

І. М. ЗАДОРЖНЯ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації
Донбаська державна машинобудівна академія
ORCID: 0000-0002-7822-3517

М. О. ЗАДОРЖНИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації
Донбаська державна машинобудівна академія
ORCID: 0000-0003-0957-9998

АНАЛІЗ УМОВ ДЕМПФУВАННЯ КОЛИВАНЬ В ДВОМАСОВОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ РЕЗОНАНСНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ З ДОДАТКОВИМИ ЗВОРОТНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

В роботі розглянуто актуальну задачу вибору оптимальних параметрів електромеханічних систем технологічних машин для вдосконалення їх динамічних якостей, зокрема за критерієм мінімуму коливальності перехідних процесів. Показано, що параметри визначаються закономірностями електромеханічного взаємозв'язку, що дозволяє використовувати специфічну властивість демпфування пружних механічних коливань власне електроприводом.

Існуючі методи синтезу передбачають використання класичних оптимізаційних алгоритмів, які орієнтовані на мінімізацію реакції електроприводу при дії пружних коливань. В роботі акцентовано увагу на тому, що в електромеханічних системах необхідно в загальному випадку розглядати пов'язані процеси при взаємодії коливань в електромагнітній та механічній підсистемах електроприводу.

На основі закономірностей ефекту резонансної електромеханічної взаємодії процесів у електромагнітній та механічній підсистемах приводу пропонується використовувати узагальнені показники, що в повній мірі відповідає синергетичному підходу. В результаті досліджень показано, що при оптимізації двомасових електроприводів за критерієм мінімуму коливальності основних координат налаштування параметрів системи автоматичного керування потрібно виконувати з урахуванням ефектів резонансної електромеханічної взаємодії, зумовленій коефіцієнтом розподілу інерційних мас γ .

Отримав подальший розвиток метод синтезу електроприводу з з активним демпфуванням пружних механічних коливань, що досягається вибором відповідного співвідношення динамічних параметрів з додатковими зворотними зв'язками при реалізації процесів резонансної електромеханічної взаємодії і дозволяє забезпечити оптимальність перехідних процесів за критерієм мінімуму коливальності.

Реалізація запропонованих оптимальних розрахункових співвідношень для налаштування контуру регулювання швидкості при оптимізації заснована на компенсації впливу пружних сил інерційними та може бути рекомендована для налаштування систем підпорядкованого регулювання електроприводів технологічних машин.

Ключові слова: електропривод, електромеханічна система, пружні механічні коливання, динамічні навантаження, демпфування, двомасова система, система автоматичного керування, додатковий зворотний зв'язок, регулятор, взаємозв'язок, взаємодія, узагальнені показники.

I. M. ZADOROZHNIYA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electromechanical Automation Systems
Donbass State Engineering Academy
ORCID: 0000-0002-7822-3517

M. O. ZADOROZHNIY

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electromechanical Automation Systems
Donbass State Engineering Academy
ORCID: 0000-0003-0957-9998

ANALYSIS OF THE DAMPING CONDITIONS OF OSCILLATIONS IN A TWO-MASS ELECTRIC DRIVE BASED ON THE EFFECT OF RESONANT ELECTROMECHANICAL INTERACTION WITH ADDITIONAL FEEDBACK

The decision of actual problem of choosing the optimal parameters of electromechanical systems of electric drives of technological machines to improve their dynamic qualities, in particular, according to the criterion of minimum oscillation of transients. It is shown that the parameters characterizing a particular type of electric drive with maximum damping and minimum dynamic loads are determined by the laws of electromechanical interconnection. This makes it possible to use the specific property of damping elastic mechanical vibrations by the electric drive itself.

The existing synthesis methods involve the use of classic optimization algorithms, which are focused on minimizing the response of the electric drive under the action of elastic vibrations. The work focuses on the fact that in electromechanical systems it is necessary to consider related processes in the interaction of oscillations in the electromagnetic and mechanical subsystems of the electric drive in the general case.

Based on the regularities of the resonant electromechanical interaction of processes in the electromagnetic and mechanical subsystems of the drive, it is proposed to use generalized indicators, which fully corresponds to the synergistic approach. As a result of research, it is shown that when optimizing two-mass electric drives according to the criterion of the minimum fluctuation of the main coordinates, the settings of the parameters of the automatic control system must be performed taking into account the effects of resonant electromechanical interaction caused by the coefficient of distribution of inertial masses γ .

