

## ЕНЕРГОФОРМІВНЕ КЕРУВАННЯ НЕЛІНІЙНИМИ СИСТЕМАМИ НА ПРИКЛАДІ ДВОЗОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

© Білецький Ю. О., Білецький Р. О., 2017

Серед перспективних неklasичних систем керування електромеханічними системами можна виокремити системи енергоформівного керування, де об’єкт розглядається як гамільтонова система з керованими портами. Основою енергоформівних систем керування є формування енергії системи відповідно до сформованого завдання. Розглянуто проблему синтезу енергоформівних систем керування з врахуванням нелінійностей. Прикладом для дослідження обрано двигун постійного струму з двозонним регулюванням швидкості, в моделі якого враховано нелінійність кривої намагнічування та зміну сталої часу кола збудження. Запропоновано два способи синтезу системи керування складним нелінійним об’єктом на основі його спрощеної моделі. Приведені результати досліджень у середовищі MATLAB Simulink демонструють високі динамічні і статичні показники отриманих систем енергоформівного керування.

*Ключові слова – енергетичні підходи, нелінійні системи, системи автоматичного керування, двозонне регулювання, структурний синтез, двигун постійного струму.*

Among the promising non-classical control systems electromechanical systems, it can be distinguished the system of energy-based control, where the object is taken as port-controlled Hamiltonian system. The energy shaping control essence consists in forming the shape of energy based on formed task. The article raises the problem of the synthesis of energy-based control systems with nonlinearities. As example, it was selected DC motor with two-zones speed control and model, that takes into account the nonlinearity of the magnetization curve and variable time constant of the field loop. The two ways of control system synthesis for complex nonlinear object are proposed, based on its simplified model. Shown research results in MATLAB Simulink environment demonstrate high dynamic and static characteristics of energy shaping control systems.

*Keywords – energy-based approaches, nonlinear systems, control systems, field control, structural control system synthesis, direct current motor.*

### Постановка проблеми

Протягом останніх років почали стрімко розвиватися новітні підходи до синтезу систем керування нелінійними системами, зокрема і електромеханічними. Це відкрило нові можливості у регулюванні роботи двигунів, подекуди змінюючи тенденції застосування тих чи інших приводів. Одним із перспективних підходів до керування нелінійними електромеханічними системами (ЕМС) є енергетичні підходи, зокрема ті, котрі ґрунтуються на гамільтоновому представленні [1]. Їх розроблення потребує глибокого розуміння фізичних процесів, що проходять у об’єктах керування, однак вони є простими у реалізації та налагодженні. Такі підходи тільки починають застосовуватися до ЕМС. За наявності потужного апарату синтезу саме нелінійних систем, приводи, до керування якими їх застосовували, розглядали як максимально спрощені об’єкти. В них не враховували такі важливі явища, як втрати в сталі, наявність кривої намагнічування, нелінійності, що виникають із зміною збудження, сухе тертя тощо. Це не лише не розкривало потенціал викорис-

тання енергетичних підходів, а й призводило до низьких статичних і динамічних показників отриманих систем і зумовлювало необхідність поєднання енергетичних підходів з іншими підходами.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним із найпоширеніших, зокрема у механіці, підходів до керування нелінійними системами є метод нелінійного енергетичного керування (nonlinear energy-based control method – NEM) [2]. В основу NEM покладено пасивне керування [3] (passivity based control – PBC). Його зміст полягає у забезпеченні регулювання та стійкості системи зміною енергії у керованій системі. Загалом, регулювання здійснюється у два етапи: енергоформування і введення демпфування. На етапі енергоформування система керування змінює енергію системи з метою досягнення бажаної робочої точки [1]. Подальше введення «демпфування» необхідне для забезпечення пасивності системи [2], а також прискорення формування перехідних процесів [3].

