

Синтез субоптимальної системи керування двомасовою електромеханічною системою

С.М. Балюта, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електропостачання і енергоменеджменту, Національний університет харчових технологій

І.Ю. Бурляй, кандидат технічних наук, доцент кафедри електропостачання і енергоменеджменту, Національний університет харчових технологій

Л.О. Копилова, асистент кафедри електропостачання і енергоменеджменту, Національний університет харчових технологій

В статті представлений ефективний алгоритм стабілізації частоти обертання двомасової електромеханічної системи, що працює при різкозмінних навантаженнях. При субоптимальному регулюванні за змінними стану проводиться оптимізація властивостей каналу регулювання з ПІ регулятором, в тому числі характеристик за завданням та збуренням, а також коливальних характеристики, з метою забезпечення замкнутим контуром регулювання поставлених вимог до якості регулювання. Синтез регулятора частоти обертання проводиться шляхом завдання власних значень характеристичного рівняння з необхідними характеристиками перехідного процесу і регулюванням за змінними стану. Наведені результати дослідження системи керування із синтезованим регулятором і їх порівняння із традиційною системою автоматичного керування з ПІ регулятором. Встановлено, що синтез регулятора частоти обертання двомасової електромеханічної системи шляхом завдання власних значень, які обумовлюють необхідні характеристики механічної системи. Така система має кращі динамічні характеристики регулювання за уставкою і збуренням ніж для САК з ПІ регулятором. При цьому синтезована САК має значно менші коливання, і може працювати при параметрах об'єкта керування відмінних від тих, що прийняті при синтезі.

Ключові слова: система регулювання частоти обертання; двомасова електромеханічна система, ПІ регулятор

В статье представлен эффективный алгоритм стабилизации частоты вращения двухмассовой системы, работающей при резко переменных нагрузках. При субоптимальном регулировании по переменным состояниям проводится оптимизация свойств канала регулирования с ПИ регулятором по заданию и возмущению, а также колебательных характеристик, с целью обеспечения замкнутым контуром регулирования поставленных требований к качеству регулирования. Синтез регулятора частоты вращения проводится путем задания собственных значений характеристического уравнения с необходимыми характеристиками переходного процесса и регулированием по переменным состояниям. Приведены результаты исследования системы управления с синтезированным регулятором и их сравнение с традиционной системой управления с ПИ регулятором. Установлено, что использование для синтеза регулятора частоты вращения двухмассовой электромеханической системы собственных значений, обеспечивающих заданные характеристики механической системы. Такая САУ имеет лучшие динамические характеристики регулирования по заданию и возмущению, чем для САУ с ПИ регулятором. При этом синтезированная САУ имеет значительно меньшие колебания и может работать при параметрах объекта управления отличных от тех, которые приняты при синтезе регулятора.

Ключевые слова: система регулирования частоты вращения, двухмассовая электромеханическая система, ПИ регулятор

In article the effective algorithm of a frequency stabilisation of rotation of two-mass system which works at sharply variable loadings is presented. At a suboptimalizing control on condition variables optimisation of properties of the channel of regulation with PI regulator, including characteristics under the task and indignation, and also oscillatory characteristics, for the purpose of maintenance with the mesh of regulation of the put requirements to regulator performance is spent. Speed controller synthesis is spent by means of the task of own meanings of defining equation with necessary transient characteristics and regulation on condition variables. Results of research system control with the synthesised regulator and their comparison with a traditional control system with PI regulator are resulted. It is established, that use for synthesis of the speed controller of two-mass electromechanical system of own meanings providing set characteristics of

mechanical system allows to receive system control, having the best dynamic characteristics of regulation under the task and indignation, than for system control with PI regulator. Thus synthesised system control has considerably smaller fluctuations and can work at parametres of object of control distinct from what are accepted at regulator synthesis.

