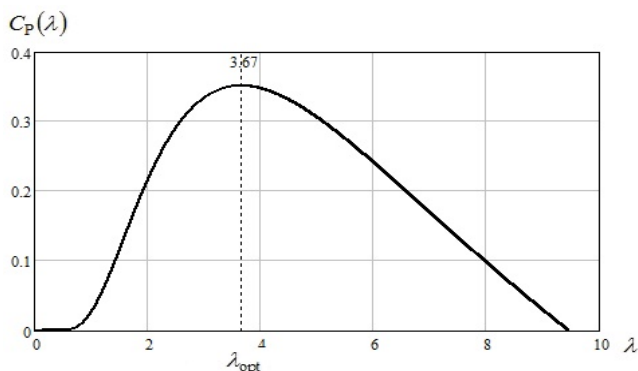


Рисунок 1 – Залежність  $C_p(\lambda)$  ВР досліджуваної ВЕУ

потрібен певний алгоритм екстремального керування [3]. Один з найпоширеніших – відомий спосіб бездавачевого оптимального керування навантаженням генератора за Morimoto [4] – впливає з рівняння (2) і полягає у формуванні моменту навантаження пропорційно до квадрату виміряної кутової швидкості ВР:

$$M = 0,5 \rho_{п} A C_{pmax} \left(\frac{R}{\lambda_{opt}}\right)^3 \omega^2. \quad (3)$$

Керування за законом (3) забезпечує прямування кутової швидкості ВР до оптимальної для конкретного значення швидкості вітру, тобто до точки максимального відбору потужності. Швидкодія такого регулювання залежатиме від величини механічної сталої часу ВР [2]:

$$T_m = \frac{k_{BP}}{V_B}, \quad (4)$$

де  $k_{BP} = \left( J_m \lambda_{opt}^2 \right) / \left( 0,5 \rho_n C_{Pmax} A R^2 \right)$  – сталий для конкретного ВР коефіцієнт;  $J_m$  – момент інерції ВР з генератором.

Оскільки  $T_m$  обернено пропорційна до швидкості вітру, то висока швидкодія системи забезпечуватиметься тільки при роботі на великих вітрах. Залежність сталої часу від швидкості вітру збільшує нелінійність системи, що ускладнює синтез та налагодження системи автоматичного керування (САК).

Останнім часом одними з найбільш перспективних підходів до синтезу САК складними нелінійними об'єктами є енергетичні підходи [5]. До них відноситься і синтез енергоформуючих систем керування (ЕФСК).

**Мета роботи.** Основними завданнями даної статті є наступні: синтезувати систему енергоформуючого оптимального керування навантаженням ВЕУ на основі СГПМ; порівняти роботу ВЕУ, керованої ЕФСК, з системою, керованою за Morimoto, при роботі на ТВ з різною середньою швидкістю.

**Виклад основного матеріалу.** Синтез ЕФСК полягає у розкладі системи на більш прості підсистеми, що певним чином пов'язані між собою, та пошуку таких додаткових взаємозв'язків і підсистем, щоб загальна енергія системи набула мінімуму у точці рівноваги [5]. Дана точка рівноваги є ціллю керування і визначається сигналом завдання. ЕФСК одночасно забезпечує асимптотичну стійкість усієї системи.

З метою спрощення процедури синтезу, об'єкт керування розглядається як гамільтонова система з керованими входами/виходами [5]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{G}^T(\mathbf{x}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \end{cases}, \quad (5)$$

де  $\mathbf{x}(t)$  – вектор стану;  $\mathbf{J}(\mathbf{x})$  та  $\mathbf{R}(\mathbf{x})$  – матриці взаємозв'язків та демпфування відповідно;  $H[\mathbf{x}]$  – функція повної енергії системи;  $\mathbf{G}(\mathbf{x})$  – матриця портів;  $\mathbf{u}(t)$  та  $\mathbf{y}(t)$  – вектори вхідних та вихідних енергетичних змінних.

Відповідно до [6], синтез ЕФСК зводиться до запису математичної моделі об'єкта у формі (5), вибору вигляду матриць системи керування та вирішення наступного матричного рівняння:

$$[\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})] \frac{\partial H_a}{\partial \mathbf{x}} = [\mathbf{J}_a(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_a(\mathbf{x})] \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{b}(\mathbf{x}), \quad (6)$$

де  $\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{J}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_a(\mathbf{x})$  та  $\mathbf{R}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{R}(\mathbf{x}) + \mathbf{R}_a(\mathbf{x})$  – матриці взаємозв'язків та демпфування бажаної системи;  $H_a[\mathbf{x}]$  – функція повної енергії системи керування;  $\mathbf{J}_a(\mathbf{x})$  та  $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$  – матриці взаємозв'язків та демпфування САК;  $\mathbf{b}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}$  – вектор вхідних енергетичних змінних, який формується введенням зворотного зв'язку.

