

ЕНЕРГОФОРМУЮЧЕ ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ У СКЛАДІ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ БЕЗ ДАВАЧА ШВИДКОСТІ ВІТРУ

Постановка проблеми. Поширення “зеленої” енергетики пов’язане з використанням, перш за все, вітроелектроустановок (ВЕУ). На території України, де середньорічна швидкість вітру переважно не вища за 3-6 м/с, доцільно використовувати спеціальні автономні установки малої потужності, зорієнтовані на індивідуальних споживачів [1]. Такі вітроустановки переважно виконуються з синхронним генератором на постійних магнітах (СПМ) [1] та вертикальною віссю обертання, що дає змогу краще працювати на поривчастих і турбулентних вітрах (ТВ) [2]. Зважаючи на низький вітровий потенціал, в малих ВЕУ гостро постає проблема максимальної енергоефективності, що вимагає, окрім ефективної електромеханічної частини, спеціальних підходів до розроблення системи оптимального керування. Така система повинна бути максимально простою і в налагодженні, і в реалізації, зокрема, працювати без давача вітру, адже його використання у малопотужних ВЕУ є недоцільним з економічної точки зору та з точки зору надійності.

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

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

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

де $\rho_{\text{п}}$ – 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; ω – кутова швидкість ВР.

Максимальний відбір потужності від вітру, відповідно до рівняння (1), забезпечується завдяки підтримці максимального значення коефіцієнта потужності C_P : $C_{P\text{max}} = C_P(\lambda_{\text{opt}})$, а отже – оптимальної кутової швидкості ВР $\omega_{\text{opt}} = \lambda_{\text{opt}} V_B / R$. Найпростіше це може досягатися шляхом зміни електричного навантаження генератора.

Зважаючи на нелінійний характер $C_P(\lambda)$ [2], для максимального відбору ВР потужності від вітру потрібен певний алгоритм екстремального керування [3]. Один з найбільш поширених та простих – відомий спосіб оптимального бездавачевого керування навантаженням генератора за Morimoto [4], що впливає з рівняння (2) і полягає у формуванні моменту навантаження пропорційно до квадрату вимірної кутової швидкості ВР:

$$M_{\text{мор}} = 0,5 \rho_{\text{п}} A C_{P\text{max}} \left(\frac{R}{\lambda_{\text{opt}}}\right)^3 \omega^2 = K_M \omega^2. \quad (3)$$

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 – $T_M = f(V_B^{-1})$ [2]. Оскільки T_M обернено пропорційна до швидкості вітру, то висока швидкодія системи забезпечуватиметься тільки при роботі на великих вітрах.

Велика кількість нелінійностей у системі ВЕУ (нелінійність за збудженням M_{BP} , залежності $C_P(\lambda)$ та $T_M(V_B)$, нелінійності в генераторі) суттєво ускладнюють 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 систем енергоформуючого керування (СЕФК).

Цілі статті. Основними завданнями даної статті є наступні: синтезувати систему енергоформуючого оптимального керування електричним навантаженням ВЕУ на основі СПМ без давача вітру; порівняти роботу ВЕУ, керованих СЕФК без давача вітру, СЕФК з давачем вітру та керованої за Morimoto при роботі на ТВ.

Виклад основного матеріалу. Синтез СЕФК 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 замкненої системи набула мінімуму у бажаній (визначеній сигналом завдання) точці рівноваги x_0 [5]. Синтезована таким чином САК забезпечуватиме асимптотичну стійкість усієї системи.

Відповідно до [6], процедура синтезу СЕФК зводиться до запису математичної моделі об’єкта у формі гамільтонової системи з керованими входами/виходами [5], вибору вигляду матриць системи керування та вирішення наступного матричного рівняння:

$$[\mathbf{J}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_a(\mathbf{x}) - (\mathbf{R}(\mathbf{x}) + \mathbf{R}_a(\mathbf{x}))] \frac{\partial(H_d - H)}{\partial \mathbf{x}} = [\mathbf{J}_a(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_a(\mathbf{x})] \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{b}(\mathbf{x}), \quad (4)$$

де $\mathbf{x}(t)$ – вектор стану; $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ та $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ – матриці взаємозв’язків та демпфування керованого об’єкта; $\mathbf{J}_a(\mathbf{x})$ та $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$ – матриці взаємозв’язків та демпфування системи керування; $H_d[\mathbf{x}]$ – функція бажаної повної енергії замкненої САК; $H[\mathbf{x}]$ – функція повної енергії керованого об’єкта; $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ – матриця портів; $\mathbf{b}(\mathbf{x})$ – вектор вхідних енергетичних змінних, який формується введенням зворотного зв’язку.