Keywords: regulating system of speed of rotation, two-mass electromechanical system, PI regulator

Вступ

Ефективність цукрового виробництва в значній мірі обумовлюється ефективністю використання енергії і в тому числі у електроприводах технологічних агрегатів. Одним з ефективних способів зниження витрат електричної енергії є використання технологічних агрегатів та виконавчих механізмів системи автоматизації технологічного процесу енерго-та ресурсозберігаючого інтелектуального частотно-регульованого електропривода змінного струму. Однією з основних властивостей інтелектуального електропривода є використання функціональних програмних модулів, які дозволяють реалізувати складні закони переміщення механічних елементів у просторі і в результаті спростити механічну схему технологічного агрегату і зменшити витрати енергії. Наявність в механічній системі електропривода пружних зв'язків обумовлює коливання і значні механічні перевантаження елементів, що збільшує матеріалоемність технологічних агрегатів і встановлену потужність приводних двигунів. Сучасні методи синтезу систем керування електромеханічними системами дозволяють урахувати наявність пружних зв'язків між елементами і знизити механічні перевантаження елементів, зменшити потужність приводних двигунів і енергоемність продукції.

Постановка задач і дослідження

Завдання полягає у розробці ефективного алгоритму стабілізації частоти обертання двомасової електромеханічної системи, що працює при різко змінних навантаженнях за допомогою завдання власних значень замкнутого контуру регулювання

Матеріали досліджень

Об'єкт керування складається з електричної частини, представленої у вигляді аперіодичної передавальної ланки і механічної частини, представленої у вигляді двомасової механічної системи з пружним зв'язком. Для гарантування стаціонарної точності регулювання САК додатково керується за допомогою ПІ регулятора частоти. При цьому ПІ регулятор розглядається як попередній фільтр, що забезпечує розрегулювання різниці між заданою і поточною частотами обертання. Для отримання необхідних характеристик регулювання замкнутого контуру без надто високих уставок в якості зовнішнього збурення вибрано уставку частоти обертання, а для гашення коливань валу в якості зовнішнього збурення вибрано момент скручування валу. Крім того, враховується наявність перешкод в сигналах вимірюваних значень частоти обертання ротора двигуна і обертаючого моменту двигуна.

Для синтезу системи автоматичного керування швидкістю (САКШ) ЕМС представимо у вигляді матричного рівняння:

$$\mathbf{X}_s = \mathbf{A}_s \mathbf{X}_s + \mathbf{B}_s \cdot \mathbf{u} \tag{1}$$

$$\mathbf{Y}_s = \mathbf{C}_s \cdot \mathbf{X}_s \tag{2}$$

де матриці мають значення:

$$\mathbf{X}_s = [\omega_1 \quad \Delta\vartheta \quad \omega_H \quad M_M]^T; \mathbf{u} = M_u$$

$$\mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{np}} \end{bmatrix}; \mathbf{C}_s = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T; \mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} -\frac{D_{12}}{J_1} & -\frac{C_{12}}{J_1} & \frac{D_{12}}{J_1} & \frac{1}{J_1} \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ \frac{D_{12}}{J_2} & \frac{C_{12}}{J_2} & -\frac{D_{12}}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{np}} \end{bmatrix}.$$

де : ω_1 - кутова частота приводного двигуна; ω_H - кутова частота валу навантаження; J_1 - момент інерції валу двигуна; J_2 - момент інерції валу навантаження; C_{12} - коефіцієнт пружності валу; D_{12} - коефіцієнт демпфування коливань; $\Delta\vartheta$ - кут скручування валу;

При цьому рівняння задовольняють співвідношенням:

Структурна схема САК з ПІ-регулятором і зворотним зв'язком за станом представлена на рис. 1.

