

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 621.31

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.2.1>

І. М. ЗАДОРЖНЯ

Донбаська державна машинобудівна академія

ORCID: 0000-0002-7822-3517

М. О. ЗАДОРЖНИЙ

Донбаська державна машинобудівна академія

ORCID: 0000-0003-0957-9998

АСПЕКТИ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН З РЕАЛІЗАЦІЄЮ ГРАНИЧНОГО СТУПЕНЯ ДЕМПФІРУВАННЯ ПРУЖНИХ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ

В роботі розглянуто актуальну задачу вибору оптимальних параметрів електромеханічних систем електроприводів технологічних машин для вдосконалення їх динамічних якостей, зокрема, мінімальної коливальності перехідних процесів, що забезпечить задану точність руху робочих механізмів ще на етапі проектування. Показано, що параметри, які характеризують той або інший тип електроприводу з максимальним демпфуванням і мінімальним динамічним навантаженням, визначаються закономірностями електромеханічного взаємозв'язку, що дозволяє використати специфічну властивість демпфірування пружних механічних коливань власне електроприводом.

На основі закономірностей електромеханічного взаємозв'язку процесів в електричній та механічній підсистемах приводу пропонується на початковому етапі проектування електромеханічної системи використовувати узагальнені показники процесів електромеханічної взаємодії, які є простими й відповідають вимогам системного аналізу. В результаті досліджень показано, що при оптимізації електромеханічних систем за критерієм мінімуму коливальності основних координат параметри не можна обрати безпідставно, доцільно призначити або задати відповідно до існуючих методів синтезу систем автоматичного керування, оскільки основні параметри, що характеризують той або інший варіант електроприводу з мінімальною коливальністю і мінімальним динамічним навантаженням, перебувають у взаємозв'язку, обумовленому коефіцієнтом розподілу інерційних мас γ .

Запропоновано залежності, що дозволяють для реального поєднання параметрів електромеханічної системи при реалізації граничної міри демпфірування пружних механічних коливань досягти максимуму демпфуючої дії електроприводу, обмежити динамічні навантаження та оптимізувати перехідні процеси.

Ключові слова: електропривод, електромеханічна система, пружні механічні коливання, динамічні навантаження, демпфірування, двохмасова система, взаємозв'язок, взаємодія, узагальнені показники.

И. Н. ЗАДОРЖНЯ

Донбасская государственная машиностроительная академия

ORCID: 0000-0002-7822-3517

Н. А. ЗАДОРЖНИЙ

Донбасская государственная машиностроительная академия

ORCID: 0000-0003-0957-9998

АСПЕКТЫ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН С РЕАЛИЗАЦИЕЙ ПРЕДЕЛЬНОЙ СТЕПЕНИ ДЕМПФИРОВАНИЯ УПРУГИХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

В работе рассмотрена актуальная задача выбора оптимальных параметров электромеханических систем электроприводов технологических машин для совершенствования их динамических качеств, в частности, минимальной колебательности переходных процессов, обеспечения заданной точности движения рабочих механизмов еще на этапе проектирования. Показано, что параметры, характеризующие тот или иной тип электропривода с максимальным демпфированием и минимальными динамическими нагрузкам, определяются закономерностями электромеханической

взаємозв'язи, що дозволяє використовувати специфічне свойство демпфирования пружин механічних коливань власне електроприводом.

На основі закономірностей електромеханічної взаємозв'язи процесів в електричній і механічній підсистемах привода пропонується на початковому етапі проектування електромеханічної системи використовувати обобщенні показателі процесів електромеханічного взаємодія, які є простими і відповідають вимогам системного аналізу. В результаті досліджень показано, що при оптимізації електромеханічних систем за критерієм мінімуму колибельності основних координат параметри не можна вибрати «наугад», произвольно назначать или задавать в соответствии с существующими методами синтеза систем автоматического управления, поскольку основные параметры, характеризующие тот или иной вариант электропривода с минимальной колебательностью и минимальными динамическими нагрузками, находятся во взаимосвязи, обусловленной коэффициентом распределения инерционных масс γ .