Розвитком NEM стало так зване пасивне керування шляхом формування взаємозв'язків та демпфування (interconnection and damping assignment passivity-based control – IDA-PBC) [4], визначною особливістю якого є можливість розкласти складну нелінійну систему на прості підсистеми, що певним чином зв'язані між собою. Отже, синтез системи керування став полягати у знаходженні такої сукупності взаємозв'язаних підсистем (визначення додаткової сукупності рівнянь для цих взаємозв'язків), щоб енергетична функція всієї системи набула потрібного вигляду [1]. Для полегшення використання такого енергоформівного підходу, як IDA-PBC, систему записують у вигляді гамільтонової моделі з керованими портами, в якій енергетичні змінні розмежовані, і яка має загальний вигляд [5]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{G}^T(\mathbf{x}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \end{cases}, \quad (1)$$

де  $\mathbf{x}(t)$  – вектор енергетичних змінних стану;  $H[\mathbf{x}(t)]$  – функція повної енергії системи;  $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}^T(\mathbf{x})$  – кососиметрична матриця, котра відображає зв'язки у системі;  $\mathbf{R}(\mathbf{x}) = \mathbf{R}^T(\mathbf{x})$  – додатна симетрична матриця дисипацій системи;  $\mathbf{G}(\mathbf{x})$  – матриця портів системи;  $\mathbf{u}(t)$  та  $\mathbf{y}(t)$  – вектори вхідних та вихідних змінних відповідно.

З метою дослідження ефективності використання енергетичних підходів загалом, та енергетичних підходів розвитку в напрямку керування нелінійними електромеханічними системами доцільно синтезувати систему енергоформівного керування (СЕФК) об'єктом з ускладненою моделлю, наприклад, з врахуванням особливостей у колах збудження. Як об'єкт із загальновідомим принципом роботи та гнучкістю регулювання можна обрати двигун постійного струму незалежного збудження (ДПС). Попри їх витіснення у певних нішах промисловості на користь інших типів електричних двигунів, ДПС все ще широко використовуються у промисловості завдяки низці унікальних особливостей, які і забезпечують постійний попит на них у деяких галузях. Це такі якості, як: лінійність механічних характеристик двигунів; простота розрахунку і моделювання їх роботи; симетрична оборотність роботи двигуна (справедливість виразів, що описують роботу двигуна, при переході у генераторний режим); простота експлуатації та керування ними, зокрема і синтез систем керування роботою двигунів [6].

Отже, постає завдання розроблення систем керування ДПС, яка має можливість одночасно ефективно керувати кількома параметрами – колами збудження та якоря, що може водночас розширити можливості використання енергетичних підходів, а також розкрити новий потенціал щодо застосування ДПС та підвищити якість і ефективність роботи в уже наявних установках, які використовують цей тип машин.

### Ціль статті

Розробити спосіб синтезу СЕФК для ЕМС з явно вираженими нелінійностями. На основі енергетичних підходів синтезувати оптимальну систему двозонного керування нелінійним

електроприводами на базі ДПС, що враховує криву намагнічування. Результати підтвердити методом математичного моделювання в середовищі Matlab/Simulink.

### Виклад основного матеріалу

Проілюструємо процедуру синтезу СФЕК на одній з найпростіших моделей ДПС – моделі з формуванням лише одного керуючого впливу на систему, а саме вихідної напруги напівпровідникового перетворювача (НП). Вона описується такою системою рівнянь [7]:

$$\begin{cases} L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} = k_{\text{нп}} u_k - C\Phi\omega - R_{\text{я}} i_{\text{я}} \\ J \frac{d\omega}{dt} = C\Phi i_{\text{я}} - M_c \end{cases}, \quad (2)$$

де  $L_{\text{я}}$  і  $R_{\text{я}}$  – індуктивність і опір обмотки якоря;  $u_k$  – напруга керування;  $k_{\text{нп}}$  – коефіцієнт передавання НП;  $C\Phi$  – стала двигуна;  $\omega$  – кутова швидкість;  $i_{\text{я}}$  – струм якоря;  $J$  – момент інерції приводу;  $M_c$  – момент статичного навантаження.