$$X_{PI} = -Y_S = -C_S^T X_S .$$

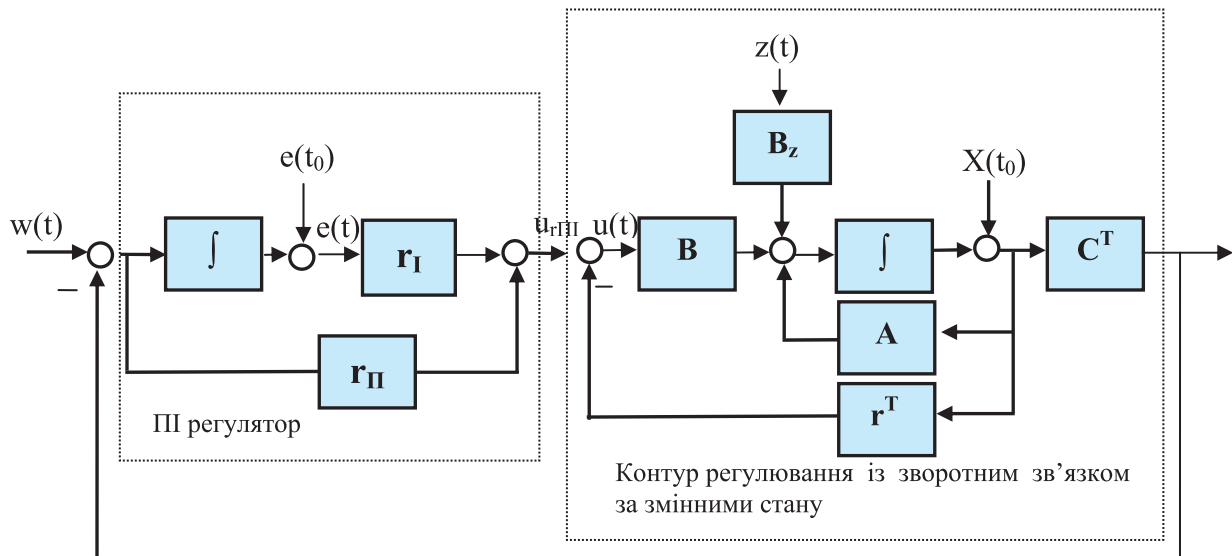


Рис. 1. Структурна схема САК з ПІ-регулятором і зворотним зв'язком за станом

Для синтезу САК з ПІ-регулятором і зворотним зв'язком за станом за допомогою завдання власних значень його структура перетворюється таким чином, щоб вона відповідала регулятору стану [1].

Для активного втручання в систему використовується уставка моменту m_u . Момент навантаження m_n - приймається як величина збурювання.

Модифікований об'єкт з ПІ регулятором і регулятором стану описується системою рівнянь п'ятого порядку:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_s \cdot \mathbf{X}_s + \mathbf{B}_s \cdot \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \frac{d\omega_1}{dt} \\ \frac{d\Delta\vartheta}{dt} \\ \frac{d\omega_H}{dt} \\ \frac{dM_M}{dt} \\ \frac{dx_{PI}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_{12}}{J_1} & -\frac{C_{12}}{J_1} & \frac{D_{12}}{J_1} & \frac{1}{J_1} & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \frac{D_{12}}{J_2} & \frac{C_{12}}{J_2} & -\frac{D_{12}}{J_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{np}} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \Delta\vartheta \\ \omega_H \\ M_M \\ x_{PI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{np}} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot M_u$$

Ця система в розімкнутому стані характеризується власними значеннями:

- власне значення $\lambda_1 = -\frac{1}{T_{np}}$ відповідає еквівалентній сталій часу електричної частини ЕМС головного привода кліті T_{np} ;
- кратне власне значення $\lambda_{2,3} = 0$ обумовлюється інтегральною складовою механічної підсистеми й ПІ регулятором системи;
- пари сполучених комплексних власних значень відповідає власній частоті механічної підсистеми $\lambda_{4,5} = -D_{12} \pm j\omega_0$, що без врахування загасання коливань ($D_{12} = 0$) прийме вид $\lambda_{4,5} = \pm j\omega_0 = \pm j\frac{1}{T_c}$.

Досліджувана САК задовольняє критерію керованості: [2]:

$$Q_K = [B \quad A \cdot B \quad \dots \quad A^{n-1} B]$$

$$: rank(Q_K) = n$$

«Модифікований об'єкт регулювання» замикається через зворотний зв'язок за змінними стани (регулятора стану), а величини стану X_S й регулювання x_{PI} вводяться в регулятор стану відповідно через вектор зворотного зв'язка r :

САК із зворотнім зв'язком за змінними стану описується матричним рівняння:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_s \\ \dot{x}_{PI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_s & 0 \\ -\mathbf{C}_s^T & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{X}_s \\ x_{PI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_s \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}; \tag{3}$$

$$\dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{r}) \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} \tag{4}$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}^T \mathbf{X} \tag{5}$$

де відповідно матриці мають вигляд:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_s & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C}_s^T & \mathbf{0} \end{bmatrix}; \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_s \\ \mathbf{X}_{PI} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_s \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}; \mathbf{u}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s \\ 0 \end{bmatrix}^T.$$

