

## СИСТЕМИ ЕНЕРГОФОРМУЮЧОГО КЕРУВАННЯ СИНХРОННОЮ МАШИНОЮ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ЯК ГАМІЛЬТОНОВОЮ СИСТЕМОЮ З КЕРОВАНИМИ ПОРТАМИ

© Білецький Ю. О., 2016

Розглянуто основні методи синтезу систем керування гамільтоновими системами з керованими портами на основі енергетичних підходів, зокрема пасивне керування, використання енергетичного балансування, формування бажаних демпфування та взаємозв'язків, а також їх поєднання з елементами теорій лінійних та нелінійних систем керування. Наведено приклади застосування таких методів для нелінійного об'єкта – синхронної машини з постійними магнітами. Наведено результати їх комп'ютерного дослідження та детального аналізу.

*Ключові слова: енергетичні підходи, нелінійні системи, методи синтезу систем керування, пасивне керування, гамільтонова система з керованими портами, формування взаємозв'язків та демпфування, синхронна машина з постійними магнітами.*

Main energy-based methods for synthesis of control systems of port-controlled Hamiltonian systems were considered, in particular: passivity-based control, energy-balance approach, interconnection and damping assignment and their combination with elements from linear and nonlinear control system theory. There are shown examples of using such methods for nonlinear object – permanent magnet synchronous machine. Result of their computer research and detail analyzes are presented as well.

*Key words: energy-based approaches, nonlinear systems, methods of control system synthesis, passivity-based control, port-controlled Hamiltonian system, interconnection and damping assignment, permanent magnet synchronous machine.*

### Постановка проблеми

Одними з найпоширеніших електромеханічних систем є системи на базі синхронних машин з постійними магнітами (СМПМ). Щораз більше ускладнення таких систем та зростання вимог до керування ними зумовлює пошук нових систем керування, які б дали змогу оперувати зі складними об'єктами, реалізовували нові методи керування і залишалися простими у налаштуванні. До останніх належать системи керування на основі енергетичних підходів. Універсальний апарат синтезу систем керування за енергетичними підходами спричинив стрімкий розвиток таких систем. У зв'язку з великою кількістю пропонованих методів синтезу та отриманих за ними систем керування проблемою є пошук оптимального методу синтезу системи керування на основі енергетичних підходів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Загалом синтез систем керування на основі енергетичних підходів полягає у розбитті складної електромеханічної системи на простіші підсистеми, що в певний спосіб зв'язані між собою, та знаходженні такої сукупності взаємозв'язаних підсистем, щоб енергетична функція цілої системи набула потрібного вигляду [1]. Одними з найперспективніших методів синтезу таких систем керування вважаються методи, що розглядають керований об'єкт як гамільтонову систему з керованими портами (входами і виходами) [2], яка описується матричною системою рівнянь стану:

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

де  $\mathbf{x} \in R^n$  – вектор стану;  $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}^T(\mathbf{x})$  – кососиметрична матриця, що відображає взаємозв'язки у системі;  $\mathbf{R}(\mathbf{x}) = \mathbf{R}^T(\mathbf{x}) \geq 0$  – симетрична додатна матриця, що відображає втрати в системі;  $H[\mathbf{x}(t)]$  – функція повної енергії системи;  $\mathbf{u} \in R^m$  – вектор вихідних енергетичних змінних;  $\mathbf{G}(\mathbf{x})$  – матриця портів.

Цей підхід охоплює широкий клас систем, а також дає змогу спростити і зробити прозорішим подальший аналіз системи на стійкість.

Найпростішим методом синтезу систем керування на основі енергетичних підходів є метод пасивації системи (PBC) [2]. Він полягає у забезпеченні системою керування пасивності усієї системи для того, щоб система працювала у бажаній точці рівноваги, адже саме пасивність забезпечує загасання коливань у системі та її усталену роботу у вибраній точці  $\mathbf{x}_0$  [1]. Система пасивного керування характеризується зрозумілістю процедури синтезу з фізичного погляду, а також високим ступенем робастності. Під час синтезу системи пасивного керування враховують практичні обмеження, зокрема неможливість вимірювання певних координат [3].

З метою вдосконалення таких систем ще у 1999р. було запропоновано поєднати пасивацію з класичними регуляторами, що дало б змогу впливати на статику та динаміку таких систем відомими способами. Оскільки саме пасивація визначає усталену точку рівноваги, то класичні регулятори виконують функцію коректуючих елементів у системі керування.

