

I. М. ЗАДОРОВНИЙ

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

М. О. ЗАДОРОВНИЙ

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

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРІВ ДВОМАСОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ РЕЗОНАНСНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

В роботі розглянуто актуальне завдання вибору оптимальних параметрів електромеханічних систем технологічних машин для вдосконалення їх динамічних якостей, зокрема за критерієм мінімуму коливальності перехідних процесів. Показано, що параметри, які характеризують той чи інший тип електроприводу, визначаються закономірностями електромеханічного взаємозв'язку, що дозволяє використовувати специфічну властивість демпфування пружних механічних коливань власне електроприводом.

Більшість існуючих методів синтезу передбачає використання класичних оптимізаційних алгоритмів, які орієнтовані на мінімізацію реакції електроприводу при дії пружних коливань. При такому підході коливання моменту в пружній ланці інтерпретуються як дія на електродвигун зовнішніх вимушених 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 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 астатичною системою підпорядкованого регулювання з активним демпфіруванням пружних механічних коливань, що досягається вибором відповідного співвідношення динамічних параметрів при реалізації процесів резонансної електромеханічної взаємодії і дозволяє забезпечити оптимальність перехідних процесів за критерієм мінімуму коливальності.

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

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

I. M. ZADOROVNIY

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. ZADOROVNIY

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

SYNTHESIS OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM PARAMETERS BASED ON THE EFFECT OF RESONANT ELECTROMECHANICAL INTERACTION

The decision of actual task 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.

Most of the existing synthesis methods involve the use of classical optimization algorithms, which are focused on minimizing the response of the electric drive under the action of elastic vibrations. With this approach, moment fluctuations in the elastic link are interpreted as the action of external forced vibrations on the electric motor. The work focuses on the fact that in electromechanical systems it is generally necessary to consider related processes during the interaction of oscillations in an electromagnetic and mechanical electric drive.

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 an astatic system of subordinate regulation with active damping of elastic mechanical vibrations, which is achieved by choosing the appropriate ratio of dynamic parameters during the implementation of resonant electromechanical interaction processes and allows to ensure the optimality of transient processes according to the criterion of minimum oscillations, has received further development.

The implementation of the proposed optimal calculation ratios for adjusting the speed regulator during optimization is based on the compensation of the influence of elastic forces by inertial forces and can be recommended for adjusting the subordinate regulation systems of electric drives of a wide class of technological machines.

Key words: *electric drive, electromechanical system, elastic mechanical vibrations, dynamic loads, damping, two-mass system, automatic control system, controller, interrelation, interaction, generalized indicators.*

Постановка проблеми

Сучасний регульований електропривод (ЕП), як визначна складова процесів автоматизації, інтегрує в собі досягнення сьогодення багатьох галузей науки і техніки – електромашинобудування, силової перетворювальної електроніки, засобів систем керування та обчислювальної техніки, та внаслідок наявності різноманітних лінійних і нелінійних елементів, забезпечує необхідні статичні і динамічні характеристики технологічних машин. Домінуючими режимами роботи ЕП сучасної структури та комплектації, який за наявності пружних ланок механічної передачі [1, 2] є складною електромеханічною системою (ЕМС) з проявом тісного взаємозв'язку процесів в електромагнітній (ЕЧ) та механічній частинах (МЧ), є різноманітні динамічні режими, що забезпечують інтенсифікацію технологічних процесів промислового виробництва. Пружні ланки механічної передачі радикально змінюють динамічні властивості ЕП в цілому, викликають короточасні перевантаження двигуна, появу додаткових навантажень, що впливає на надійність і довговічність, і реально в ЕМС при взаємозв'язку процесів спостерігаються специфічні коливальні явища.

В редукторних ЕП з пружною механічною частиною можливі в робочих режимах коливання, що параметрично збуджуються, що викликає вібрації та прискорює знос передач. Додаткові коливальні складові перехідних процесів сприяють зростанню динамічних навантажень на електричне та механічне обладнання ЕП, збільшують теплове навантаження електродвигунів, що негативно впливає на термін служби та надійність функціонування та виконання технологічних операцій машини (агрегату).

Досягнення бажаних динамічних характеристик автоматизованої ЕМС можливе шляхом виконання синтезу відповідних керуючих пристроїв або регуляторів, проте при відпрацюванні ЕП впливів керування та збурення в ЕМС, синтезованих на основі традиційних методик, спостерігаються тривалі коливальні процеси неприпустимої амплітуди, часто з порушенням стійкості руху, а наближення частоти зовнішніх впливів збурення до величин частот вільних коливань пружної механічної частини призводить в системі ЕП до явища резонансу зі значним збільшенням навантаження на механізм і двигун.