Вектор зворотного зв'язку \mathbf{r} представляється у вигляді вектора змінних стану \mathbf{r}_x^* й відповідно інтегральної складової \mathbf{r}_I . При цьому з вектора зворотного зв'язку \mathbf{r}_x окремо виділяють пропорційну складову:

$$\mathbf{r}_x^* = \mathbf{r}_x + r_p \mathbf{C}_s \tag{6}$$

$$\mathbf{r} = [\mathbf{r}_x^* \quad \mathbf{r}_I^*]^T = [r_{\omega l} \quad r_{\Delta\theta} \quad r_{\omega H} \quad r_{M_M} \quad r_I]^T = [r_{x1} + r_{PI} \quad r_{x2}^* \quad r_{x3}^* \quad r_{x4}^* \quad -r_I]^T \tag{7}$$

Параметри ПІ регулятора r_I й r_p і параметри регулятора стани \mathbf{r}_x розраховуються шляхом порівняння характеристичного полінома замкнутого контуру системи регулювання, отриманого шляхом завдання власних значень χ_1, \dots, χ_n і характеристичного рівняння контуру регулювання з регулятором стани й вищестоящим ПІ регулятором:

$$\prod_{i=1}^5 (s - \chi_i) = \det(s \cdot \mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{r}^T) = \det \left(s\mathbf{E} - \begin{bmatrix} \mathbf{A}_s & \mathbf{0} \\ -\mathbf{c}_s^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_s \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} [\mathbf{r}_x^{*T} \quad \mathbf{r}_I^*] \right) \tag{7}$$

При завданні власних значень механічної коливальної системи відмовляються від зміни власної частоти системи [1] - змінюють тільки дійсну частину пари комплексних власних значень, збільшуючи її пропорційно співвідношенню моментів інерції двигуна й навантаження k_J .

Значенням інтегральної характеристики механічної підсистеми й вищого контуру ПІ регулятора $\lambda_{2,3}$ відповідають значення замкнутого контуру $\chi_{2,3}$, які розташовують на промені, що виходить із початку координат під кутом 450 до вісі дійсних чисел

$$\chi_{2,3} = -\frac{\sqrt{2}}{2T_p} \pm j \frac{\sqrt{2}}{2T_p}$$

де параметр - міра тривалості збурювання, яка для завдання відповідної динаміки системи повинна задовольняти умові:

$$T_p = \frac{1}{|\chi_{2,3}|} > 0,$$

Власне значення, що відповідає електричній підсистемі λ_1 необхідно переміщувати в напрямку уявної вісі якнайдалі, однак, без погіршення динаміки, заданої іншими власними значеннями. Тому для замкнутої системи задаємо власне значення χ_1 :

$$\chi_1 = -\frac{1}{T_p}$$

І таким чином усі власні значення $\lambda_{1...3}$ розташовують на колі з радіусом T_p і центром на початку координат.

При завданні демпфування першої механічної частоти (пара власних значень $\lambda_{4,5}$), виходять з обмеження потужності виконавчого двигуна і враховують, що в замкнутому контурі повинна зберігатися частота власних механічних коливань [1]. Тому власні значення $\chi_{4,5}$, задаються переміщенням власних значень $\lambda_{4,5}$ паралельно вісі дійсних чисел вліво. Для цього комплексного кореня задають загасання $d = \sqrt{2}/2$, що задовільняє співвідношенню

$$d_{\alpha_{4,5}} = -\frac{\text{Re}(\chi_{4,5})}{|\chi_{4,5}|} = \frac{\sqrt{2}}{2} :$$

Відповідно одержуємо рівняння для $\chi_{4,5}$

$$\chi_{4,5} = -\frac{1}{T_c} \pm j \frac{1}{T_c}$$

Гранична умова обмеження потужності двигуна враховується зміною вагомості дійсної складової пари власних значень $\chi_{4,5}$ за допомогою коефіцієнта K_p , що задовольняє умові:

$$0 < K_p \leq 1$$

$$\chi_{4,5} = -\frac{1}{T_c} (-K_p \pm j)$$

Конфігурація власних значень п'яти власних значень задається за допомогою параметрів регулятора: постійної часу $T_p > 0$ - міри порушення впливу і коефіцієнта $0 < K_p \leq 1$ - міри демпфування власних механічних коливань