The method of synthesizing an electric drive with active damping of elastic mechanical vibrations was further developed, which is achieved by choosing the appropriate ratio of dynamic parameters with additional feedback during the implementation of resonant electromechanical interaction processes and allows to ensure the optimality of transient processes according to the criterion of minimum oscillations.

The implementation of the proposed optimal calculation ratios for setting the speed control loop during optimization is based on the compensation of the influence of elastic forces by inertial forces and can be recommended for setting the subordinate control systems of electric drives of technological machines.

Key words: electric drive, electromechanical system, elastic mechanical oscillations, dynamic loads, damping, two-mass system, automatic control system, additional feedback, regulator, relationship, interaction, generalized indicators.

Постановка проблеми

Сучасні регульовані електроприводи (ЕП) відомих виробників оснащені електродвигунами постійного та змінного струму, силовими керованими перетворювачами з силовими тиристорними та транзисторними модулями, принципово новою елементною базою засобів систем управління, обчислювальної та вимірювальної техніки.

Реалізація фахівцями-електромеханіками на практиці заявлених технічних показників високого рівня якості процесів керування та регулювання таких ЕП не вдається через виникнення взаємозв'язку та взаємного впливу на динаміку електромеханічної системи (ЕМС) пружних коливань у механічній передачі та достатньо «швидких» процесів електромагнітної підсистеми (ЕМП) [1; 2].

Збудження в ЕМС приводу пружних коливань сприяє значному зростанню рівня додаткових динамічних навантажень на двигун і механізм зі зниженням терміну їхньої служби зносу та витривалості, збільшує теплове навантаження двигуна, комутаційної апаратури та керованого перетворювача. Процеси регулювання координат ЕП істотно відхиляються від необхідних (оптимальних) показників якості за умов виконання технологічного процесу.

Наприклад, значне зниження виробничих можливостей прокатних станів виникає внаслідок некорисного підвищення динамічних навантажень в передачах металургійних машин та робочому обладнанні. Так, близько 71% зруйнувань деталей металургійних машин мають характер втоми та виникають в результаті дії змінних динамічних навантажень. Полонки ведучих шестерень приводу кліті, муфт, пальців, вузлів головного редуктора обумовлені перевантаженнями та руйнуваннями від періодичної дії динамічного навантаження, що в 2.5–3 рази перебільшують технологічні навантаження [3]. Окрім того, динамічне навантаження небезпечні в основному тим, що моменти, проходячи через нульові значення, провокують розімкнення зазорів приводної лінії, великі удари, додаткові навантаження.

Електромеханічний зв'язок за певних поєднань параметрів механічної та електромагнітної підсистем приводу викликає ефект демпфування пружних механічних коливань [4]. Отже, оптимізацією структури та параметрів ЕП можна практично вирішити задачу обмеження рівня та часу дії динамічних навантажень двигуна та механізму. Реалізувати демпфуючі властивості ЕП можливо при опрацюванні проектних рішень шляхом вибору його параметрів або налаштуванням регуляторів за методами, які не потребують спеціального обладнання та відрізняються незначними витратами, тому вважається за доцільне в якості обов'язкового етапу проектування надійних, високопродуктивних і точних машин здійснювати оцінку можливостей ЕП з демпфування пружних коливань при виконанні необхідних законів руху виконавчих органів.

Таким чином, удосконалення динамічних якостей ЕП під час проектування технологічних машин шляхом обмеження динамічних навантажень при збудженні пружних механічних коливань та забезпечення заданої точності руху робочого механізму залишається актуальною науково-практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз значної кількості літературних джерел свідчить про те, що синтез автоматизованих ЕМС виконується різноманітними методами, що знаходять своє відображення у теорії автоматичного керування. Найбільшого розповсюдження в інженерній практиці набули методи синтезу ЕМС, що спираються на задані показники якості, а також можна виділити дослідження, в яких синтез ЕМС виконується з використанням демпфуючих властивостей ЕП [5–8]. Втім завдання оптимізації реакції ЕП на дію пружних механічних коливань вирішуються формально без урахування фізичних особливостей ЕМС, а традиційні методи розв'язання задач припускають вибір параметрів (структури) на підставі завдання динамічних властивостей ЕМС як цілого. Наприклад, в цьому напрямку популярними є сучасні універсальні методи синтезу, що забезпечують розташування коренів характеристичного рівняння в заздалегідь визначених положеннях, які відповідають тим чи іншим показникам якості керування [3–8]. В загальному випадку, під час синтезу САК на базі стандартного характеристичного полінома динамічні властивості системи визначаються його коефіцієнтами, які не змінюються в процесі функціонування, тобто поведінка системи (вид динамічних характеристик складових частин ЕП) є заздалегідь регламентованою без урахування процесів резонансної електромеханічної взаємодії і впливу характеру зв'язку підсистем на динамічні властивості реальних ЕМС. До того ж, в деяких випадках задача синтезу САК розв'язується локально, виключно для певного обладнання, що не дозволяє застосовувати отримані налаштування для широкого класу ЕП, що зумовлює потребу подальших досліджень в контексті розвитку методів оптимізації САК виходячи з умови забезпечення бажаних динамічних властивостей за вихідною координатою.