Даний підхід застосовано до синтезу системи керування ВЕУ на основі СГПМ, математична модель якої в обертовій системі координатах  $d$ - $q$  наведена нижче:

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} = -R_s i_d + p_n \omega L_q i_q + u_d \\ L_q \frac{di_q}{dt} = -R_s i_q - p_n \omega L_d i_d - p \omega \Phi + u_q \\ J_m \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} p_n [(L_d - L_q) i_d i_q + \Phi i_q] - \frac{0,5 \rho_n A C_p(\lambda) V_B^3}{\omega} \end{cases} \quad (7)$$

де  $L_d$  і  $L_q$  – індуктивності обмотки якоря по осях  $d$  і  $q$  відповідно;  $i_d$  і  $i_q$  – відповідно проекції вектора струму обмотки якоря на осі  $d$  і  $q$ ;  $R_s$  – опір фази обмотки якоря;  $p_n$  – кількість пар полюсів ротора;  $u_d$  і  $u_q$  – проекції вектора напруги обмотки якоря на осі  $d$  і  $q$  відповідно;  $\Phi$  – амплітуда магнітного потоку полюса постійних магнітів ротора.

Для спрощення синтезу системи керування, нелінійний момент, створюваний ВР (2), у третьому рівнянні системи (7) розглядається як певний зовнішній момент, що прикладений до генератора. Тоді модель набуде вигляду відомої математичної моделі СГПМ в обертових координатах  $d$ - $q$  [7], що, у свою чергу, дає змогу звести процедуру синтезу САК ВЕУ до синтезу САК її генератором – СГПМ [8].

Привівши модель СГПМ до вигляду (5) і розв'язавши матричне рівняння (6), отримаємо наступні вирази, що описують регулятори ЕФСК ВЕУ з СГПМ:

$$\begin{cases} u_{d0} = -r_1(i_d - i_{d0}) - k(i_q - i_{q0}) + R_s i_{d0} - p_{\Pi} L_d i_{q0} (\omega - \omega_0) - p_{\Pi} L_q i_q \omega_0 \\ u_{q0} = -r_2(i_q - i_{q0}) + k(i_d - i_{d0}) + R_s i_{q0} + p_{\Pi} L_q i_{d0} (\omega - \omega_0) + p_{\Pi} (\Phi + L_d i_d) \omega_0, \\ M_{ем} = M_{ВР} - r_3 (\omega - \omega_0) \end{cases} \quad (8)$$

де  $u_{d0}$  і  $u_{q0}$  – сигнали завдання за проекціями по осях  $d$  і  $q$  вектора напруги на виході генератора;  $r_1$ ,  $r_2$  та  $r_3$  – демпфуючі коефіцієнти, що відображають відповідно електричне та механічне демпфування САК;  $k$  – коректуючий коефіцієнт, що здійснює компенсацію перехресних зв'язків між каналами керування напругою за осями  $d$  і  $q$ ;  $i_{d0}$  і  $i_{q0}$  – сигнали завдання за проекціями по осях  $d$  і  $q$  вектора струму обмотки якоря;  $M_{ем}$  – завдання на електромагнітний момент машини, скоректоване дією регулятора.

Оскільки максимальний відбір потужності ВР від вітру безпосередньо пов'язаний із забезпеченням оптимальної кутової швидкості ВР  $\omega_{opt}$ , то основним сигналом завдання ЕФСК є сигнал завдання на кутову швидкість –  $\omega_0 = \omega_{opt}$ . Сигнал завдання  $i_{d0}$  формується відповідно до закону максимального моменту на ампер (ММА) для конкретного типу СГПМ [7], що забезпечує її максимальну енергетичну ефективність. Сигнал  $i_{q0}$  знаходиться з відомого рівняння електромагнітного моменту [7]:

$$i_{q0} = \frac{2}{3p_{\Pi}} M_{ем} / [(L_d - L_q) i_{d0} + \Phi].$$

Як момент ВР  $M_{ВР}$  на вхід третього регулятора системи (8) можна подати

сигнал завдання на момент, оптимальний для конкретної швидкості вітру:  $M_0 = 0,5 \rho_{\Pi} A R C_{P \max} V_{\text{в}}^2 / \lambda_{opt}$ .