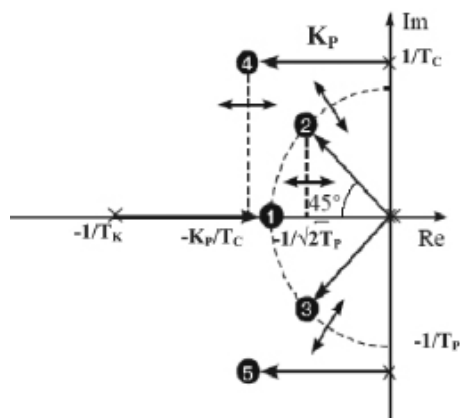


Рис. 2. Порівняння власних значень розімкнутого (x) і замкнутого контуру (•) при Пі-регулюванні стану спрощеного електричного привода (для простоти представлений тільки спеціальний випадок $K_p = 1$);

Синтез параметрів регулятора проводять за настановними формулами, виходячи з параметрів об'єкта регулювання r :

$$r = [r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad r_4 \quad r_5]^T = [r_{\omega_1} \quad -r_{\Pi} \quad r_{\Delta\theta} \quad r_{\omega_2} \quad r_{M_M} \quad -r_I]^T =$$

$$= \left[\begin{array}{l} -J_1 T_{np} \left[\frac{2k_p(\sqrt{2}+1)}{T_p \cdot T_c} + \frac{(\sqrt{2}+1)}{T_p^2} + \frac{k_p^2+1}{T_c^2} \right] + \frac{C_{12} T_e J_{\Sigma}}{J_2} + \frac{(1-r_{M_M}) D_{12} J_{\Sigma}}{J_2} \\ T_{np} J_1 \left[\frac{2k_p(\sqrt{2}+1)}{T_p^2 \cdot T_c} + \frac{1}{T_p^3} + \frac{(\sqrt{2}+1)(k_p^2+1)}{T_p \cdot T_c^2} \right] - \frac{D_{12}}{J_2} [(r_{\omega_1} - r_{\Pi}) + r_{\omega_2}] + \frac{(1-r_{M_M}) C_{12} J_{\Sigma}}{J_2} + r_I \\ \frac{2 \cdot k_p T_{np} J_1 J_2}{C_{12} T_p^3 T_c} + \frac{(k_p^2+1)(\sqrt{2}+1) T_{np} J_1 J_2}{C_{12} T_p^3 T_c^2} + \frac{r_I D_{12}}{C_{12}} + (r_{\omega_1} - r_{\Pi}) \\ 1 + T_{np} \left[\frac{\sqrt{2}+1}{T_p} + \frac{2k_p}{T_c} + \frac{D_{12}(J_1+J_2)}{J_1 \cdot J_2} \right] \\ - \frac{(k_p^2+1) \cdot T_{np} \cdot J_1 \cdot J_2}{T_p^3 \cdot T_c^2 \cdot C_{12}} \end{array} \right]$$

Результати розрахункових досліджень, виконані для двомасової ЕМС із асинхронною машиною потужністю $P_N = 18,5$ кВт, із регулятором стану, синтезованим за представленою методикою у порівнянні із ЕМС з ПІ регулятором представлені на рис.3.

Аналіз наведених кривих показує, що для САК з ПІ-регулятором перехідні характеристики величини, що задається характеризуються коливальним характером. ПІ регулятор стану однозначно покращує час від регулювання числа обертів при зрушеннях величини, що задається. Додаткове забезпечується загасання механічної власної частоти при змінах моменту на валу.

На рис. 4. представлені результати досліджень впливу синтезу регуляторів з помилково визначеними параметрами моделі на динаміку замкнутого контуру регулювання частоти обертання.

Результати моделювання підтвердили достатню нечутливість ПІ регулятора стану до зміни зазначеного параметра, а також інших параметрів..

Порівняння й аналіз ПІ регулятора і ПІІ регулятора за змінними стану показує, що як для ПІ регуля-