Огляд та аналіз результатів науково-дослідних робіт, опублікованих за два останні десятиліття, свідчить про те, що фахівцями запропоновані та застосовуються на практиці методи синтезу ЕМС з реалізацією демпфуючого ефекту ЕП. Проте існують важливі відмінності у підходах розв'язання задач синтезу параметрів і структур ЕМС і навіть самої постановки задач демпфування пружних коливань. Одним із раціональних напрямів синтезу параметрів ЕМС вважається напрямок, де використовуються методи синтезу з метою мінімізації реакції ЕП на дію коливань моменту сил пружної передачі як зовнішнього збурення [9]. Розв'язання задач синтезу цього (першого) напрямку дозволяє при динамічному «загрубніні» сформувати перехідні процеси із заданими показниками для координат ЕМП розімкнених та замкнутих ЕМС (m, i, ω_1). Також отримав розвиток більш продуктивний, з погляду синергетики, напрямок активного придушення пружних механічних коливань при посиленні особливих (специфічних) ефектів взаємодії підсистем. Методи синтезу ЕМС такого (другого) напрямку дозволяють визначити параметри та їх співвідношення оптимальні по згасанням коливань для основних координат системи ($m, m_y, \omega_1, \omega_2$) на основі закономірностей електромеханічної взаємодії з відведенням та перетворенням енергії пружних коливань [5–9]. Якщо при оптимізації ЕМС обрати за каталогами електричне та механічне обладнання з розрахунковими параметрами не вдається, коригують параметри ЕП у складі структур систем підлеглого регулювання або систем модального управління.

Загалом традиційні методи зниження рівня динамічності в ЕП передбачають вибір параметрів (структури) виходячи з завдання динамічних властивостей ЕМС, як цілого. Такий підхід заздалегідь регламентує вид динамічних характеристик складових частин (підсистем) і в результаті синтезу системи ефекти взаємодії та характер зв'язку підсистем навмисно виключені з продуктивних варіантів оптимізації. Вибір оптимальних параметрів ЕП в цьому випадку відповідає фізичній природі демпфуючої дії електромеханічного зв'язку, і мінімуму коливання в системі можливе реалізувати за рахунок певного поєднання параметрів динамічної жорсткості механічної характеристики ЕП. Непряма оцінка демпфуючої дії при синтезі проводиться у разі коефіцієнту електромеханічного зв'язку [4] за умови його близькості до одиниці. Оцінка є неоднозначною і умова не є достатньою і вимагає, перевірки на досягнення максимуму здатності демпфуючої дії ЕП.

Формулювання мети дослідження

Практично представницьким та змістовним з позиції врахування різноманітних факторів є метод синтезу параметрів ЕМС на основі використання демпфувальних можливостей власне ЕП за рахунок реалізації ефектів резонансної електромеханічної взаємодії процесів для забезпечення бажаних динамічних властивостей технологічної

системи. Тому метою дослідження є аналіз процесів демпфування пружних коливань в ЕМС за умов введення додаткових зворотних зв'язків за швидкостями першої і другої мас для системи підпорядкованого регулювання (СПР) та визначення співвідношень параметрів для САК, що забезпечать формування оптимальних показників коливання повної системи.

Викладення основного матеріалу дослідження

Аналіз залежності, що характеризує зміну моменту в пружній ланці:

$$M_{\text{ПР}}(t) = C_{12} \int [\omega_1(t) - \omega_2(t)] dt, \tag{1}$$

припускає природне вирішення завдання обмеження динамічних навантажень із мінімізацією підінтегральної функції, що вимагає введення в систему регулювання додаткового зворотного зв'язку за різницею швидкостей першої ω_1 і другої ω_2 мас.