Даний підхід застосовано до синтезу системи керування ВЕУ на основі СГПМ, математична модель у формі гамільтонової системи з керованими входами/виходами якої наведена нижче [7]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & p_{\pi} L_q i_q \\ 0 & -R_s & -p_{\pi} (L_d i_d + \Phi) \\ -p_{\pi} L_q i_q & p_{\pi} (L_d i_d + \Phi) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ -\frac{0,5 p_{\pi} A C_p(\lambda) V_B^3}{\omega} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де $x_1 = L_d i_d$, $x_2 = L_q i_q$ та $x_3 = J_m \omega$ – елементи вектора стану; 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_{π} – кількість пар полюсів ротора; u_d і u_q – проекції вектора напруги обмотки якоря на осі d і q відповідно; Φ – амплітуда потокозчеплення від полюса постійних магнітів ротора; J_m – сумарний момент інерції ВЕУ.

Як показано в [7], спрощення моделі (5) до вигляду відомої математичної моделі СГПМ в обертових координатах d-q [8], дає змогу звести процедуру синтезу САК ВЕУ до синтезу САК її генератором – СГПМ [9]. Тоді вирази що описують регулятори СЕФК ВЕУ з СГПМ матимуть наступний вигляд [7]:

$$\begin{cases} u_{d0} = -r_1 (i_d - i_{d0}) - k (i_q - i_{q0}) + R_s i_{d0} - p_{\pi} L_d i_{q0} (\omega - \omega_0) - p_{\pi} L_q i_q \omega \\ u_{q0} = -r_2 (i_q - i_{q0}) + k (i_d - i_{d0}) + R_s i_{q0} + p_{\pi} L_q i_{d0} (\omega - \omega_0) + p_{\pi} (\Phi + L_d i_d) \omega, \\ M_{em} = M_{BP} - r_3 (\omega - \omega_0) \end{cases} \quad (6)$$

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; ω_0 – сигнал завдання на швидкість; M_{em} – завдання на електромагнітний момент машини, скоректоване дією регулятора.

У синтезованій САК сигнал завдання i_{d0} формується відповідно до закону максимального моменту на ампер (ММА) для конкретного типу СГПМ [8], що забезпечує її максимальну енергетичну ефективність, а сигнал i_{q0} знаходиться з відомого рівняння електромагнітного моменту: $i_{q0} = \frac{2}{3 p_{\pi}} M_{em} / [(L_d - L_q) i_{d0} + \Phi]$.

З метою формування бажаної точки рівноваги \mathbf{x}_0 на вхід СЕФК (8) потрібно подавати сигнал завдання на швидкість, а також сигнал моменту навантаження, що можуть бути розраховані з відомої швидкості вітру [7]. Остання може бути отримана від давача швидкості вітру або розрахована з певною точністю [10], проте це ускладнює систему, підвищує її вартість і знижує надійність.

Для забезпечення ефективного бездавачевого керування, синтез систем керування на основі енергетичних підходів може бути поєднано з традиційними [5]. Тому для синтезу СЕФК без давача вітру запропоновано доповнити регулятори СЕФК (6) регулятором Morimoto (3). Він визначатиме бажану точку рівноваги за рахунок формування оптимального моменту навантаження: $M_{BP} = M_{mor}$.

Максимальний відбір потужності ВР від вітру безпосередньо пов’язаний із забезпеченням оптимальної кутової швидкості ВР $\omega_{opt}(V_B)$, однак, за відсутності давача вітру, суттєво ускладнюється процедура її знаходження, тому на вхід сигналу завдання на швидкість запропоновано подати сигнал поточної швидкості: $\omega_0 = \omega$. Це забезпечить стійку роботу системи у визначеній регулятором (3) оптимальній точці \mathbf{x}_0 .

З врахуванням особливостей налаштування СЕФК, описаних в [7] (для покращення точності відпрацювання як завдання на кутову швидкість, так і завдань за проекціями вектора струму необхідно використовувати коректуючий коефіцієнт k , використання ж коефіцієнтів електричного демпфування r_1 і r_2 є малоефективним), регулятори СЕФК з Morimoto матимуть наступний вигляд:

$$\begin{cases} u_{d0} = -k (i_q - i_{q0}) + R_s i_{d0} - p_{\pi} L_q i_q \omega \\ u_{q0} = k (i_d - i_{d0}) + R_s i_{q0} + p_{\pi} (\Phi + L_d i_d) \omega. \\ M_{em} = K_M \omega^2 \end{cases} \quad (7)$$

Така система забезпечує швидше перегітання перехідних процесів і зменшує статичну похибку порівняно з використанням тільки регулятора (3), а також покращує форму перехідних процесів по струму.