В основі законів, за якими формуються СЕФК, є передача і накопичення енергії в обраній системі. У випадку ДПС беруть до уваги такі процеси, як самоіндукція, взаємоіндукція, зворотна електрорушійна сила, перехід електричної енергії у форму обертової кінетичної енергії та інші відповідно до приведення розглянутої віртуальної моделі керованої системи до реальної. Загалом поточний стан системи можна охарактеризувати у вигляді гамільтонову – сумарної енергії системи:

$$H(\mathbf{x}) = I^2 / 2J + p^2 / 2L, \quad (3)$$

де  $\lambda = \omega \cdot J$ ,  $p = i \cdot L$  – механічний імпульс та магнітний імпульс системи відповідно, адже така система, як ДПС, має кілька енергетичних ємностей різної природи – кінетичної, електричної та магнітної.

Хоч електрична енергія не має суттєвої власної ємності, вона є проміжним видом енергії, який зв'язує енергетичні ємності інших двох видів між собою, наповнює чи спорожняє їх. Момент інерції якоря двигуна із приєднаним до нього механізмом та індуктивність обмотки якоря чи збудження є сталими величинами, які характеризують ці ємності, а кутова швидкість та струм відповідно – динамічними, за якими і визначається стан системи, і котрі можна безпосередньо виміряти. Згадані процеси характеризуються своїми сталими зв'язками із певними фізичними величинами стану системи, завданнями та зв'язками між собою, що може бути відображено у вигляді гамільтонової моделі (1).

Виходячи з отриманої гамільтонової моделі об'єкта та бажаної гамільтонової системи, отримаємо відоме рівняння для синтезу формувачів керуючих впливів (ФКВ) для СЕФК [8]:

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

де  $\mathbf{J}_d(\mathbf{x})$  і  $\mathbf{J}(\mathbf{x})$  – відповідно бажані взаємозв'язки та взаємозв'язки ДПС;  $\mathbf{R}_d(\mathbf{x})$  і  $\mathbf{R}(\mathbf{x})$  – відповідно бажане демпфування та демпфування у ДПС;  $H_d(\mathbf{x})$  – бажана функція повної енергії всієї системи.

Ввівши у відповідні позиції дані про дисипації та ємності енергії, ми можемо надавати системі рівно стільки енергії, скільки необхідно для її функціонування у заданій робочій точці за вирахуванням дисипацій або для переходу з однієї заданої робочої точки в іншу. Важливим фактором у роботі є побудова правильної моделі системи та обізнаність у її принципах роботи, що вимагається для заповнення матриць і векторів.

ДПС (2), записаний як гамільтонова система (1), матиме такі елементи [7]:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} L_{\text{я}} i_{\text{я}} \\ J\omega \end{bmatrix} = \mathbf{D} \begin{bmatrix} i_{\text{я}} \\ \omega \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} k_{\text{нп}} u_k \\ -M_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} i_{\text{я}} \\ \omega \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} L_{\text{я}} & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -C \\ C & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{\text{я}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Задаємось таким виглядом матриць системи керування:

$$\mathbf{J}_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_d = \begin{bmatrix} r_{11} & 0 \\ 0 & r_{22} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де  $r_{11}$  і  $r_{22}$  – параметри системи керування (електричне та механічне демпфування).

Підставивши матриці (6) і (5) до рівняння (4), одержимо такі рівняння ФКВ для ДПС [9]:

$$\begin{cases} u_k k_{nn} = -r_{11}(i_a - i_{a0}) - R_a i_a + C\Phi w_0 \\ i_{a0} = M_c / C\Phi - (w - w_0)r_{22} / C\Phi \end{cases} \quad (7)$$

Фізичне підґрунтя СЕФК забезпечує високі статичні характеристики їх роботи та дає змогу доволі гнучко регулювати динамічні характеристики. У синтезованих СЕФК для ДПС, згідно з виведеними рівняннями (6) вхідної напруги якоря двигуна відносно стану системи, передбачено можливість регулювання динаміки за допомогою заданих вручну коефіцієнтів електричного та умовно механічного демфування, чи навпаки – форсування. Будучи зручними у налаштуванні, вони практично не поступаються вже відлагодженим класичним системам автоматичного керування [7].