Для покращення точності відпрацювання як завдання на кутову швидкість, так і завдань за проекціями вектора струму необхідно використовувати коректуючий коефіцієнт  $k$ . Для зміни швидкодії системи найбільш дієвим є коефіцієнт механічного демпфування  $r_3$ . Використання ж коефіцієнтів електричного демпфування  $r_1$  та  $r_2$  є малоефективним, як показано в [9].

З метою дослідження синтезованої ЕФСК, було проведено низку порівняльних досліджень ЕФСК з регуляторами (8) при різних їх налаштуваннях із системою керування на основі регулятора Morimoto (3) (рис. 2 – 6). Дослідження проводились шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою Matlab/Simulink для ВЕУ з такими параметрами СГПМ та ВР:  $R_s = 0,3$  Ом,  $L_d = 3$  мГн,  $L_q = 3$  мГн,  $\Phi = 0,4$  Вб,  $p_{\Pi} = 20$ ,  $A = 2,32$  м<sup>2</sup>,  $R = 1,08$  м,  $J_m = 25$  кг·м<sup>2</sup> та  $P = 0,5$  кВт при  $V_{\text{в}} = 10$  м/с. Оптимальне значення швидкохідності та максимальне значення коефіцієнта потужності для даного ВР є наступними:  $C_{P \max} = 0,351$  та  $\lambda_{opt} = 3,67$  (рис.1). Для СГПМ з розташуванням магнітів на поверхні ротора ( $L_d = L_q$ ) закон керування ММА досягається за умови  $i_{d0} = 0$  [7]. У даному випадку СГПМ, що керується за допомогою активного випрямляча, має можливість працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна, споживаючи в останньому випадку накопичену енергію.

Дослідження проводились за таким алгоритмом. У початковий момент часу на ВР діє вітер з постійною швидкістю  $V_{\text{в.сер}}$ . За допомогою додаткового рушійного моменту забезпечується розгін ВР до усталеної кутової швидкості, оптимальної для даної швидкості вітру. Після цього додатковий момент знімається, і система працює в усталеному режимі. У заданий момент часу до вітрового потоку додається турбулентна складова [2]. З цієї точки відбувається відлік часу тестового періоду дослідження в умовах ТВ з періодом повторюваності  $T_{\text{ТВ}} = 400$  с. Останні 22 секунди  $T_{\text{ТВ}}$  турбулентна складова вітру відключається і система повертається на початкову усталену кутову швидкість ВР. Таким чином забезпечується рівність та сталі значення початкової і кінцевої кутових швидкостей ВР, між якими інтегрується потужність, генерована ВЕУ в умовах ТВ. Це гарантує коректність порівняння варіантів САК ВЕУ.

З метою аналізу, роботу ЕФСК було досліджено за таких варіантів налаштувань регуляторів:

- 1)  $k = -100$ ,  $r_1 = 0$ ,  $r_2 = 0$ ,  $r_3 = 0$ ;
- 2)  $k = -100$ ,  $r_1 = 0$ ,  $r_2 = 0$ ,  $r_3 = 7$ ;
- 3)  $k = -100$ ,  $r_1 = 0$ ,  $r_2 = 0$ ,  $r_3 = 100$ .

На рис. 2 продемонстровано роботу систем, керованих ЕФСК за різних налаштувань, та САК за Morimoto при середній швидкості вітру  $V_{\text{в.сер}} = 4$  м/с, а також роботу ідеальної ВЕУ. Ідеальною вважатимемо ВЕУ з близькою до нуля інерційністю та керовану САК за Morimoto. Така ідеальна ВЕУ практично миттєво реагує на зміну швидкості вітру з мінімальними втратами в обмотках генератора, забезпечуючи ВЕУ максимальний відбір енергії від вітру.