Для дослідження розглядається ЕП з СПР [7–9] з послідовною корекцією параметрів, відповідно до якої складено узагальнену структурну схему двомасової ЕМС [10], яка відображає властивості ЕП з лінійною механічною характеристикою і фізичні закономірності реальних процесів на основній частоті резонансної електромеханічної взаємодії та представлена на рис. 1 з позначеннями у відносній формі параметрів ($T_{\text{М1}}$ – механічна стала часу електродвигуна; $T_{\text{М2}}$ – механічна стала часу механізму; C_{12} – значення коефіцієнту жорсткості пружної ланки; $W_{\text{КСТ}}$ – передавальна функція контуру регулювання струму; W_{332} – передавальна функція зворотного зв'язку за різницею першої та другої мас; $K_{\text{РШ}}$ – коефіцієнт підсилення регулятора швидкості; $T_{\text{РШ}}$ – стала часу контуру регулювання швидкості; $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1 = (T_{\text{М1}} + T_{\text{М2}})/T_{\text{М1}}$ – коефіцієнт розподілу наведених моментів інерції електродвигуна J_1 та механізму J_2 ; $\Omega_{12} = \sqrt{C_{12}(J_1 + J_2)/(J_1 \cdot J_2)}$ – частота вільних коливань двомасової механічної частини ЕП).

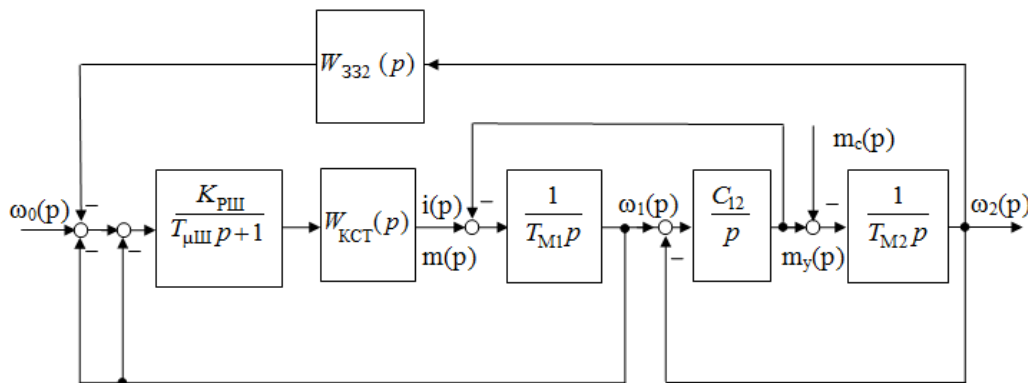


Рис. 1. Структурна схема СПР ЕП із додатковим зворотним зв'язком за різницею швидкостей першої й другої мас у відносних одиницях

Передавальні функції за керівним і збурювальним впливами отримані на підставі структурної схеми, представленої на рис. 1, у відносній формі запису параметрів під час реалізації зворотного зв'язку за різницею швидкості двигуна ω_1 і зведеної до валу двигуна швидкості механізму ω_2 :

$$W_1(p) = \frac{\omega_2(p)}{\omega_0(p)} = \frac{K_{\text{РШ}}}{Q_{12}(p)}, \tag{2}$$

$$W_2(p) = \frac{m(p)}{m_c(p)} = \frac{K_{\text{РШ}}}{Q_{12}(p)}, \tag{3}$$

де $Q_{12}(p)$ – характеристичний поліном

$$Q_{12}(p) = \gamma T_{\text{М1}} T_{\text{М2}} T_y^2 p^4 + \gamma T_{\text{М1}} T_y^2 p^3 + \gamma (T_{\text{М1}} T_{\text{М2}} + 2 K_{\text{РШ}} T_y^2) p^2 + \gamma T_{\text{М1}} p + K_{\text{РШ}}. \tag{4}$$

За умови реалізації ефектів резонансної електромеханічної взаємодії процесів в ЕМС досягається ідентичність процесів в ЕМП і МП, тоді $Q_{12}(p)$ набуває такого вигляду:

$$Q_{12}(p) = (a_0 T_y^2 p^2 + a_1 T_y p + 1)(a_0 T_y^2 p^2 + a_1 T_y p + 1) = 0. \tag{5}$$