При роботі на турбулентних вітрах одним з найважливіших параметрів є швидкодія, адже потрібно мати змогу своєчасно реагувати на зміну швидкості вітрового потоку з метою максимізації коефіцієнту відбору C_p . З іншого боку – швидкодія системи повинна обмежуватись з огляду на втрати, що виникатимуть при перехідних процесах. Таким чином, як показано в [7], при роботі на турбулентних вітрах ВЕУ повинна працювати в режимі оптимальної, з точки зору максимальної енергії на виході системи, швидкодії. Такий режим досягатиметься при рівності похідних енергії що відбирається від вітру W_v та втрат в обмотках

$\Delta P = \frac{3}{2}(i_d^2 + i_q^2)R_s$ по середньоквадратичному відхиленню (СКВ) реальної швидкості обертання ВР (ω) від оптимальної (ω_{opt}) – σ_ω , що було використано для оцінки швидкодії системи:

$$\left| \frac{dW_g}{d\sigma_\omega} \right| = \left| \frac{d\Delta P}{d\sigma_\omega} \right|. \quad (8)$$

Рівняння (8) є необхідною умовою максимуму відбору енергії ВЕУ – $K_{відб} \Rightarrow \max$. $K_{відб}$ це коефіцієнт ефективності відбору енергії ВЕУ [2], що був вибраний для оцінки енергетичної ефективності роботи ВЕУ і що є відношенням енергій, отриманих на виході системи за тестовий період досліджуваною та ідеальною ВЕУ: $K_{відб} = W/W_{ідеал}$. Ідеальною вважаємо ВЕУ з близькою до нуля інерційністю та керовану САК за Morimoto [7].

Таким чином, можна сказати що наявність регульованої швидкодії є важливою ознакою САК ВЕУ.

При $\omega_0 = \omega$ СЕФК з Morimoto позбавляється більшості регульовальних динамічних складових у рівнянні (7), що, природно, прискорювали б перехідний процес, зокрема, втрачається можливість використовувати для зміни швидкодії системи найбільш дієвий коефіцієнт – коефіцієнт механічного демпфування r_3 . Тому, з метою розширення можливостей СЕФК з Morimoto (7), запропоновано ввести в коло зворотного зв'язку за швидкістю аперіодичну ланку 1-го порядку, на виході якої одержуватимемо сигнал швидкості із запізненням – ω_z . Це призведе до утворення в перехідних процесах різниці між сигналами у каналах завдання ($\omega_0 = \omega$) та зворотного зв'язку за швидкістю ($\omega = \omega_z$), а саме – $(\omega_z - \omega)$, що, у свою чергу, розширить регульовальні можливості системи, а також все ще забезпечуватиме стійку роботу у визначеній регулятором (3) оптимальній точці \mathbf{x}_0 . Регулятори нової СЕФК без давача швидкості вітру матимуть наступний вигляд:

$$\begin{cases} u_{d0} = -k(i_q - i_{q0}) + R_s i_{d0} - p_n L_d i_{q0} (\omega_z - \omega) - p_n L_q i_q \omega \\ u_{q0} = k(i_d - i_{d0}) + R_s i_{q0} + p_n L_q i_{d0} (\omega_z - \omega) + p_n (\Phi + L_d i_d) \omega \\ M_{em} = K_m \omega^2 - r_3 (\omega_z - \omega) \\ \omega_z = \frac{1}{T_w s + 1} \omega \end{cases}, \quad (9)$$

де T_w – стала часу аперіодичної ланки в колі зворотного зв'язку за швидкістю, а ω_z – сигнал швидкості із запізненням.