З метою перевірки застосування енергетичних підходів до нелінійних ЕМС запропоновано синтезувати СЕФК для ДПС НЗ із двозонним регулюванням швидкості та врахуванням насичення.

Для синтезу СЕФК розглянемо лінеаризовану математичну модель ДПС з врахуванням кола збудження у вигляді:

$$\begin{cases} L_{я} \frac{di_{я}}{dt} = k_{nn} u_k - C\Phi w - R_{я} i_{я} \\ J \frac{dw}{dt} = C\Phi i_{я} - M_c \\ L_{зб} \frac{di_{зб}}{dt} = k_{nn} u_{зб} - R_{зб} i_{зб} \end{cases} \quad (8)$$

де  $L_{зб}$  і  $R_{зб}$  – індуктивність і опір обмотки збудження (ОЗ);  $u_{зб}$  – напруга живлення ОЗ;  $\Phi = i_{зб} L_{зб}$  – магнітний потік;  $i_{зб}$  – струм збудження.

На основі моделі об'єкта (8) та задавшись матрицями системи керування запишемо загальне рівняння для синтезу ФКВ (4):

$$\begin{pmatrix} -R_{я} & -i_{зб} L_{зб} C & 0 \\ i_{зб} L_{зб} C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_{зб} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_{я} & 0 & 0 \\ 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & L_{зб} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} i_{я} L_{я} \\ wJ \\ i_{зб} L_{зб} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_{nn} u_k \\ -M_c \\ k_{nn} u_{зб} \end{pmatrix} = \\ = \left( \begin{pmatrix} -R_{я} & -(i_{зб} L_{зб} C) & 0 \\ i_{зб} L_{зб} C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_{зб} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -j_{ra11} & j_{ra12} & j_{ra13} \\ -j_{ra12} & -j_{ra22} & j_{ra23} \\ -j_{ra13} & -j_{ra23} & -j_{ra33} \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} L_{я} & 0 & 0 \\ 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & L_{зб} \end{pmatrix}^{-1} \left( \begin{pmatrix} i_{я0} L_{я} \\ wJ \\ i_{зб0} L_{зб} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} i_{я0} L_{я} \\ w_0 J \\ i_{зб0} L_{зб} \end{pmatrix} \right) \quad (9)$$

де  $j_{ra11} \dots j_{ra33}$  – елементи матриць систем керування  $\mathbf{J}_a(\mathbf{x})$  і  $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$ .

Отримуємо систему рівнянь, котра описуватиме систему керування за керуючими впливами.

Як і для спрощеної моделі (2), коефіцієнт  $j_{ra12}$  прирівнюється до нуля, виходячи з відсутності нелінійного зв'язку між колом якоря та механічною частиною системи. Щодо коефіцієнтів  $j_{ra13}$  і  $j_{ra23}$ , то їх виведемо за умовами статички системи у вигляді:

$$j_{ra13} = -CL_{зб} w_0 \quad j_{ra23} = CL_{зб} i_{я0}$$

Тоді рівняння ФКВ СЕФК для ДПС НЗ набудуть вигляду:

$$\begin{cases} k_{nn} u_k = i_{я0} R_{зб} + (i_{я0} - i_{я}) j_{ra11} + C i_{зб0} w_0 L_{зб} \\ k_{nn} u_{зб} = i_{зб0} R_{ОЗ} + (i_{я} w_0 - i_{я0} w) (CL_{зб}) + (i_{зб0} - i_{зб}) j_{ra33} \\ i_{я0} = [M_c - (w - w_0) j_{ra22}] / C i_{зб0} L_{зб} \end{cases} \quad (10)$$

Дослідження цієї СЕФК під час керування ДПС з нелінійностями показали, що отримана система не може ефективно працювати в реальній системі, оскільки в моделі (8) не враховано присутні у керованому об'єкті нелінійність характеристики намагнічування машини, а також зміну сталої часу ОЗ. Із врахуванням їх у моделі (8) суттєво ускладнюється процедура як синтезу СЕФК, так і отриманих рівнянь ФКВ.