Використовуючи форму нормування параметрів ЕМС за співвідношеннями електромеханічної взаємодії [11], одержуємо характеристичне рівняння в у нормованому вигляді:

$$Q_{12}(p) = \gamma K_B T_y^4 p^4 + 2\gamma \xi_D \sqrt{K_B} T_y^3 p^3 + \gamma(K_B + 2) T_y^2 p^2 + 2\xi_D \sqrt{K_B} T_y p + 1 = 0. \quad (6)$$

Рівняння (5) і (6) тотожні за умови дотримання рівності коефіцієнтів відповідних ступенів оператора p :

$$\left. \begin{aligned} a_0^2 &= \gamma K_B; \\ 2a_1 a_0 &= 2\gamma \xi_D \sqrt{K_B}; \\ 2a_0 + a_1^2 &= \gamma(K_B + 2); \\ 2a_1 &= 2\gamma \xi_D \sqrt{K_B}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де γ – коефіцієнт відносного демпфірування коливань в ЕМП;

$K_B = T_{M1} T_{\mu Ш} / K_{PШ} T_y^2$ – коефіцієнт електромеханічної взаємодії процесів МП й ЕМП.

Система рівнянь (7) має розв’язки за таких співвідношень узагальнених параметрів електромеханічної взаємодії:

$$\left. \begin{aligned} K_B &= \frac{1}{\gamma}; \\ \xi_D &= \sqrt{\frac{2\gamma - 1}{\gamma}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Показники загасання вільних коливань ЕМС знаходять із коренів характеристичного рівняння $Q_{12}(p) = 0$ і визначаються такими виразами:

$$\left. \begin{aligned} \xi^* &= \frac{1}{2} \sqrt{2\gamma - 1}; \\ \mu^* &= \sqrt{\frac{5 - 2\gamma}{2\gamma - 1}}; \\ \Omega^* &= \frac{\sqrt{5 - 2\gamma}}{2T_y}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Тоді оптимальне значення (за критерієм мінімуму коливальності) параметрів контуру регулювання швидкості СПР:

$$\left. \begin{aligned} K_{PШ}^* &= \frac{\gamma T_{M1}}{2\sqrt{2\gamma - 1} T_y}; \\ T_{\mu Ш}^* &= \frac{T_y}{2\sqrt{2\gamma - 1}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Аналіз оптимальних значень (9) показує, що досягти мінімуму коливальності ЕМС у випадку введення додаткового зворотного зв’язку за різницею швидкостей ($\omega_1 - \omega_2$) у контур регулювання швидкості (на вхід регулятора швидкості) можливо з меншими значеннями коефіцієнта підсилення регулятора швидкості (для даного $\gamma = \text{const}$), оскільки для випадку реалізації граничного демпфування для системи з пропорційним регулятором швидкості [12; 13], але при цьому збільшується статичне падіння швидкості $\Delta\omega_{Ш2}$.

На рис. 2 наведені графіки перехідних процесів $m(t)$ за умови східчастого збурювального впливу у вигляді моменту сил статичного опору m для стандартної й скоректованої оптимізованої системи для $\gamma = 1,5$ й $\Omega_{12} = 62,8 \text{ c}^{-1}$: графік 1 відповідає перехідному процесу для стандартної СПР при налаштуванні регуляторів з реалізацією граничного демпфірування [12], графік 2 відображає перехідний процес з додатковим зворотним зв’язком за різницею швидкостей і налаштуванням СПР відповідно до оптимальних за критерієм мінімуму коливальності параметрів (10).