Успішним напрямком розвитку енергетичних підходів стало енергетичне балансування [4]. Спершу воно було розвинуте для лагранжевих систем, а потім застосоване до гамільтонових. Керування на основі формування енергетичного балансу в системі полягає у забезпеченні системою керування такої енергії на вході керованого об'єкта, щоб енергетична функція всієї системи набувала певного бажаного вигляду [5]:

$$H_d(\mathbf{x}) = H_d(\mathbf{x}) - H(\mathbf{x}), \quad (2)$$

де  $H_d(\mathbf{x})$  і  $H_a(\mathbf{x})$  – відповідно бажана функція повної енергії цілої системи та корегуюча функція енергії, що забезпечується системою керування.

Для використання такого керування необхідно, щоб замкнена система автоматичного керування (САК) була циклопасивною, а її внутрішня функція витрати і вихідна функція відповідали розімкненій системі.

Одними із найпоширеніших методів синтезу систем керування є ті, що ґрунтуються на формуванні бажаних взаємозв'язків та демпфування (IDA-PBC)[5]:

$$\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{J}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_a(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}_d^T(\mathbf{x}), \quad (3)$$

де  $\mathbf{J}_d(\mathbf{x})$  і  $\mathbf{J}_a(\mathbf{x})$  – відповідно бажані та додатково введені взаємозв'язки,

$$\mathbf{R}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{R}(\mathbf{x}) + \mathbf{R}_a(\mathbf{x}) = \mathbf{R}_d^T(\mathbf{x}) \geq 0, \quad (4)$$

де  $\mathbf{R}_d(\mathbf{x})$  і  $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$  – відповідно бажане демпфування та демпфування, що забезпечується системою керування.

Введення взаємозв'язків та демпфування забезпечує керування всією енергією системи і дисипативними енергетичними процесами у ній. Саме введення взаємозв'язків формує «потенціальну яму» та забезпечує прямування системи до робочої точки, а введення демпфування забезпечує потрібну швидкість цього процесу.

Відомо велику кількість підходів до формування матриць взаємозв'язків та демпфування в межах методу IDA-PBC [3, 5–7].

Для покращення динамічних і статичних показників описаний метод поєднують з методами нелінійної теорії керування, зокрема з принципом демпфування збурень L2-ланкою [8]. Як і у

випадку поєднання класичних регуляторів з PBC, система керування синтезована за IDA-PBC формуватиме бажану точку рівноваги, а додаткові елементи демпфування збурень L2-ланкою – здійснюватимуть корегуючі впливи.

Вище наведено лише основні напрямки розвитку методів синтезу систем керування на основі енергетичних підходів. Враховуючи їх велику кількість та новизну, доцільним є виконати порівняльні дослідження систем керування, одержаних за цими методами для такого поширеного нелінійного об'єкта керування, як СМПМ.

### Ціль статті

Знайти оптимальну систему векторного керування СМПМ на основі енергетичних підходів. Результати підтвердити комп'ютерними дослідженнями.

### Виклад основного матеріалу

Для синтезу будь-якої системи керування на основі енергетичних підходів – системи енергоформуючого керування (СЕФК) зручно використовувати модель СМПМ в обертових координатах  $d$ - $q$ , що зв'язані з ротором, яка має вигляд [9]

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} = -R_s i_d + p\omega L_q i_q + u_d \\ L_q \frac{di_q}{dt} = -R_s i_q - p\omega L_d i_d - p\omega \Phi + u_q \\ J_m \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d i_q + \Phi i_q] - M_L \end{cases}, \quad (5)$$

де  $L_d$  і  $L_q$  – індуктивності обмотки статора по осях відповідно  $d$  і  $q$ ;  $R_s$  – фазний опір;  $p$  – кількість пар полюсів;  $\omega$  – кутова швидкість;  $\Phi$  – магнітний потік полюса постійних магнітів ротора;  $J_m$  – момент інерції;  $M_L$  – момент статичного навантаження.

Загальний вигляд схеми електроприводу з СЕФК електроприводу на базі СМПМ показаний на рис. 1. СЕФК на основі сигналу завдання швидкості та сигналів зворотних зв'язків (з датчиків струму ДС та енкодера Е), формує завдання на інвертор, що живить СМПМ і під'єднаний до мережі через випрямляч. Оскільки синтез СЕФК відбувається на основі математичної моделі СМПМ в обертовій системі координат  $d$ - $q$ , то і керуючі впливи формуються в цих координатах згідно з виразами системи керування.