З метою покращення характеристик систем керування на основі енергетичних підходів поєднують такі системи з класичними [10]. Для синтезу роботоздатної і простої СЕФК нелінійним

ДПС запропоновано синтезувати СЕФК спрощеною моделлю (8), а тоді використати цей підхід і доповнити її адаптуючим коректором вихідного сигналу.

Оскільки для того, щоб мати певний потік у двигуні, потрібно надати йому відповідний струм в обмотці, а потім на основі характеристики намагнічування побудувати ампер-веберну характеристику, котра є оберненою намагнічувальною, і відповідає значенню необхідного струму завдання для досягнення бажаного потоку. Отже, синтезувавши систему керування лінійним об'єктом (10), її вихідний сигнал завдання  $k_{nn} u_{зб}^*$  слід подати на адаптуючий коректор

$$k_{nn} u_{зб}^* = f(k_{nn} u_{зб} / R_{зб}) R_{зб}. \quad (11)$$

Це дасть змогу адаптувати роботу системи керування, синтезованої для лінійної систем, до роботи в умовах реальних нелінійностей, тобто статика системи знову стає придатною для розрахунку за лінійними фізичними законами. Однак запропонований підхід введення адаптуючого коректора має низку недоліків, зокрема: він не дає змоги врахувати зміну сталої часу ОЗ та частково нівелює природні властивості гамільтонових систем, зокрема асимптотичну стійкість.

Для перевірки роботи отриманої СЕФК з адаптуючим коректором було проведено порівняльні дослідження під час роботи системи в першій (рис. 1, а) та другій (рис. 1, б) зонах за різних налаштувань, зокрема:

- 1) без внесення додаткового демпфування;
- 2) з демпфуванням у колі збудження ( $j_{га33} = 10,8$ );
- 3) з демпфуванням у колі збудження ( $j_{га33} = 10,8$ ) та електричним ( $j_{га11} = 0,16$ );
- 4) з демпфуванням у колі збудження ( $j_{га33} = 10,8$ ) та механічним ( $j_{га22} = 4,15$ ).