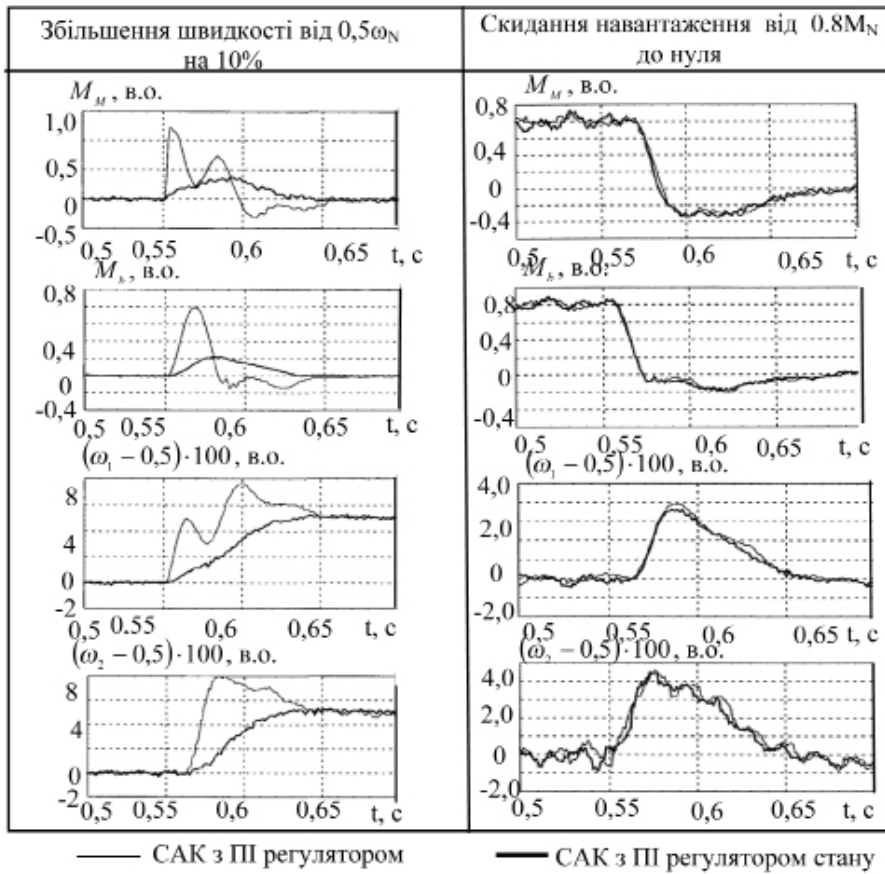


Рис. 3. ПІ – регулювання й ПІ - регулювання стану при стрибку заданої величини на 10% від $0,5\omega_N$. (а), та при скиданні навантаження від $0,8MN$ до нуля