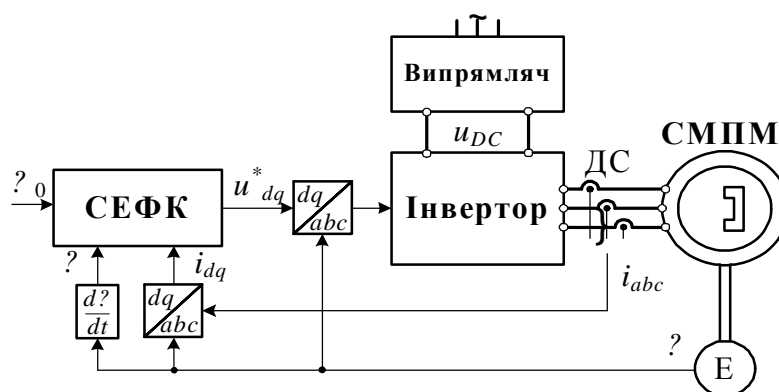


Рис. 1. Функціональна схема електроприводу на базі СМПМ з СЕФК

Формувач керуючих впливів (ФКВ) СЕФК на основі PBC (з використанням лише пасивації) для СМПМ, що розглядається як гамільтонова система з керованими портами, має такий вигляд [2]:

$$\begin{cases} u_d^* = -p_p L_q i_{q0} w_0 \\ u_q^* = (L_d i_{d0} + \Phi) w_0, \\ M_{em}^* = M_L \end{cases} \quad (6)$$

де  $u_d^*$  і  $u_q^*$  – сигнали завдання за проекціями по осях  $d$  і  $q$  вектора напруги;  $i_{d0}$  – сигнал завдання за струмом по осі  $d$ , що формується відповідно до закону керування;  $i_{q0}$  – сигнал завдання за струмом по осі  $q$ , що відповідає моментові статичного навантаження та  $i_{d0}$ ;  $w_0$  – сигнал завдання на кутову швидкість  $M_{em}^*$  – сигнал завдання на електромагнітний момент машини.

ФКВ (6) – це лінійний регулятор для керування нелінійним об'єктом, що здійснює керування накопиченням енергії системи та її розсіюванням через зворотні зв'язки з метою регулювання бажаних координат. Така система позбавлена і можливості враховувати втрати в обмотках та нелінійності в об'єкті при формуванні бажаної точки рівноваги, і будь-яких додаткових регулювальних можливостей для форсування/сповільнення перехідного процесу.

Пропонований у літературі підхід для поєднання (6) з класичними регуляторами виглядає так:

$$\begin{cases} u_d^* = -L_q i_q w + u_{d1} \\ u_q^* = (\Phi + L_d i_d) w + u_{q1}, \\ M_{em}^* = M_L \end{cases} \quad (7)$$

де  $u_{d1}$  та  $u_{q1}$  – додаткові сигнали керування, що формуються класичними регуляторами (наприклад II або III).

Проте така система втрачає основну перевагу систем керування на основі енергетичних підходів, а саме: фізичну інтерпретацію. Налаштування системи керування зводилось до підбору параметрів застосованих класичних регуляторів, адже поєднання з СЕФК не давало змоги використовувати відомі процедури параметричного синтезу. Також отримана система керування не має апарата для дослідження замкненої САК на стійкість.

Система рівнянь ФКВ для СЕФК з енергетичним балансуванням електроприводу на базі СМПМ має такий вигляд [4]:

$$\begin{cases} u_d^* = \left( \frac{L_0}{L_q} - \frac{p_p}{J_m} \right) L_q i_q J_m w - R_s a_1 L_d i_d - R_s \frac{g L_q^2}{2\Phi} (i_q^2 - i_{q0}^2) + L_0 J_m w \left( \frac{g}{\Phi} L_q i_q L_d i_d - w i_{q0} \right) \\ u_q^* = - \left( \frac{L_0}{L_d} - \frac{p_p}{J_m} + L_0 a_1 \right) L_d i_d J_m w + \Phi \left( \frac{p_p}{J_m} J_m w_0 - a_2 (w - w_0) \right) - L_0 J_m w \frac{g L_q^2}{2\Phi} (i_q^2 - i_{q0}^2) - \\ - R_s \left( \frac{g}{\Phi} L_q i_q L_d i_d - w i_{q0} \right) \\ M_{em}^* = M_L \end{cases} \quad (8)$$

де  $g$ ,  $L_0$ ,  $a_1$  і  $a_2$  – параметри системи керування, що не входять до матриці демпфування.