Стійкість САК з новими регуляторами (7) і (9) можна довести наступним чином. Запропоновані зміни у регулятори СЕФК (6) не змінюють вигляду елементів бажаної замкненої гамільтонової системи [6]

$\dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})] \frac{\partial H_d}{\partial \mathbf{x}}$, а саме: матриця взаємозв'язків бажаної системи $\mathbf{J}_d(\mathbf{x})$ є кососиметричною, матриця демпфування бажаної системи $\mathbf{R}_d(\mathbf{x})$ є діагональною з додатними елементами, а енергетична функція $H_d(\mathbf{x})$ – є квадратичною. Тоді:

$$\left[\frac{\partial H_d}{\partial \mathbf{x}} \right]^T \mathbf{J}_d(\mathbf{x}) \left[\frac{\partial H_d}{\partial \mathbf{x}} \right] = 0,$$

а похідна енергетичної функції бажаної системи по часу:

$$\frac{\partial H_d}{\partial t} = \left[\frac{\partial H_d}{\partial \mathbf{x}} \right]^T \dot{\mathbf{x}}(t) = \left[\frac{\partial H_d}{\partial \mathbf{x}} \right]^T [-\mathbf{R}_d(\mathbf{x})] \left[\frac{\partial H_d}{\partial \mathbf{x}} \right] < 0. \quad (10)$$

Отже, аналізуючи систему на стійкість за Ляпуновим, як функцію Ляпунова оберемо функцію бажаної повної енергії замкненої САК H_d , що є завжди додатно-визначеною. Тоді її похідна (10), як показано вище, завжди буде від'ємно-визначеною, що свідчить про асимптотичну стійкість системи у бажаній точці рівноваги.

З метою дослідження синтезованих СЕФК, було проведено низку порівняльних досліджень СЕФК з регуляторами (6), (7), (9) при різних їх налаштуваннях із системою керування на основі регулятора Morimoto (3) (рис. 1, 2). Дослідження проводились шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою MATLAB/Simulink

для ВЕУ з такими параметрами СГПМ та ВР: $R_s = 0,3 \text{ Ом}$, $L_d = 3 \text{ мГн}$, $L_q = 3 \text{ мГн}$, $\Phi = 0,4 \text{ Вб}$, $p_{II} = 20$, $A = 2,32 \text{ м}^2$, $R = 1,08 \text{ м}$, $J_m = 25 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ та $P = 0,5 \text{ кВт}$ при $V_b = 4 \text{ м/с}$. Оптимальне значення швидкості та максимальне значення коефіцієнта потужності для даного ВР є наступними: $C_{P \max} = 0,351$ та $\lambda_{\text{opt}} = 3,67$. Для СГПМ з розташуванням магнітів на поверхні ротора ($L_d = L_q$) закон керування ММА досягається за умови $i_{d0} = 0$ [8]. У даному випадку СГПМ, що керується за допомогою активного випрямляча напруги, 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 $V_{b, \text{ср}}$. За допомогою додаткового руйнівного 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 $T_{\text{ТВ}} = 400 \text{ с}$. Останні 20 с $T_{\text{ТВ}}$ турбулентна складова вітру відмикається, 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 СЕФК було досліджено за таких варіантів налаштувань регуляторів:

- I) $k = -100$, $r_1 = 0$, $r_2 = 0$, $r_3 = 7$;
- II) $k = 0$, $r_1 = 0$, $r_2 = 0$, $r_3 = 0$, +Morimoto;
- III) $k = -100$, $r_1 = 0$, $r_2 = 0$, $r_3 = 200$, +Morimoto, $+T_w = 0,1 \text{ с}$.

На рис. 1 продемонстровано роботу досліджуваних систем протягом тестового періоду. При всіх нульових