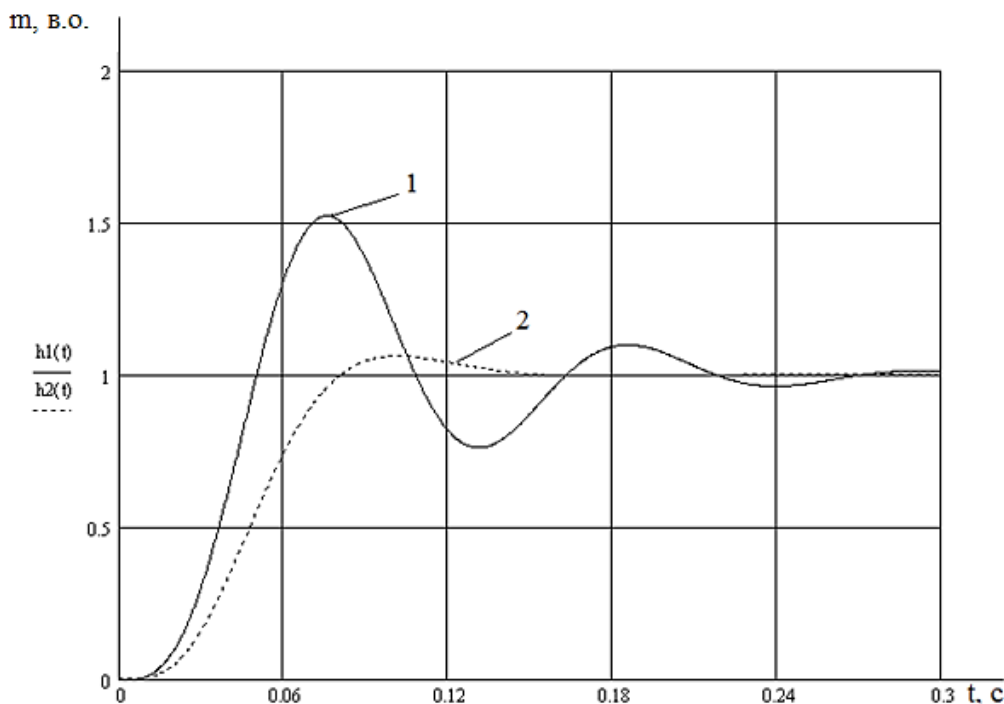


Рис. 2. Реакція ЕМС ЕП зі СПР на вплив для типової оптимізованої САК і з додатковим зворотним зв'язком за різницею швидкостей

Висновки

1. З порівняння показників (9) ЕМС із додатковим зворотним зв'язком за різницею швидкостей ($\omega_1 - \omega_2$) з показниками оптимізованої системи типової (уніфікованої) структури СПР [12, 13] видно, що коливальність першої значно нижче, і процеси будуть монотонними вже з коефіцієнтом співвідношення інерційних мас $\gamma \geq 2,5$ ($\xi^* = 1,0$).

2. Вибір параметрів регулятора швидкості здійснюється на підставі співвідношень (8) з допущенням, що $T_{\text{мш}} = T_{\text{ст}} + T_{\text{ф}}$, що вимагає налаштування контуру струму на граничну швидкодію.

3. Пропоновані для практики налаштування ЕП з СПР аналітичні співвідношення (10) враховують ефект резонансної електромеханічної взаємодії підсистем за допомогою узагальнених параметрів $K_{\text{в}}$, $\xi_{\text{д}}$, γ .

4. Всі параметри ЕМС перебувають у взаємозв'язку, що обумовлений коефіцієнтом розподілу інерційних мас γ , тому при оптимізації параметрів ЕМС за критерієм мінімуму коливальності основних координат їх не можна обрати довільно.

5. При проектуванні ЕМС технологічних машин у інженера з'являється можливість регламентувати електричним способом ступінь демпфування пружних механічних коливань, при цьому показники процесів граничного демпфування характеризуються коефіцієнтом загасання, коливальністю та частотою коливань відповідно до запропонованих співвідношень (9).

6. У багатьох випадках статичне падіння швидкості строго нормується умовою виконання технологічного процесу (наприклад, безперервні прокатні стани), що вимагає від інженера прийняття компромісних рішень.

Список використаної літератури

1. Samuelsson O. Load modulation at two locations for damping of electromechanical oscillations in a multimachine system. *Power Engineering Society Summer Meeting 2000. IEEE*. 2000. Vol. 3, P. 1912–1917. doi: 10.1109/pess.2000.868826.
2. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. Vibration suppression in a two-mass drive system using PI Speed Controller and Additional Feedbacks. *Comparative Study IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007. Vol. 54, Issue 2. P. 1193–1206.
3. Задорожний Н. А. Обобщенные требования к конструированию механических передач с упругими связями. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2006. №. 66. С. 27–29.
4. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
5. Pyatibratov G. Ya. On the Use of Electromechanical Systems for Limiting Dynamic Loads in Spring Mechanisms. *Russian Electrical Engineering*. 2018. Vol. 89, Issue 1. P. 36–41.