Для створення оптимальних автоматизованих ЕМС використовуються різноманітні методи синтезу, більшість з яких так чи інакше базується на класичних оптимізаційних алгоритмах, проте ці методи здебільше орієнтовані на мінімізацію реакції ЕП при дії пружних коливань, коли коливання моменту в пружній ланці інтерпретуються як дія на електродвигун зовнішніх вимушених коливань. Насправді в ЕМС необхідно в загальному випадку розглядати пов'язані процеси при взаємодії коливань у підсистемах, що дозволяє зробити висновок про доцільність та необхідність подальшого вдосконалення методів синтезу регуляторів систем автоматичного керування (САК) ЕП технологічних машин з використанням демпфувальних можливостей власне ЕП за рахунок реалізації ефектів резонансної електромеханічної взаємодії процесів.

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 [3-6]. 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.

Формулювання мети дослідження

При проектуванні ЕП актуальною є задача синтезу параметрів САК двомасових ЕМС за критерієм мінімуму коливальності, яка потребує врахування фізичних закономірностей демпфування пружних механічних коливань за умов врахування впливу взаємозв’язку електромеханічної (ЕМП) та механічної (МП) підсистем при реалізації оптимальної електромеханічної взаємодії процесів.

Викладення основного матеріалу дослідження

У сучасних машинах і механізмах, як і раніше, широко експлуатуються ЕП із системами підпорядкованого (каскадного) регулювання (СПР) й послідовною корекцією параметрів [5-7], що обумовлене простотою налаштування регуляторів на деякий оптимум, незалежністю в обмеженні кожної з регульованих координат, можливістю використання уніфікованих пристроїв керування. Більша частина проєктованих зараз ЕП постійного й змінного струмів, як локальні САК, мають синтезовані (алгоритмічно) структури підпорядкованого регулювання з типовими налаштуваннями регуляторів. Для дослідження обрано узагальнену структурну схему двомасової ЕМС [8], яка відображає властивості ЕП з лінійною механічною характеристикою і фізичні закономірності реальних процесів на основній частоті резонансної електромеханічної взаємодії та СПР з пропорційно-інтегральним регулятором швидкості (ПІ-РШ), що представлена на рис. 1 з позначеннями у відносній формі параметрів (T_{M1} – механічна стала часу електродвигуна; T_{M2} – механічна стала часу механізму; $T_C = 1/c$ – стала часу пружної механічної ланки ($c = C_{12} \cdot \omega_H / M_H$ – відносне значення коефіцієнту жорсткості пружної ланки); C_{12} – абсолютне значення; W_{KCT} – передавальна функція контуру регулювання струму; $K_{PШ}$ – коефіцієнт підсилення регулятора швидкості; $T_{Ш}$ – стала часу контуру регулювання швидкості; $\gamma = (J_1 + J_2) / J_1 = (T_{M1} + T_{M2}) / T_{M1}$ – 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 МЧ ЕП).

На практиці в рамках СПР двомасовим пружним об’єктом оптимізацію динаміки за критерієм мінімуму коливальності здійснюють вибором налаштувань контурних регуляторів з посиленням електромеханічного зв’язку, що забезпечує формування механічної характеристики ЕП із СПР необхідної жорсткості. Під час виконання технологічних операцій різні режими роботи ЕП вимагають незмінності швидкості в процесі зміни навантаження, і в СПР для забезпечення нульової статичної помилки за навантаженням застосовують регулятори швидкості із пропорційно-інтегральним (ПІ) законом регулювання.

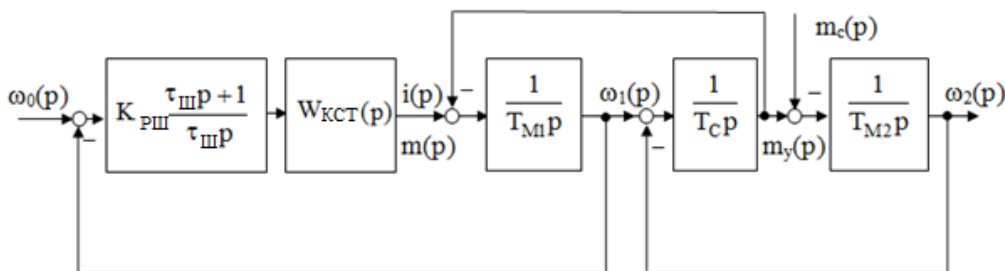


Рис. 1. Структурна схема СПР ЕП з нульовою статичною помилкою за навантаженням у відносних одиницях

Дослідження демпфування пружних коливань в ЕМС з нульовою статичною помилкою за навантаженням є складним завданням, тому що практично потребує під час оптимізації параметрів формування динамічної жорсткості механічної характеристики (статизм дорівнює нулю). Варіація параметрів СПР і введення в закон регулювання швидкості інтегральної складової приводять до зміни динамічної жорсткості механічної характеристики, чим розширюється можливість мінімізації коливальності ЕМС.