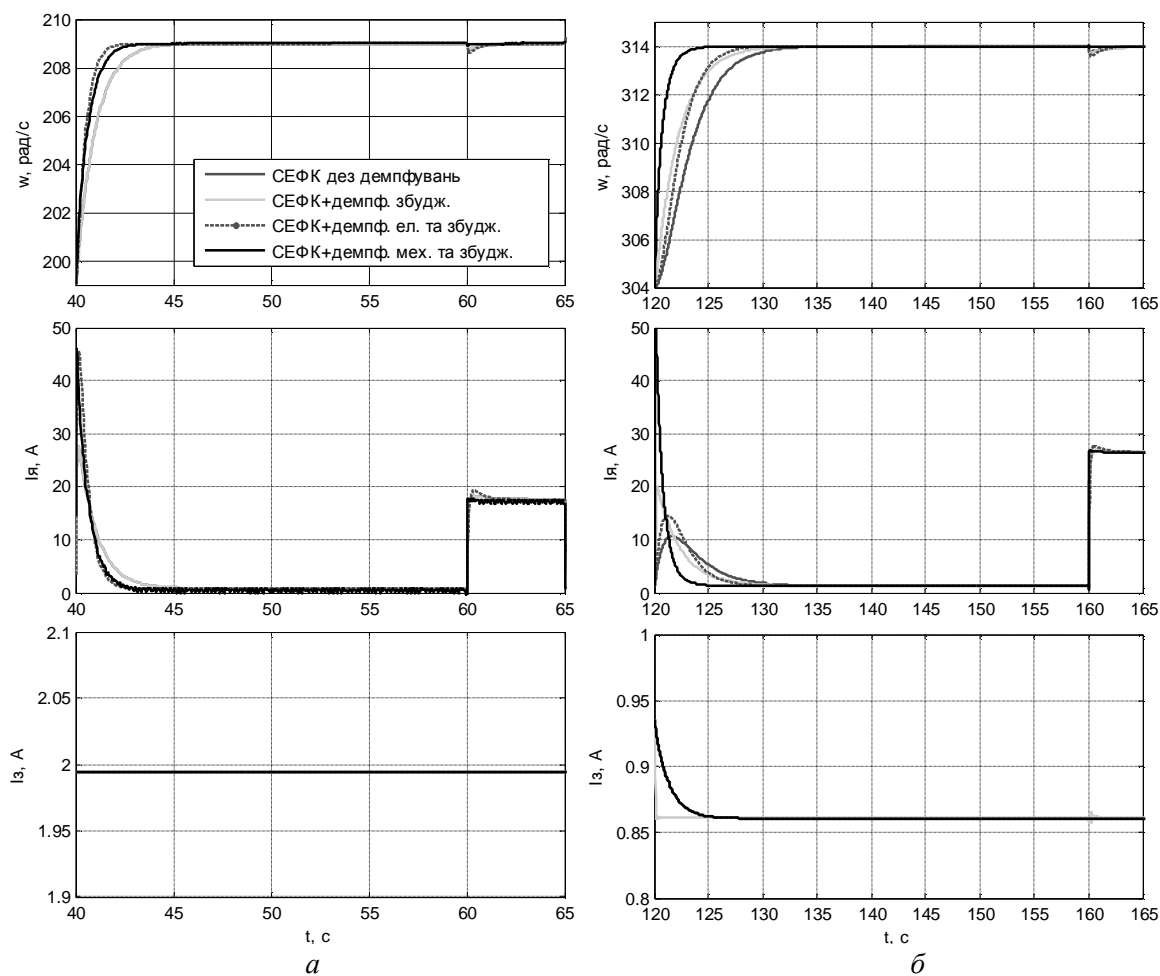


Рис. 1. Порівняльні дослідження СЕФК з адаптуючим коректором за різних налаштувань: а – в першій зоні; б – в другій зоні

Параметри досліджуваної машини є такими:  $P_n = 4,4$  кВт,  $n_n = 3000$  об/хв,  $U_n = 220$  В,  $I_n = 18,7$  А,  $R_{я} = 0,34$  Ом,  $J_m = 3$  кг·м<sup>2</sup>,  $p = 1$ ,  $L_{я} = 0,015$  мГн,  $R_{зб} = 110$  Ом,  $L_{збн} = 100$  мГн. Налаштування виконано для отримання максимальної швидкодії під час відпрацювання зміни сигналу завдання на 5 %  $n_n$ . Дослідження проводили в обох зонах так: двигун працює з навантаженням 5 %  $M_n$ , в певний момент часу збільшується сигнал завдання на 5%  $n_n$ , після певного часу відбувається накид навантаження до номінального. У разі роботи в першій зоні  $i_{зб0} = 0,2$  А, а в другій розраховували відповідно до бажаної швидкості  $i_{зб0} = f(w_0)$ .

Відповідно до одержаних результатів можна зробити такі висновки:

- СЕФК з адаптуючим коректором забезпечують високі статичні і динамічні показники систем;
- ведення електричного та механічного демпфування дає змогу покращити динаміку системи;
- наявність механічного демпфування забезпечує лінійність динаміки СЕФК.

З метою покращення одержаних результатів, а також збереження властивостей гамільтонових систем за умови використання спрощеної моделі системи (8) запропоновано враховувати нелінійність системи на етапі формування сигналу завдання на струм, тоді залежність  $i_{зб0} = f(w_0)$  стає нелінійною. При такому формуванні  $i_{зб0}$  структура СЕФК (система керування + керований об'єкт) залишається незмінною і відповідає бажаній гамільтоновій.