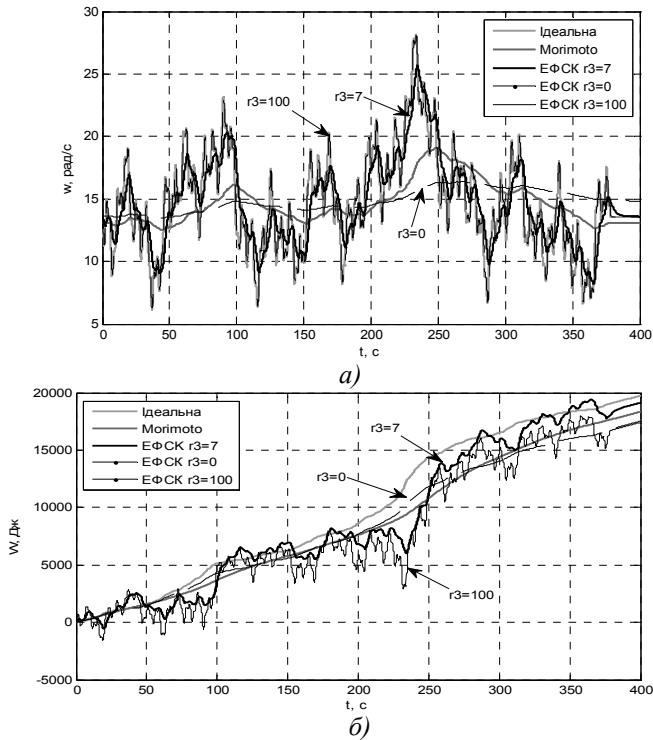


Рисунок 2 – Осцилограми роботи ВЕУ з різними системами керування при  $V_{в.сеп} = 4$  м/с: а) кутова швидкість генератора; б) енергія, отримана від генератора протягом дослідного періоду

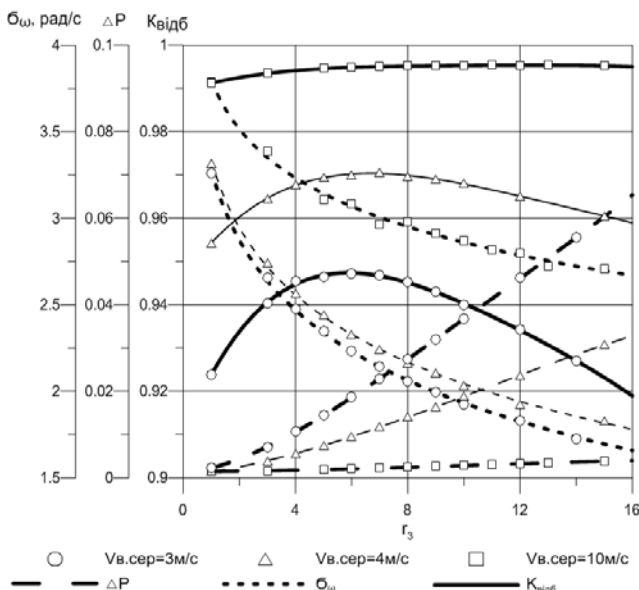


Рисунок 3 – Залежності показників роботи ЕФСК від коефіцієнта механічного демпфування для різних середніх швидкостей ТВ

забезпечення постійного перебування системи близько від точки відбору максимальної потужності  $C_{P \max}$  (рис. 4,в). У той же час, САК за Morimoto має занадто низьку швидкість, що відбивається на зниженні  $C_P$ . Робота в режимі оптимальної швидкості передбачає почергову роботу електричної машини як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Це супроводжується значними коливаннями струму (рис. 4,б), а отже – пропорційними коливаннями потужності ВЕУ (рис. 4,г).

Шляхом збільшення величини демпфуючого коефіцієнта  $r_3$  в ЕФСК можна підвищувати її швидкість, а, значить, – покращувати точність відпрацювання сигналу завдання  $\omega_0$  в умовах ТВ (рис. 2,а). Як наслідок –  $C_P$  наблизиться до  $C_{P \max}$ , і зростатиме енергія, відібрана ВР від вітру. Однак, зі зростанням швидкості САК зростає струм якоря генератора, а отже – і втрати енергії в його обмотках:  $\Delta P = \frac{3}{2}(i_d^2 + i_q^2)R_s$ . Це все впливає на отриману від ВЕУ енергію (рис. 2,б). Таким чином, існує така оптимальна швидкість ЕФСК, при якій ВЕУ віддаватиме споживачу максимальну енергію.

Результати детальних порівняльних досліджень (при зміні  $r_3$  від 1 до 16 для  $V_{в.сеп} = 3, 4$  і 10 м/с) наведено на рис. 3. З метою оцінки роботи систем керування, було введено наступні показники: міра точності відпрацювання сигналу завдання  $\omega_0$  – середньоквадратичне відхилення (СКВ)  $\sigma_\omega$  миттєвих значень  $\omega$  від  $\omega_0$ ; енергетична ефективність роботи ВЕУ – коефіцієнт ефективності відбору енергії вітру, що є відношенням енергій, отриманих за тестовий період досліджуваною та ідеальною ВЕУ:  $K_{відб} = W/W_{ідеал}$  [2].