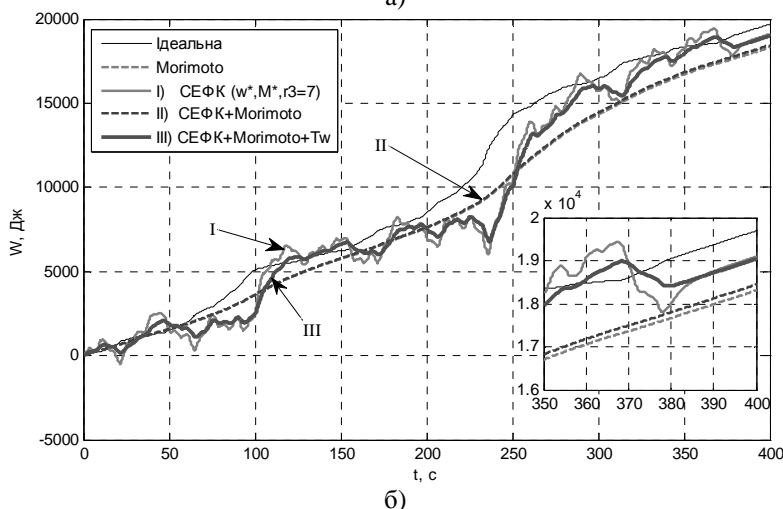
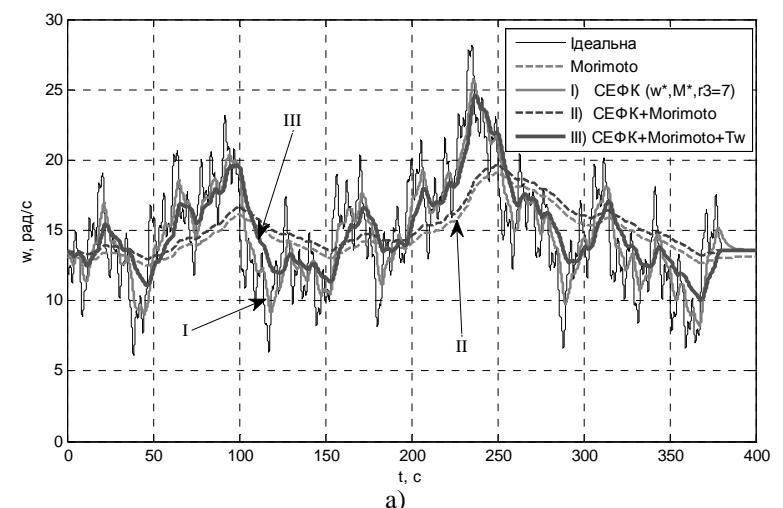


Рис. 1 Осцилограми роботи ВЕУ з різними системами керування при $V_{b, \text{ср}} = 4 \text{ м/с}$: а) кутова швидкість ВР; б) енергія, отримана від генератора протягом дослідного періоду

параметрах СЕФК з Morimoto (7) (система II) забезпечує кращу швидкодню (рис. 1, а та рис. 2, а), і, як наслідок, кращий відбір енергії (рис. 1, б та рис. 2, б) у порівнянні з використанням тільки регулятора Morimoto. В даній системі є можливість впливати на швидкодню та точність відпрацювання за рахунок коректуючого впливу коефіцієнта k , та незначного форсування за рахунок введення електричного демпфування r_1 та r_2 .

Запропонована СЕФК з Morimoto та аперіодичною ланкою (9) (система III), аналогічно до СЕФК (6) (система I) забезпечує роботу ВЕУ у режимі оптимальної швидкодії (рис. 1). Однак робота ВЕУ, керованої регулятором (9), у такому режимі є більш стійкою до зміни середньої швидкості вітру та зміни інтенсивності турбулентності. Регулятор (9) забезпечує стабільніший відбір енергії від вітру (рис. 1, б та рис. 2, в), що свідчить про менші коливання струму у колі навантаження. Слід також зауважити, що зростання T_w збільшуватиме швидкодню системи, тому рекомендовано задаватись $T_w = 0,1 \text{ с}$, а коректувальні налагодження на режим оптимальної швидкодії здійснювати механічним демпфуванням r_3 , виходячи з середніх значень швидкості та інтенсивності вітрового потоку (при великих значеннях – збільшити r_3 , і навпаки).

Висновок. У результаті поєднання енергетичних підходів з відомим способом бездавачевого керування ВЕУ за Morimoto та введення додаткового форсування електричних і механічних координат за кутовою швидкістю було одержано СЕФК (9), котра, на відміну від Morimoto, має широкі можливості у цілеспрямованому і простому налаштуванні, що забезпечуватиме стійку роботу системи в режимі оптимальної швидкодії. Навіть при нульових значеннях усіх параметрів налаштувань (k , r_1 , r_2 , r_3) синтезована система забезпечує кращу енергетичну ефективність ВЕУ порівняно з керованою за Morimoto.