Отримані за цим підходом СЕФК було досліджено (рис. 2) за таких налаштувань: 1 –  $j_{га11} = j_{га22} = j_{га33} = 0$ ; 2 –  $j_{га33} = 100$ ; 3 –  $j_{га33} = 100$ ,  $j_{га11} = 0,17$ ; 4 –  $j_{га33} = 100$ ,  $j_{га22} = 3,6$ .

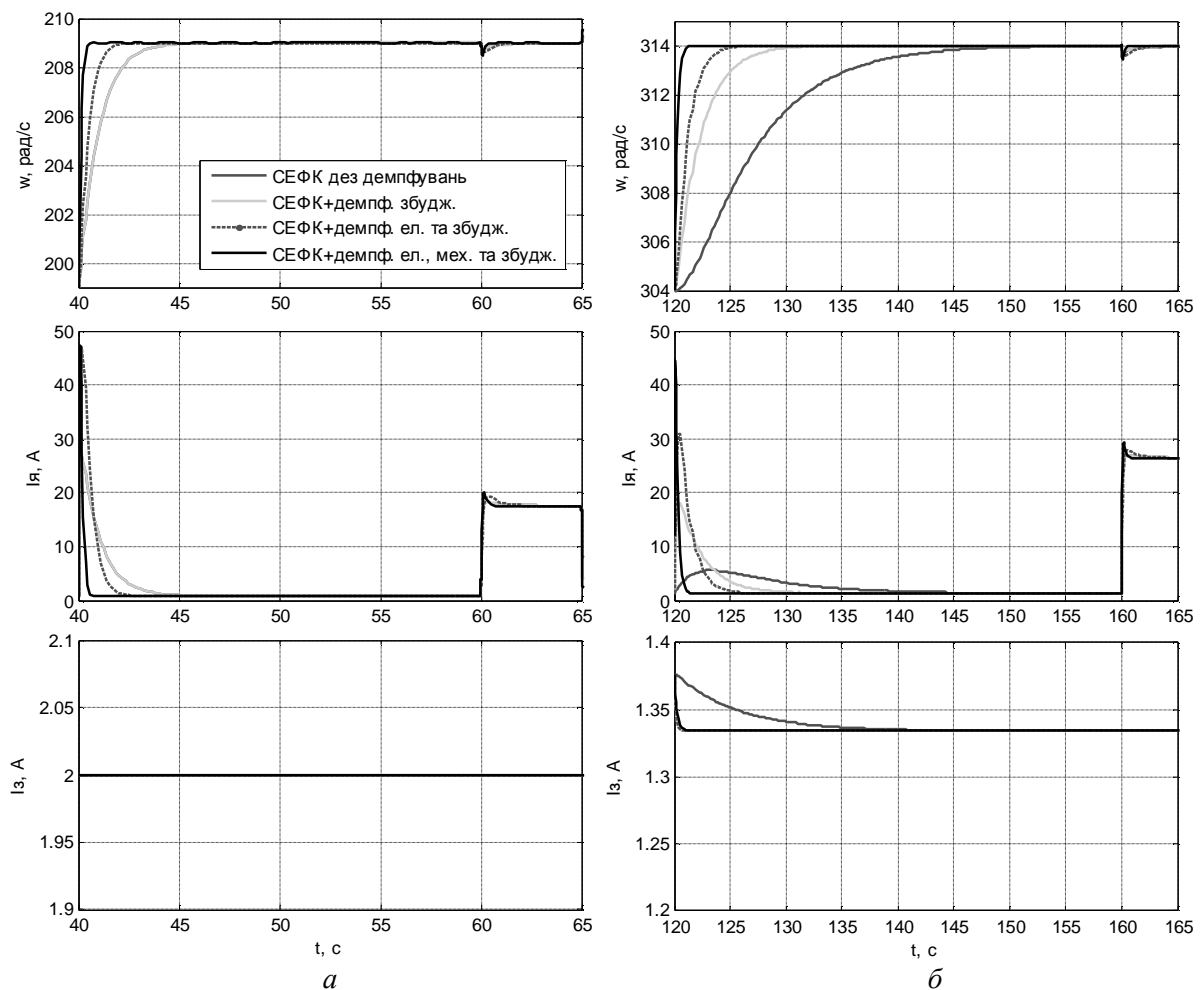


Рис. 2. Порівняльні дослідження СЕФК з адаптованим сигналом завдання за різних налаштувань у: а – першій зоні; б – другій зоні