Виходячи з рис. 3, можна зробити висновок, що для різних середніх швидкостей вітру умова оптимальної швидкості виконується при різних значеннях коефіцієнта механічного демпфування  $r_3$ . Для даної ВЕУ робота у зазначеному вище режимі забезпечується налаштуванням  $r_3$  в межах 6 – 10. З врахуванням того, що ВЕУ з вертикальної віссю обертання орієнтовані на малі швидкості вітру, і екстремум  $K_{відб}$  є явно-вираженим тільки на малих швидкостях вітру, доцільно задатись усередненим оптимальним налаштуванням –  $r_3 = 7$ . Тому наступні порівняльні дослідження ЕФСК і САК за Morimoto (рис. 4 – 6) було виконано за таких, близьких до оптимальних, налаштувань ЕФСК:  $k = -100$ ,  $r_1 = 0$ ,  $r_2 = 0$ ,  $r_3 = 7$ .

Детально роботу ВЕУ на ТВ з оптимальною швидкістю САК на проміжку часу  $t = 50 - 150$  с продемонстровано на рис. 4. На рис. 4,а представлено осцилограми кутових швидкостей ВЕУ, керованої ЕФСК та САК за Morimoto, а також ідеальної ВЕУ. Для установки з енергоформуючим керуванням відхилення кутової швидкості від бажаної  $\omega_0$ , яка практично відповідає кутовій швидкості ідеальної ВЕУ, є достатньо малими для

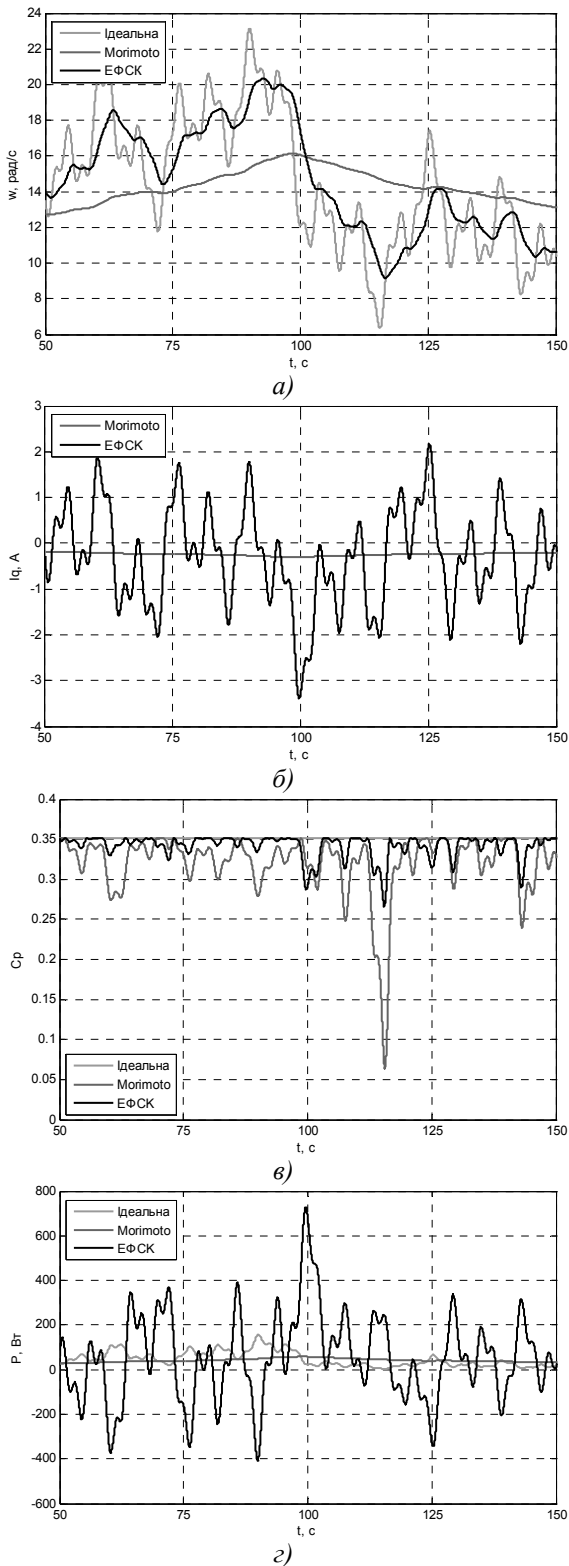


Рисунок 4 – Фрагменти осцилограм роботи ВЕУ з різними системами керування при  $V_{в.сер} = 4$  м/с: а) кутова швидкість генератора; б) проекція струму на вісь q; в) коефіцієнт потужності  $C_p$ ; г) потужність, отримувана від генератора протягом дослідного періоду