У процесі аналізу граничного ступеня демпфування пружних коливань саме ЕП впливом дисипативних сил у механічній частині (МЧ) знехтуємо $-b_{12} = 0$ ($\xi_{12} = 0$), тобто її властивості визначаються механічними сталими часу T_{M1} , T_{M2} і сталою часу жорсткості передачі $-T_C$. Змінюючи налаштування регуляторів СПР, впливають на істотність електромеханічного зв'язку й, відповідно, на ступінь демпфувального ефекту ЕП. За відсутності в ЕМС інших, крім електродвигуна, демпфувальних елементів ступінь загасання коливань у консервативній коливальній МЧ є кількісним показником демпфувальної дії ЕП. Для визначення гранично припустимих параметрів налаштування регуляторів СПР ЕП із пружними зв'язками приймаємо $W_{KCT}(p) = 1,0$ з огляду на допущення безінерційності контуру регулювання струму і беремо до уваги те, що при налаштуванні параметрів зі сталими інтегрування ПІ-РШ замкнений контур струму є безінерційним, а стала часу фільтра датчика швидкості – тахогенератора – мала в порівнянні зі сталою механічних коливань $T_y = 1/\Omega_{12}$ [5-7].

Передавальні функції за координатами другої маси для впливів керування і збурення отримані з перетворень структурної схеми (рис. 1) та мають вигляд:

$$W_{10}(p) = \frac{\omega_2(p)}{\omega_0(p)} = \frac{K_{PШ}(\tau_{Ш}p + 1)}{Q(p)}, \quad (1)$$

$$W_4(p) = \frac{m_y(p)}{\omega_0(p)} = \frac{T_{M1}\tau_{Ш}p^2 + K_{PШ}\tau_{Ш}p + K_{PШ}}{Q(p)}, \quad (2)$$

де $Q(p)$ – характеристичний поліном ЕМС із нульовою статичною помилкою за навантаженням m .

Дослідження демпфувальних властивостей ЕП здійснюються за характеристичним рівнянням з параметрами ЕМП і МП:

$$Q(p) = \gamma T_{M1}\tau_{Ш}T_y^2p^4 + \gamma\tau_{Ш}K_{PШ}T_y^2p^3 + \gamma(T_{M1}\tau_{Ш} + K_{PШ}T_y^2)p^2 + \tau_{Ш}K_{PШ}p + K_{PШ} = 0. \quad (3)$$

Виходячи із прийнятої в теорії електромеханічної взаємодії [9] процедури поділу повної ЕМС на окремі (парціальні) підсистеми, приймаємо, що власні частоти парціальних МП й ЕМП:

$$\Omega_{M0} = \frac{1}{T_y}, \quad \Omega_{E0} = \sqrt{\frac{K_{PШ}}{T_{M1}\tau_{Ш}}}. \quad (4)$$

Коефіцієнт демпфування МП за відсутності демпфувальних факторів складатиме $\xi_{МП} = 0$, а коефіцієнт демпфування ЕМП буде визначатися співвідношенням параметрів у вигляді:

$$\xi_d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_{PШ}\tau_{Ш}}{T_{M1}}}. \quad (5)$$

Частота Ω_{E0} (4) і коефіцієнт демпфування ξ_d (5) визначені з типової форми запису характеристичного рівняння ЕМП – ланки другого порядку:

$$Q_{EMП}(p) = T_{M1}\tau_{Ш}p^2 + \tau_{Ш}K_{PШ}p + K_{PШ} = 0. \quad (6)$$

Коефіцієнт резонансної електромеханічної взаємодії для розглянутого випадку застосування СПР із ПІ-РШ визначається залежністю:

$$K_B = \frac{\Omega_{M0}^2}{\Omega_{E0}^2} = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_{E0}^2} = \frac{T_{M1}\tau_{Ш}}{K_{PШ}T_y^2}. \quad (7)$$

Тоді за наявності електромеханічного зв'язку ЕМП і МП взаємодіють.