Отримана СЕФК напрямлена на компенсацію нелінійностей у об'єкті керування, забезпечує асимптотичну стійкість замкненої САК та передбачає можливість поєднання СЕФК з класичними регуляторами аналогічно до (7). Недоліком такого ФКВ є велика кількість параметрів налаштування системи керування, що істотно ускладнює процедуру налаштування.

Що стосується СЕФК на основі IDA-PBC, то вигляд системи рівнянь ФКВ істотно залежить від формування взаємозв'язків та демпфування. Найвідоміший – при використанні коефіцієнта перехресних зв'язків та електричного демпфування [6]:

$$\begin{cases} u_d^* = -r_1(i_d - i_{d0}) - k(i_q - i_{q0}) + R_s i_{d0} - p_p L_d i_{q0} (w - w_0) - p_p L_q i_q w_0 \\ u_q^* = -r_2(i_q - i_{q0}) + k(i_d - i_{d0}) + R_s i_{q0} + p_p L_q i_{d0} (w - w_0) + p_p (\Phi + L_d i_d) w_0, \\ M_{ем}^* = M_L \end{cases} \quad (9)$$

де  $r_1$  та  $r_2$  – демпфуючі коефіцієнти, що відображають електричне демпфування системою керування по осях  $d$ - $q$ ;  $k$  – коригуючий коефіцієнт, що відображає компенсацію перехресних зв'язків між каналами керування напругою за осями  $d$  і  $q$ .

Поширеним є використання ФКВ (8), при  $r_1 = r_2 = r$ , а  $k = 0$ , однак така система керування має два значні недоліки: по-перше, регулювання у цій системі здійснюється лише одним коефіцієнтом –  $r$ , а отже, система має незначні можливості для налаштування; по-друге, цей коефіцієнт здійснює керування одночасно контурами струму по осях  $d$  і  $q$ , тому на  $r$  накладаються додаткові обмеження.

Для застосування у цифрових системах СЕФК було вдосконалено за допомогою доповнення її корегуючими елементами. Корегування бажаної енергетичної функції здійснюється з метою нівелювання похибок, пов'язаних з роботою у цифровій системі. Наявність великої кількості складних корегуючих елементів у системі ускладнює процедуру і так багатопараметричного налаштування, а також не дозволяє стверджувати асимптотичну стійкість системи, що є апіорі притаманно усім СЕФК. Ще одним недоліком цієї системи є те, що вона не забезпечує оптимальне формування бажаної точки рівноваги.

Однією із найбільш вдалих СЕФК, з погляду забезпечуванних динамічних і статичних характеристик, було поєднання ФКВ (8) з принципом демпфування збурень L2-ланкою [8]:

$$\begin{cases} u_d^* = -r_1 i_d + k \left( i_q - \frac{M_{ем}^*}{p_p \Phi} \right) + R_s i_{d0} - \frac{M_{ем}^* L_d}{p_p \Phi} (w - w_0) - p_p L_q i_q w_0 - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{g^2} \right) i_d \\ u_q^* = -r_2 \left( i_q - \frac{M_{ем}^*}{p_p \Phi} \right) + k i_d + \frac{M_{ем}^* R_s}{p_p \Phi} + p_p L_q i_{d0} (w - w_0) + p_p (\Phi + L_d i_d) w_0 - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{g^2} \right) \left( i_q - \frac{M_{ем}^*}{p_p \Phi} \right), \\ M_{ем}^* = M_L - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{g^2} \right) (w - w_0) \end{cases} \quad (10)$$

де  $\gamma$  – дисипативна нерівність, що використовується як додатковий параметр системи керування.

Основним недоліком такої системи було те, що параметр  $\gamma$  одночасно перебував у “контурах” керування і механічними процесами, і електричними. Це, з одного боку, унеможливило роздільне регулювання перехідними процесами у механічній та електричних частинах по осі  $d$  і по осі  $q$ , з іншого боку, – накладало обмеження на використання цього параметра регулювання. Введення такого демпфування у СЕФК, як і у випадку (7) не належить до енергетичних підходів.