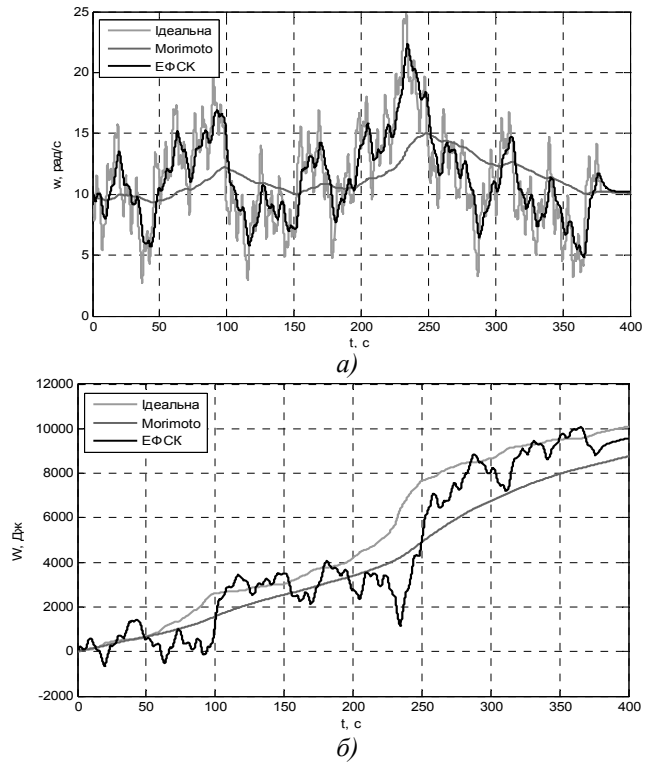


Рисунок 5 – Осцилограми роботи ВЕУ з різними системами керування при  $V_{в.сер} = 3$  м/с: а) кутова швидкість генератора; б) енергія, отримана від генератора протягом дослідного періоду

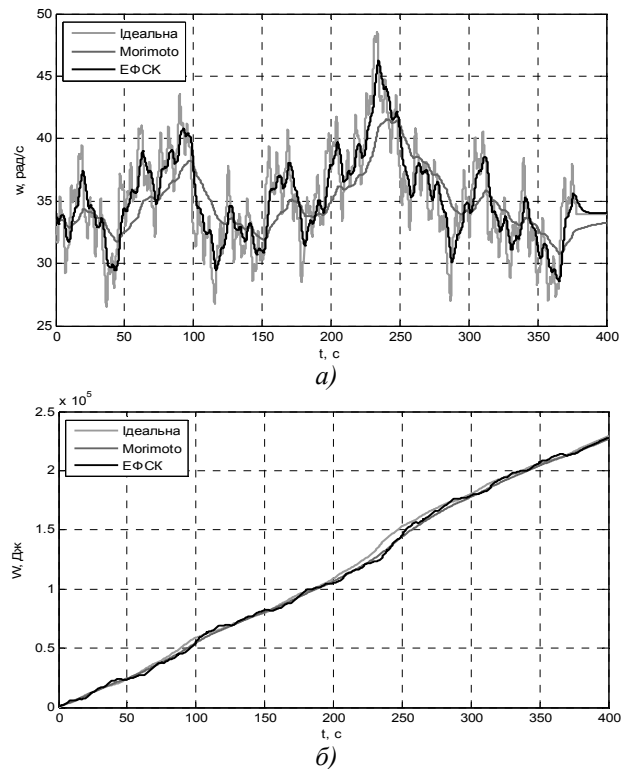


Рисунок 6 – Осцилограми роботи ВЕУ з різними системами керування при  $V_{в.сер} = 10$  м/с: а) кутова швидкість генератора; б) енергія, отримана від генератора протягом дослідного періоду

Слід також зауважити, що робота синтезованої системи у режимі оптимальної швидкодії, на відміну від САК за Morimoto, не залежить від швидкості вітру і тому забезпечує значно кращу керованість процесом відбору енергії. Особливо це проявляється на малих швидкостях вітру, коли САК за Morimoto може повністю призупинити відбір енергії.