Зі спільного розгляду виразів (5) і (7) одержуємо співвідношення взаємозв'язку параметрів ЕМП та МП:

$$\frac{T_{M1}}{K_{PШ}} = \frac{\sqrt{K_B}T_y}{2\xi_d}, \quad \tau_{Ш} = 2\xi_d\sqrt{K_B}T_y. \quad (8)$$

Особливо варто підкреслити оригінальність пропонування до використання у дослідженні співвідношень: вони аналітично відображають зв'язок параметрів ЕМП і МП залежно від узагальнених показників – K_B й ξ_d з відомим фізичним змістом і кількісно визначеними границями.

Підстановка узагальнених показників, що відповідають параметрам ЕМС, дозволяє одержати характеристичне рівняння ЕМС (3) у нормованому вигляді:

$$Q_0(p) = \gamma K_B T_y^4 p^4 + 2\gamma \xi_d \sqrt{K_B T_y} p^3 + \gamma(1 + K_B) T_y^2 p^2 + 2\xi_d \sqrt{K_B T_y} p + 1 = 0. \quad (9)$$

З аналізу динамічних властивостей двомасової ЕМС витікає, що при дотриманні умов істотності електромеханічної взаємодії в області припустимих значень узагальнених показників K_B , ξ_d , γ існує хоча б один екстремум – максимум загасання (мінімум коливальності) пружних електромеханічних коливань. Характер процесів при взаємодії повинен бути коливальним із загасанням протягом часу відбору енергії коливань.

Для зв'язаних підсистем корені характеристичного рівняння (9) для загального випадку коливальних перехідних процесів в ЕМС для $1,1 < \gamma < 5,0$ мають комплектацію вигляду

$$\left. \begin{aligned} p_{1,2} &= -\delta_1 \pm j\Omega_1; \\ p_{3,4} &= -\delta_2 \pm j\Omega_2, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

де δ_1, δ_2 – дійсні частини коренів, які у випадку $\delta_1 > 0$ і $\delta_2 > 0$ визначають ступінь загасання коливальних процесів в ЕМС;

Ω_1, Ω_2 – уявні частини коренів, що характеризують нижчу (Ω_1) та вищу частоти (Ω_2) вільних коливань ЕМС із двома ступенями вільності.

Характеристичне рівняння для двох пар комплексно-сполучених коренів (9) є складеним із двох підсистем, які взаємодіють [9], тому для виявлення граничного (максимального) ступеня демпфувальної дії ЕП характеристичне рівняння набуває вигляду добутку двох взаємодіючих коливальних ланок:

$$Q(p) = (T_0^2 p^2 + 2\xi_E T_0 p + 1)(T_0^2 p^2 + 2\xi_M T_0 p + 1) = 0. \quad (11)$$

Характеристичне рівняння (11) описує в загальному випадку процес електромеханічної взаємодії підсистем із різними коефіцієнтами загасання, які заздалегідь не є відомими (для випадку неповної тотожності процесів $\xi_E \neq \xi_M$ ($\xi_E < 1,0$ і $\xi_M < 1,0$)).

Характеристичне рівняння (9) набуває вигляду (11) за наступних умов:

$$\left. \begin{aligned} \xi_E + \xi_M &= \xi_d; \\ \xi_E \xi_M &= \frac{\gamma - 1}{4}; \\ K_B &= K_0 = \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Умови отримані з перетворення системи рівнянь, складених в процесі зіставлення й порівнювання коефіцієнтів однакових ступенів нормованого характеристичного рівняння (9) і описуючого граничну електромеханічну взаємодію характеристичного рівняння (11).

Екстремальне – максимальне – значення демпфувальної дії ЕП досягається за умови $\xi_M = \xi_E$, тоді коефіцієнт демпфування в ЕМС зі сталою часу T_0 :

$$\left. \begin{aligned} \xi_0^* &= \xi_E = \xi_M = \frac{1}{2} \sqrt{\gamma - 1}; \\ \xi_d &= \xi_{d0} = \sqrt{\gamma - 1}; \\ T_0 &= \sqrt{\gamma} T_y. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

З метою одержання виразів для прямих оцінок динамічних показників демпфувальної дії умови (13) підставимо в еквівалентне характеристичне рівняння (11), що набуває такого вигляду:

$$(\gamma T_y^2 p^2 + \sqrt{\gamma}(\gamma - 1) T_y p + 1)(\gamma T_y^2 p^2 + \sqrt{\gamma}(\gamma - 1) T_y p + 1) = 0. \quad (14)$$