6. Blagodarov D. A., Kostin A. A., Reznikovskiy A. M., Safonov Yu. M., Chernikov S. Yu. Development of Control Systems of Electric Drives with Flexible Mechanics. *Russian Electrical Engineering*. 2015. Vol. 86, No. 1. P. 18–21.
7. Коцегуб П. Х. Синтез вентильних приводів постійного струму. Київ: ІЗМН, 1997. 124 с.
8. Толочко О. І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Донецьк: Норд-Прес, 2004. 298 с.
9. Марущак Я. Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним керуванням. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. 208 с.
10. Попович М. Г., Борисик М. Г., Гаврилук В. А. Теорія електроприводу. Київ: Вища шк., 1993. 494 с.
11. Задорожня І. М., Задорожній М. О. Оптимізація та взаємозв'язки параметрів двомасових електромеханічних систем [Електронний ресурс] : монографія – Електрон. текст. дані (4,5 Мб). Краматорськ : ДДМА, 2021.
12. Задорожня І. Н., Задорожній Н. А. Синтез електромеханической системы предельной степени устойчивости и минимальной колебательности упругой механической подсистемы. Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». 2017. № 27 (1249). С. 150-155.
13. Задорожня І. М. Синтез параметрів двомасових електроприводів на основі ефекту резонансної електромеханічної взаємодії / І. М. Задорожня, М. О. Задорожній // *Вісник Херсонського національного технічного університету «ХНТУ»*. 2023. № 1 (84) С. 18–24. doi: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.1.2>

References

1. Samuelsson, O. (2000). Load modulation at two locations for damping of electromechanical oscillations in a multimachine system. *Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE*, Vol. 3, P. 1912–1917. doi: 10.1109/pess.2000.868826.
2. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. (2007) Vibration suppression in a two-mass drive system using PI Speed Controller and Additional Feedbacks. *Comparative Study IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 54, Issue 2. P. 1193–1206.
3. Zadorozhnyi N. A. Generalized requirements for the design of mechanical gears with elastic connections. *Electrical engineering and electrical equipment*. 2006. №. 66. Pp. 27–29. [in Russian].
4. Kliuchev, V. (2001) *Teoriya elektroprivoda* [Theory of the electric drive]. Moskva: Energoatomizdat Publ. [in Russian].
5. Pyatibratov, G. (2018) On the Use of Electromechanical Systems for Limiting Dynamic Loads in Spring Mechanisms. *Russian Electrical Engineering*. Vol. 89, Issue 1. P. 36–41.
6. Blagodarov D., Kostin A., Reznikovskiy A., Safonov Yu. & Chernikov S. (2015) Development of Control Systems of Electric Drives with Flexible Mechanics. *Russian Electrical Engineering*. Vol. 86, No. 1. P. 18–21.
7. Kotsehub, P. (1997) *Syntezy ventylnykh pryvodiv postoiinoho strumu* [Synthesis of DC valve drives]. Kyiv: IZMN [in Ukrainian].
8. Tolochko, O. (2004) Analiz ta syntezy elektromekhanichnykh system zi sposterihachamy stanu: navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchyykh navchalnykh zakladiv [Analysis and synthesis of electromechanical systems with state observers: a study guide for students of higher educational institutions]. Donetsk: Nord-Pres [in Ukrainian].
9. Marushhak, Ya. (2005) *Sintezy elektromekhanichnykh sistem z poslidovnim ta paralel'nim keruvanniam* [Synthesis of Electromechanical systems with serial and parallel control]. L'viv, «L'vivs'ka politekhnika» Publ. [in Ukrainian].
10. Popovych, M., Borysyk, M. & Havryliuk, V. (1993) *Teoriia elektropryvodu* [Theory of electric drive]. Kyiv: Vyscha shk. [in Ukrainian].
11. Zadorozhnia, I. & Zadorozhnyi M. (2021) *Optyimizatsiia ta vzaiemozviazky parametriv dvomasovykh elektromekhanichnykh system* [Optimization and interrelations of parameters of two-mass electromechanical systems]. Kramatorsk : DDMA [in Ukrainian].
12. . Zadorozhnia, I. & Zadorozhnyi M. Synthesis of an electromechanical system of the ultimate degree of stability and minimal oscillation of an elastic mechanical subsystem. *Bulletin of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. №. 27 (1249). 2017. Pp. 150–155.
13. Zadorozhnia, I. & Zadorozhnyi M. Synthesis of electromechanical system parameters based on the effect of resonant electromechanical interaction Visnyk KNTU, 2023. No 1 (84). P. 18–24. doi: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.1.2>