На рис. 5 наведено результати дослідження роботи ВЕУ на ТВ протягом тестового періоду при гранично низькій для ВЕУ середній швидкості вітру  $V_{в.сеп} = 3$  м/с. У цьому випадку ЕФСК забезпечує збільшення близько 10% кількості отриманої електроенергії, порівняно з САК за Morimoto. Аналогічні порівняльні дослідження систем на максимальній швидкості вітру при  $V_{в.сеп} = 10$  м/с (рис. 6) показують, що в цьому випадку САК за Morimoto уже забезпечує швидкодію системи, близьку до оптимальної, і різниця між отриманими енергіями при використанні різних САК є дуже малою.

**Висновки.** Для керування навантаженням ВЕУ доцільно використовувати ЕФСК. Така система, налаштована на роботу в режимі оптимальної з точки зору максимальної отриманої енергії швидкодії, дає змогу збільшити відбір енергії ВЕУ до 10% у порівнянні з поширеною системою керування за Morimoto. Дана перевага особливо проявляється при малих швидкостях вітру, які переважають на території України. Основним недоліком розробленої системи є необхідність в інформації про біжучу швидкість вітру для формування сигналів завдання на кутову швидкість та електромагнітний момент. Проте, крім традиційного використання давачів швидкості вітру, цю інформацію можна отримати розрахунковим способом на підставі вимірної кутової швидкості генератора, як показано в [10].

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Щур І.З. Багатофункціональне керування активним випрямлячем в локальній вітроенергетичній системі з вертикальною віссю обертання / І. З. Щур, О. Р. Турленко // Вестн. Націон. ун-та “Харьк. політехн. ін-т”: «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика.» – Харьков, 2008. – № 30. – С. 418-420.
2. Щур І.З. Оптимальне керування вітроустановками різної потужності в умовах турбулентних вітрів / І. З. Щур, В. І. Щур // Вісник Націон. ун-ту “Львівська політехніка”: «Електроенергетичні та електромеханічні системи.» – Львів, 2012. – № 736 – С. 146-152.
3. Optimal control of wind energy systems / I. Muteanu, A. I. Bratcu, N. A. Cutululis, E. Ceangă – London: Springer, 2008. – 284 p. – ISBN 978-1-84800-079-7
4. Morimoto S. Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG / S. Morimoto, H. Nakayama, M. Sanada // IEEE Trans. on Ind. Electron. – 2005, – vol. 41, no. 1. – P. 60-67.
5. Ortega R. Putting energy back in control / R. Ortega, A. van der Schaft, I. Mareels, B. Maschke // IEEE Contr. Syst. Mag., – 2001. – Iss. 21. – № 2. – PP. 18–33.
6. Zou. Z. Maximum output power of PMSM based on energy-shaping and PWM control principle / Z. Zou., H. Yu, Y. Tang // IEEE Intr. Conf. on Aut. and Log. – Qingdao University, 2008. – PP. 1556–1560.
7. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives / B.K. Bose.– Prentice-Hall, N.J., 2002. – 711 p. – ISBN 0-13-016743-6
8. Щур І. З. Енергетичні підходи в керуванні нелінійними системами (на прикладі синхронної машини з постійними магнітами) / І. З. Щур, Ю. О. Білецький // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: «Електроенергетичні та електромеханічні системи.» – Львів, 2012. – № 736 – С. 139-145.
9. Білецький Ю. О. Структури системи енергоформуючого керування синхронною машиною з постійними магнітами як Гамільтоновою системою / Ю. О. Білецький // 36. мат. конф. Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. – Кременчук: КрНУ, 2012. – С. 104-105.
10. Hussein M. M. Simple Direct Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine / M. M. Hussein, M. Orabi, M. E. Ahmed, M. M. Hamada // Intr. Mid. East. Pow. Syst. Conf. (MEPCON) – Cairo University, 2010. – PP. 652–656.

#### REFERENCES

1. Shchur I.Z., Turlenko O.R. Multifunctional control of active rectifier in stand-alone wind turbine energy system with vertical axis of rotation. *Vesnik Natsionalnogo universiteta “Kharkovskij politekhnicheskij institut”: Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoria i praktika.* 2008; 30: 418-420
2. Shchur I.Z., Shchur V.I. Optimal control of wind turbines of different power in turbulent winds. *Visnyk Natsionalnogo universytetu “Lvivska politekhnika”: Electroenergetychni ta electromehanichni systemy.* 2012; 736: 146-152.
3. Muteanu I., Bratcu A.I., Cutululis N.A., Ceangă E. Optimal control of wind energy systems. London: Springer, 2008. 284 p.
4. Morimoto S. Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2005, 41(1). 60-67.
5. Ortega R., van der Schaft A., Mareels I., Maschke B. Putting energy back in control. *IEEE Contr. Syst. Mag.* 2001. 21(2): 18–33.