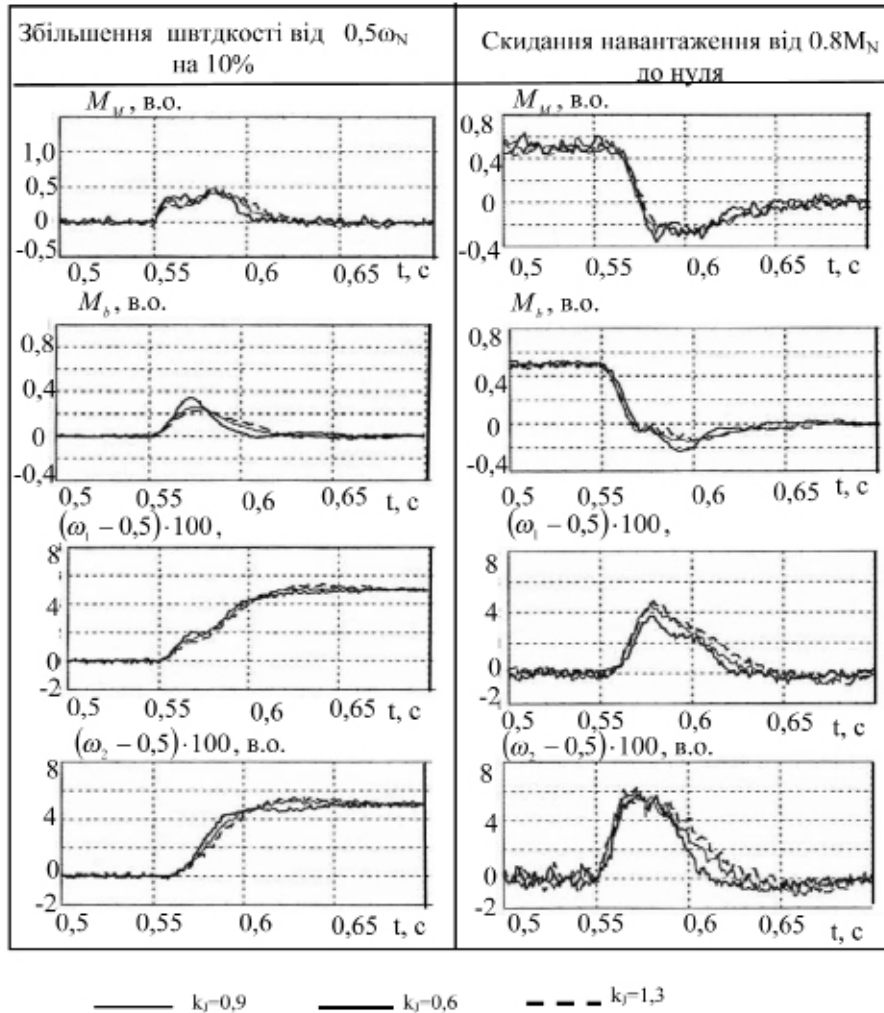


Рис.4. ПІ регулювання стану при неточно встановлених параметрах ОК (коефіцієнта відношення мас k_f)

тора, так і для ПІ регулятора стану проявляються незначні впливи нової механічної конфігурації на динамічну характеристику. На основі можливої структури привода ні ПІ регулятор, ні ПІ регулятор стану не можуть демпфувати коливання другої механічної власної частоти, що проявляються.

ПІ регулятор стану однозначно покращує час від регулювання числа обертів при зрушеннях величини, що задається.

Висновки

Синтез системи регулювання частоти обертання двомасової електромеханічної системи шляхом завдання власних значень із заданими характеристиками загашування коливань механічної системи дозволяє отримати САК, що має кращі динамічні характеристики регулювання за уставкою і збуренням ніж для САК з ПІ регулятором. При цьому синтезована САК має значно менші коливання, і може працювати при параметрах об'єкта керування відмінних від тих, що прийняті при синтезі.

Синтез регулятора стану за допомогою завдання власних значень замкнутого контуру регулювання проводять, виходячи з безлічі можливих прийнятних конфігурацій власних значень. При цьому прагнуть до того, щоб при завданні власних значень забезпечити фізичний зв'язок між необхідними власними значеннями замкнутого контуру й вектором зворотних зв'язків регулятора стану [2]. Наступна важлива властивість для прийнятності регулятора стану - це впевнене й просте приведення в дію ЕМС із регулятором стану, що не гарантовано при застосуванні методу подвійних співвідношень [3].

Список використаних джерел

1. Балюта С.М. Частотно-регульовані електромеханічні системи з інтелектуальним керуванням в системах автоматизації технологічних процесів/ С.М. Балюта – У. : НУХТ, 2005. – 281 с.
2. Кузнецов Б.И. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями/ Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, В.В. Коломиец. - Харьков, УИПА, 2005. – 512 с.
3. Leonard, W : Control of Electrical Drives/ - Springer Verlag/ 1996.- 521 p.

ЦІКАВІ НОВИНИ

Унікальний спосіб перетворення сонячної енергії в біопаливо

Вчені з Принстонського університету розробили унікальний спосіб перетворення сонячної енергії в біопаливо. Трансформація діоксиду вуглецю і води в мурашину кислоту була здійснена за допомогою спеціальних сонячних батарей.

Дослідження глобального потепління, викликаного підвищенням рівня парникового газу, включає в себе кілька основних аспектів - створення альтернативного палива, виловлювання та зберігання газів, і їх переробка. Саме ці цілі поставила перед собою команда під керівництвом Ендрю Бокарслі з Лабораторії хімії Принстонського університету.

З вченими співпрацювали інженери з стартапу Liquid Light Інк Monmouth Junction з Нью-Джерсі. Результати дослідження опубліковані в науковому журналі CO_2 . Перехід вуглекислого газу і води в мурашину кислоту здійснювався за допомогою сонячних батарей.

Процес відбувається всередині спеціальних електрохімічних осередків, що складаються з металевих пластин. Кількість одержуваної енергії відповідає кількості потрапляє в осередки вуглекислого газу. Уклавши три електрохімічні комірки разом, вчені змогли домогтися високої енергоефективності - в два рази більшою, ніж енергоефективність при природному фотосинтезі.

Високий результат був зафіксований за допомогою спеціальних вимірювальних пристроїв. В даний час мурашина кислота застосовується в багатьох паливних елементах. Наприклад, формиат солі, що міститься в ній, використовується в паливі для літаків, оскільки він менш корозійний і більш безпечний для навколишнього сліди. Експерти припускають, що активне застосування мурашиної кислоти в паливній промисловості може з часом витіснити широко використовувані види палива.