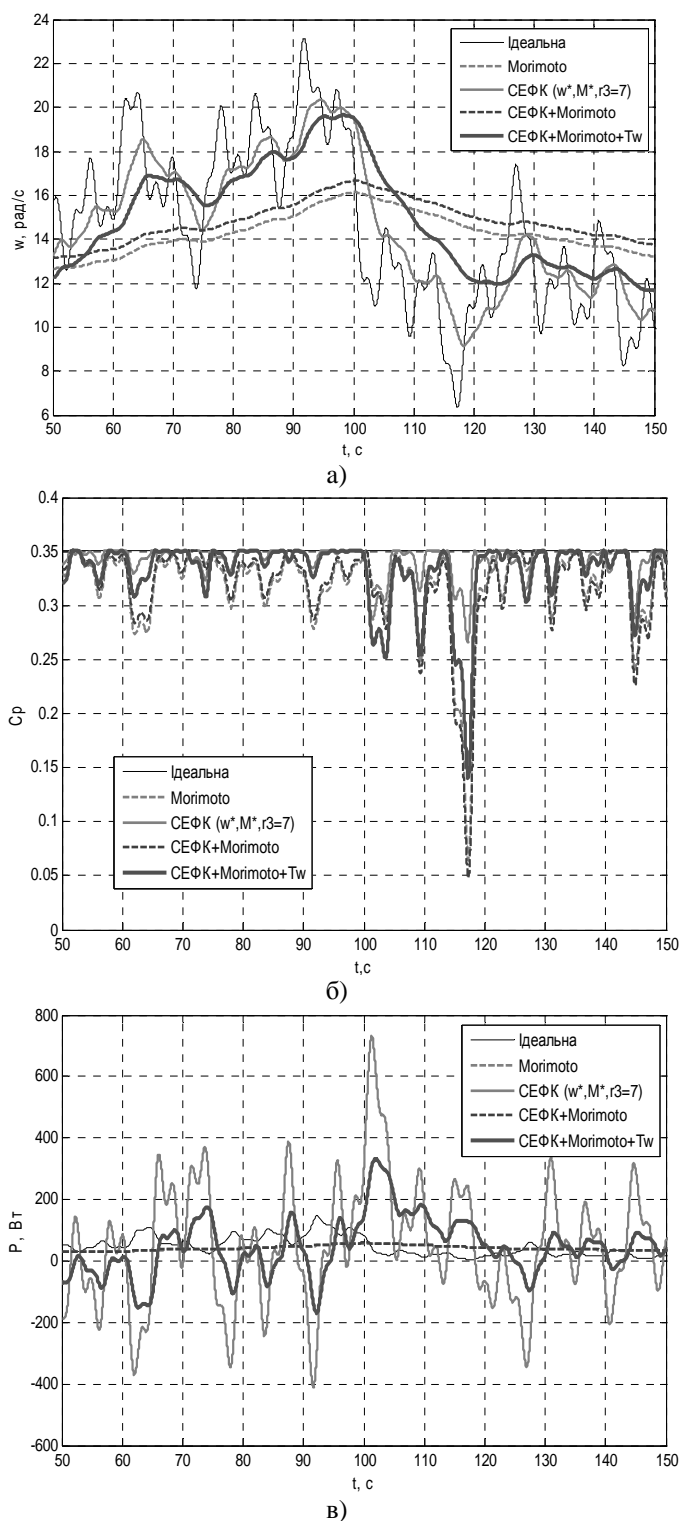


Рис. 2 Осцилограми роботи ВЕУ протягом дослідного періоду з різними системами керування при $V_{в.ср} = 4$ м/с:
 а) кутова швидкість ω ; б) коефіцієнт потужності C_p ;
 в) потужність, що отримується від генератора

ЛІТЕРАТУРА

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. политехн. ин-т": Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и 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.
4. Morimoto S. Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG / S.Morimoto, H.Nakayama, M.Sanada // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2005. – Vol. 41, no. 1. – Pp. 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. – Is. 21. – № 2. – Pp. 18-33.
6. Yu H. Speed regulation of PMSM based on port-controlled hamiltonian systems and PI control principle / H. Yu, Z. Zou., Sh. Yu // IEEE Inter. Conf. Aut. and Log. – Shenyang, 2009. – Pp. 647-651.
7. Щур І.З. Енергоформуєuche оптимальне керування навантаженням вітроелектроустановки з синхронним генератором на постійних магнітах / І.З. Щур, Ю.О. Білецький // Наук. пр. Донецьк. націон. тех. ун-ту. Серія "Електротехніка і енергетика" – Д.: ДВНЗ «ДонНТУ», 2013. – С. 280-286.
8. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives / B.K. Bose.– Prentice-Hall, N.J., 2002. – 711 p.
9. Щур І.З. Енергетичні підходи в керуванні нелінійними системами (на прикладі синхронної машини з постійними магнітами) / І.З. Щур, Ю.О. Білецький // Вісн. Націон. ун-ту "Львівська політехніка": Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів, 2012. – № 736. – С. 139-145.
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.