6. Zou, Z., Yu H., Tang Y. Maximum output power of PMSM based on energy-shaping and PWM control principle. *Intr. Conf. on Aut. and Log.* Qingdao: Qingdao University, 2008, p.1556–1560.
7. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives.* – Prentice-Hall, N.J., 2002. 711 p.
8. Shchur I., Biletskiy Y. Energy-based approaches in control of nonlinear systems (at example of permanent magnet synchronous motor) *Visnyk Natsionalnogo universytetu "Lvivska politekhnika": Electroenergetychni ta electromechanichni systemy.* 2012; 736: 139-145.
9. Biletskiy Y. Structures of energy-shaping control system of permanent magnet synchronous motor as Hamiltonian system. *Electromechanichni ta energetychni systemy, metody modeljuvannja ta optymizatsii (Electromechanical and energetic systems, methods of modeling and optimization).* Kremenchuk: KrNU, 2012, p. 104-105.
10. Hussein M. M., Orabi M., Ahmed M. E., Hamada M. M. Sensorless control of permanent magnet synchronous generator wind turbine // *Intr. Mid. East. Pow. Syst. Conf. (MEPCON).* Giza: Cairo University, 2010, p. 652–656.

Надійшла до редакції 01.03.2013

Рецензент: О.І. Толочко

И. З. ЩУР, Ю. О. БИЛЕЦКИЙ

Национальный университет «Львовская политехника»

**Энергоформирующее оптимальное управление нагрузкой ветроэлектроустановки с синхронным генератором на постоянных магнитах.** Разработано систему управления нагрузкой ветроэлектроустановки с синхронным генератором на постоянных магнитах как гамильтоновой системы с управляемыми входами/выходами. Предложено способ работы с оптимальным быстродействием CAP, которая обеспечивает получение максимальной энергии на выходе установки. Представлено результаты сравнительных исследований синтезированной энергоформирующей системы управления с распространенной (за Morimoto) при работе на турбулентных ветрах с различной средней скоростью.

**Ключевые слова:** ветроэлектроустановка, синхронный генератор с постоянными магнитами, система управления за Morimoto, энергоформирующее управление, гамильтонова система с управляемыми входами/выходами, оптимальное управление.

I. SCHUR, Y. BILETSKYI

National University «Lviv Polytechnic»

### **Energy-Shaping Optimal Control of Electric Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator.**

One of the types of electric wind turbines (EWT) which are oriented on individual users are low-powered EWT with vertical axes of rotation and permanent magnet synchronous generator (PMSG). It is especially concerned to Ukraine where a low-speed wind is prevailing. Since the mechanical time constant of wind turbines increases for small EWT and is inversely proportional to wind speed, control systems of such wind turbines are nonlinear and their inertia are bigger especially on low wind speed. One of the popular control systems for EWT is Morimoto's control system, but its work with small EWT on low-speed wind provides a low efficiency ratio. That's why it is so important to develop some control system for EWT which will be simple in synthesizing and setting up, with high efficiency ratio on all wind speeds. A novel energy-shaping control system (ESCS) for EWT with PMSG was created and shown in this article. Previously EWT model was simplified and considered as port-controlled Hamiltonian system. Principles of interconnection and damping assignment were used as well. In this article ESCS is described in detail, and its accommodation to application is presented too. Wishful structure of synthesized system was suggested according to preliminary works. Some comparative researches of the work of EWT controlled by ESCS with different parameters (different values of mechanic damping) on turbulent wind were carried out. Based on the results of these researches feasibility of work in new offered mode has been proven. This mode is called the optimal response mode. It provides a maximum energy generation of EWT. Here are presented the comparative researches of wind turbine work controlled by ESCS in optimal response mode, well-known Morimoto's control system and ideal EWT with infinitely small moment of inertia on turbulent wind of different average speeds. The analysis of results is made as well. There are also given advantages and disadvantages of synthesized system in the article. The ways of potential solution of main disadvantage is adduced too.

**Key words:** electric wind turbine, permanent magnet synchronous generator, Morimoto's control system, energy-shaping control, port-controlled Hamiltonian system, optimal control.