В результаті аналіз вигляду коренів рівняння (14) виявляємо, що в ЕМС зі СПР і ПІ-РШ, якщо $1,0 < \gamma \leq 5,0$, процеси резонансної електромеханічної взаємодії мають коливальний характер із частотою:

$$\Omega_0 = \Omega_E = \Omega_M = \frac{\sqrt{5-\gamma}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\gamma T_y}} = \frac{\sqrt{5-\gamma}}{2} \cdot \frac{\Omega_{12}}{\sqrt{\gamma}}, \quad (15)$$

і при максимальному коефіцієнті демпфування (13) показник коливальності набуває значення, що відповідає заявленому в завданні мінімуму:

$$\mu_0 = \mu_E = \mu_M = \sqrt{\frac{5-\gamma}{\gamma-1}}. \quad (16)$$

Підстановка значень K_0 та ξ_{10} відповідно до залежностей (12) та (13) у співвідношення (8) дозволяє отримати оптимальні параметри ЕМС.

Висновки

1. Пропоновані для практики налаштування ЕП з СПР та ПП-РШ аналітичні співвідношення (8) та (9) принципово відрізняються від багатьох відомих рекомендацій методів оптимізації параметрів ЕМС при інтерпретації дії на ЕП пружних механічних коливань з частотою Ω_{12} або динамічному «загрубленні», оскільки враховують ефект резонансної електромеханічної взаємодії підсистем за допомогою узагальнених параметрів K_B , ξ_d , γ .

2. Всі параметри ЕМС, які характеризують той або інший варіант ЕП з мінімальною коливальністю, 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, оскільки необхідними умовами досягнення максимуму демпфування в ЕМС є певна для даного γ величина загасання процесів в електромагнітній підсистемі ξ_d та коефіцієнт електромеханічної взаємодії K_B .

3. Якщо порівнювати отримані показники (15) та (16) системи з ПП-РШ з показниками ЕМС із П-РШ [9], то можна зробити висновок, що граничний ступінь демпфування пружних механічних коливань в астатичній системі досягається за умови частоти в γ раз нижче, ніж у статичній, що дозволяє значно розширити діапазон можливих при реалізації параметрів для однакової коливальності процесів.

4. Показники характеру процесів в ЕМС (15) та (16) із граничним ступенем демпфування пружних коливань можуть бути досягнуті в ЕП з СПР за умови нульової помилки за навантаженням, якщо параметри налаштування регулятора швидкості будуть відповідати співвідношенням (8) і умовам граничного демпфування (13), тобто з урахуванням $\xi_d = 2\xi_0$ параметри ПП-РШ визначатимуться наступними залежностями:

$$K_{РШ} = \frac{2T_{М1}}{T_y} \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad \tau_{Ш} = 2\sqrt{\gamma(\gamma-1)} \cdot T_y. \quad (17)$$

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 коефіцієнтами загасання і частотою коливань відповідно до запропонованих співвідношень (13) та (15).

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. 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.
4. 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.
5. Коцегуб П. Х. Синтез вентильних приводів постійного струму. Київ: ІЗМН, 1997. 124 с.
6. Толочко О. І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Донецьк: Норд-Прес, 2004. 298 с.
7. Марущак Я. Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним керуванням. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. 208 с.
8. Попович М. Г., Борисик М. Г., Гаврилюк В. А. Теорія електроприводу. Київ: Вища шк., 1993. 494 с.
9. 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.

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. 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.
4. 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.
5. Kotsehub, P. (1997) *SynteZ ventylnykh pryvodiv postiinoho strumu* [Synthesis of DC valve drives]. Kyiv: IZMN [in Ukrainian].
6. Tolochko, O. (2004) Analiz ta synteZ elektromekhanichnykh system zi sposterihachamy stanu: navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchykh 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].
7. Marushhak, Ya. (2005) *SinteZ elektromekhanichnykh sistem z poslidovnim ta paralelnim keruvanniam* [Synthesis of Electromechanical systems with serial and parallel control]. L'viv, «L'vivs'ka politekhnikha» Publ. [in Ukrainian].
8. Popovych, M., Borysyk, M. & Havryliuk, V. (1993) *Teoriia elektropryvodu* [Theory of electric drive]. Kyiv: Vyscha shk. [in Ukrainian].
9. Zadorozhnia, I. & Zadorozhnii M. (2021) *Optymizatsiia ta vzaiemozviazky parametriv dvomasovykh elektromekhanichnykh system* [Optimization and interrelations of parameters of two-mass electromechanical systems]. Kramatorsk : DDMA [in Ukrainian].