## Висновки

Одним з нових напрямів побудови систем керування складними нелінійними об'єктами є енергетичні підходи. В них найважливішими кроками синтезу систем керування є запис коректної моделі та правильне переведення у вигляд лагранжевої або гамільтонової системи. Врахування всіх нелінійностей у моделі складної ЕМС ускладнює процедуру синтезу і кінцевих рівнянь ФКВ. Запропоновано два підходи для синтезу СЕФК такою системою на базі її спрощеної моделі, а саме: перший – синтез адаптуючого коректора, що корегуватиме вихідний сигнал ФКВ; другий – формування сигналу завдання, що враховуватиме нелінійність. За цими підходами одержано СЕФК для ДПС НЗ із двозонним регулюванням швидкості, в моделі якого враховано нелінійність кривої намагнічення та зміну сталої часу ОЗ. Дослідження показали, що обидва підходи дають змогу одержати СЕФК з високими статичними і динамічними показниками, а наявність механічного демпфування забезпечує лінійність динаміки. Корегування сигналу завдання не тільки зберігає властивості бажаної гамільтонової системи, а й забезпечує дещо вищу швидкодію.

1. Ortega R. *Putting Energy Back in Control* / R. Ortega, A. J. van der Schaft, I. Mareels, B. Maschke // *IEEE Contr. Syst. Mag.* – 2001. – Vol. 21, n. 2. – P. 18–33. 2. Akmeliawati R. *Nonlinear energy-based control method for landing autopilot* / R. Akmeliawati, I. Mareels // *IFAC Proceedings.* – 2002. – Vol. 35, n. 1. – P. 169–174. 3. Ortega R. *New results on Control by Interconnection and Energy-Balancing Passivity-Based Control of port-hamiltonian systems* / R. Ortega, L. P. Borja // *IEEE Conf. on Dec. and Cont., Los Angeles.* – 2015. – P. 2346–2351. 4. Höffner K. *Geometric Aspects of Interconnection and Damping Assignment – Passivity-Based Control* / K. Höffner // *A thesis submitted to the Department of Chemical Engineering in conformity for the degree of Doctor of Philosophy.* – 2011. – P. 104–113. 5. Ortega R. *Control by Interconnection and Standard Passivity-Based Control of Port-Hamiltonian Systems* / R. Ortega, A. J. van der Schaft, F. Castanos, A. Astolfi // *IEEE Trans. Aut. Control.* – 2008. – Vol. 53, n. 11. – P. 2527–2542. 6. *Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи* / [М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Кленіков та ін.]. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. 7. Shchur I. *Optimization of energy-shaping control of port-controlled Hamiltonian system* / I. Shchur, Y. Biletskyi // *Computational problems of electrical engineering.* – 2013. – Vol. 3, n.2. – P. 101–106. 8. Zhang M. *A new family of interconnection and damping assignment passivity-based controllers* / M. Zhang, R. Ortega, Z. Liu, H. Su // *International Journal of Robust and Nonlinear Control.* – 2017.– Vol. 27(1). – P. 50–65. 9. Biletskyi R. *Control systems for DC motor as port-controlled Hamiltonian system* / R. Biletskyi, Y. Biletskyi // *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Int. Conf. of Young Scientists EPECS-2016.* – L.: Lviv Polytechnic Publishing House. – 2016. – P. 197–198, – *Electronic edition on CD-ROM* 10. Aranovskiy S. *Robust PI passivity-based control of nonlinear systems: Application to port-Hamiltonian systems and temperature regulation* / S. Aranovskiy, R. Ortega, R. Cisneros // *American Cont. Conf. Chicago, USA.* – 2015. – P. 434–439.