Результати комплексного порівняльного дослідження роботи СЕФК з представленими ФКВ показані на рис.2. Дослідження проведено за допомогою Matlab/Simulink для СМПМ з такими параметрами:  $R_s = 0,25$  Ом,  $\Phi = 0,4$  Вб,  $J_m = 4$  кг·м<sup>2</sup>,  $p = 8$  у разі розміщення магнітів всередині ротора ( $L_d = L_q = 2$  мГн). Номінальні параметри СМПМ:  $n_n = 500$  об/хв,  $M_n = 500$  Н·м. Керування здійснюється транзисторним інвертором з синусоїдальною ШІМ за сигналами багатоточкового давача положення ротора відповідно до стратегії керування – “максимальний момент на одиницю струму” [9]. У початковий момент часу на СЕФК (рис. 1) подається сигнал завдання на швидкість  $\omega_0 = 5$  рад/с, а навантаження становить  $M_L = 50$  Н·м. При проходженні часу  $t = 0,25$  с відбувається накидання навантаження до  $M_L = 500$  Н·м. Налаштування проводилось при малій зміні сигналу завдання на перерегулювання 5 %.

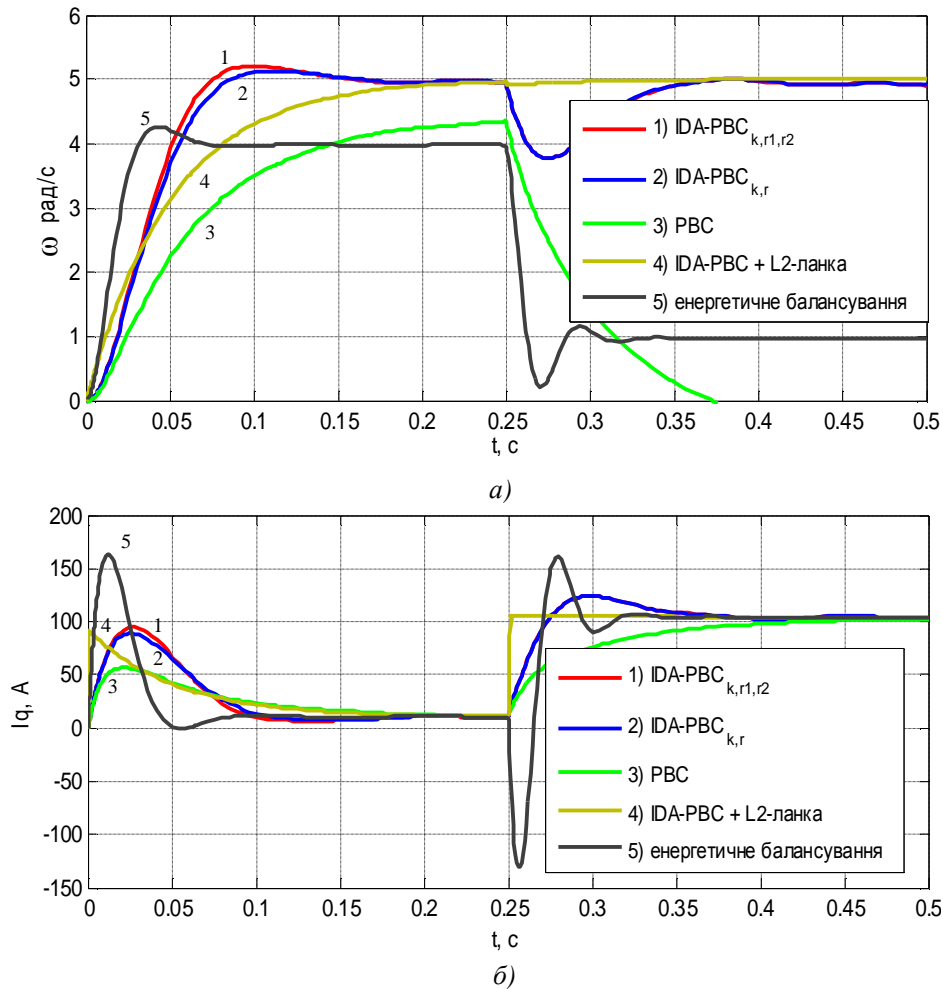


Рис. 2. Осцилограми роботи СЕФК електроприводу на базі СМПМ як гамільтонової системи з керованими портами при розгоні та накиданні навантаження: а – кутова швидкість СМПМ –  $\omega$ ; б – струм по осі  $q$  –  $I_q$

Результати порівняльних комп'ютерних досліджень свідчать про:

- відсутність додаткових елементів форсування у системі з PBC (6) зумовлює низьку швидкодію САР;
- система з енергетичним балансуванням (8) забезпечує високу швидкодію САР, однак окрім складності налаштування, до недоліків такої системи можна зарахувати наявність похибки у формуванні бажаної точки рівноваги, а також чутливість до параметричних змін керованого об'єкта;
- СЕФК тільки з IDA-PBC забезпечує високі і статичні, і динамічні показники, водночас є менш чутливою до параметричних змін та забезпечує асимптотичну стійкість системи;
- СЕФК на основі IDA-PBC з L2-ланкою (10) забезпечує істотне форсування перехідних процесів та зменшення статичної похибки за відсутності інформації про момент, однак є високочутливою до зміни сигналу завдання, що призводить до переходу системи керування в зону обмеження і, як наслідок, система стає некерованою (було враховано під час проведення досліджень).

Крім формування різних взаємозв'язків та демпфування, а також поєднання з іншими підходами до синтезу систем керування метод IDA-PBC почав розвиватися в напрямку формування опосередкованих впливів на поведінку системи. За таким підходом для СМПМ було запропоновано внесення механічного демпфування, що здійснюватиме демпфування перехідних процесів основної регульованої координати системи – швидкості [10]. Для забезпечення механічного демпфування СЕФК повинна формувати певний додатковий момент на вхід механічної частини електроприводу.

Таке формування додаткового моменту можна виконати лише зміною електромагнітного моменту машини, що, своєю чергою, здійснюється регулюванням струмів СМПМ, тобто електричним способом. Використання механічного демпфування дає змогу істотно покращити і динамічні, і статичні показники системи, а також стійкість до параметричних змін і стійкість динаміки усієї САК.

Загальним недоліком усіх систем керування, побудованих за енергетичними підходами є відсутність алгоритму параметричного синтезу. Однак для СЕФК тільки з IDA-PBC нещодавно була запропонована методика структурно-параметричного синтезу, яка полягає у формуванні бажаного характеристичного поліному передавальної функції замкненої системи [10].

### Висновки

Одним з нових напрямків побудови систем керування складними нелінійними об'єктами, такими як СМПМ, є енергетичні підходи. Вони полягають у створенні бажаної енергетичної функції системи на основі пасивного керування. Сьогодні розроблено декілька методів на основі енергетичних підходів, які дають змогу синтезувати СЕФК для СМПМ, зокрема ті, що розглядають керований об'єкт як гамільтонову систему з керованими портами. Пропоновані СЕФК мають свої переваги та недоліки. Серед таких систем виділяють СЕФК, синтезовані на основі IDA-PBC, які набули найбільшого розвитку та забезпечують високі статичні і динамічні показники, асимптотичну стійкість системи і низьку чутливість до параметричних змін. Хоча для таких систем запропоновано процедуру структурно-параметричного синтезу, однак вона полягає у застосуванні до нелінійних систем методів з теорії керування лінійними системами, тому її використання потребує подальших досліджень.

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. – No. 2. – Pp. 18–33. 2. Ramírez-Leyva F. Passivity-Based Speed Control for Permanent Magnet Motors / F. Ramírez-Leyva, E. Peralta-Sánchez, J. J. Vásquez-Sanjuan, Trujillo-Romero // *Procedia Technology.* – 2013. – 7. – P.215–222. 3. Ortega R. Control by interconnection and standart passivity-based control of port-hamiltonian systems / R. Ortega, A.J. van der Schaft, F. Castanos, Alessandro. Astolfi // *IEEE Contr. Syst. Tech.* – 2008. – Vol. 53. – No. 11. – P. 2527–2542. 4. Petrovic V. A globally convergent energy-based controller for PM synchronous motors / V. Petrovic, R.Ortega, A. Stankovic // *Proc. CDC'99, Phoenix, AZ.* 7–10, 1999. 5. Ortega R. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems / R. Ortega, A.J. van der Schaft, G. Escobar, B. Maschke // *Automatica.* – 2002. – Vol. 38. – Pp. 585–596. 6. Zou. Z. Maximum Output Power of PMSM Based on Energy-Shaping and PWM Control Principle / Z. Zou, H. Yu, Y. Tang. – Q.: Qingdao University, 2008. – 5p. 7. 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. 8. Yu H., L2 Gain Disturbance Attenuation of PMSM Based on Hamiltonian Systems Control Theory / H. Yu, S. Yu, J. Liu, J. Yu // *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, July 6–9, 2010, Jinan, China.*, 2010. – Pp. 2502–2506. 9. Bose B. K. *Modern Power Electronics and AC Drives.* – Prentice-Hall: N. J., 2002. – 711 p. 10. Shchur I. Optimization of energy-shaping control of port-controlled hamiltonian system / Shchur I., Biletskyi Y. // *Computational problems of electrical engineering.* – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – Vol. 3. – no. 2. – P. 101–106.