Предложены зависимости, позволяющие для реального сочетания параметров електромеханічної системи при реалізації предельної ступені демпфирования пружин механічних коливань досягти максимуму демпфирующего действия электропривода, ограничить динамические нагрузки и оптимизировать переходные процессы.

Ключевые слова: электропривод, електромеханічна система, пружинні механічні коливання, динамічні навантаження, демпфирование, двухмассовая система, взаємозв'язь, взаємодія, обобщенні показателі.

I. M. ZADOROZHNIYA
Donbass state engineering academy
ORCID: 0000-0002-7822-3517
M. O. ZADOROZHNIY
Donbass state engineering academy
ORCID: 0000-0003-0957-9998

ASPECTS OF THE OPTIMAL PARAMETERS CHOICE IN ELECTROMECHANICAL SYSTEM DURING DESIGN OF TECHNOLOGICAL MACHINES ELECTRIC DRIVES WITH THE IMPLEMENTATION OF THE ULTIMATE DEGREE OF ELECTROMECHANICAL VIBRATIONS

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, the minimum oscillation of transient processes, to ensure the specified accuracy of the movement of working mechanisms at the design stage. 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, which makes it possible to use the specific property of damping of elastic mechanical vibrations by the electric drive itself.

Based on the laws of the electromechanical interrelation of processes in the electrical and mechanical subsystems of the drive, it is proposed to use generalized indicators of electromechanical interaction processes at the initial stage of designing an electromechanical system, which are simple and meet the requirements of system analysis. As a result of the research, it has been shown that when optimizing electromechanical systems according to the criterion of the minimum oscillation of the main coordinates, the parameters cannot be chosen "at random", arbitrarily assigned or set in accordance with the existing methods of synthesis of automatic control systems, since the main parameters characterizing one or another version of an electric drive with a minimum oscillation and minimum dynamic loads are interconnected due to the coefficient of distribution of inertial masses γ .

Dependencies are proposed that allow for a real combination of parameters of an electromechanical system when realizing the limiting degree of damping of elastic mechanical vibrations to achieve the maximum damping action of an electric drive, limit dynamic loads and optimize transient processes.

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

Постановка проблеми

Основним структурним елементом автоматизації сучасних технологічних машин є регульований електропривод (ЕП), в якому інтегровані всі технічні здобутки електромашинобудування, силової перетворювальної електроніки, засобів систем керування й обчислювальної техніки.

З теоретичних досліджень відомо і підтверджено практично, що вдосконалення технічного рівня машин: ресурсу роботи, вагогабаритних та енергетичних показників, точності відпрацювання керівних впливів і швидкодії – пов'язане з вдосконаленням характеристик власне електропривода. Запроваджені рішення з вдосконалення технічного рівня компонентів електропривода, що були спрямовані на докорінне вдосконалення його динамічних якостей як електромеханічної системи (ЕМС), дозволили отримати локальні результати, які не можна екстраполювали на широкі класи електромеханічних систем, до того ж

на динаміку привода істотним чином впливають пружні механічні ланки при одночасному прояві специфічних особливостей динамічних систем – взаємозв'язку процесів в електричній та механічній підсистемах приводу.

Фундаментальним завданням електропривода є обмеження динамічних навантажень при активному демпфіруванні пружних механічних коливань, що є актуальною задачею сьогодення та для проектування надійних, високопродуктивних і точних технологічних машин вимагає обов'язкової оцінки можливостей електропривода з демпфірування пружних коливань при виконанні необхідних законів руху виконавчих органів машин з заданою точністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз результатів численних досліджень [1-8] свідчить про те, що фахівцями запропоновані і застосовуються на практиці дієві методи синтезу ЕМС з реалізацією демпфіруючого ефекту ЕП, проте існують принципові відмінності в підходах до вирішення завдань синтезу параметрів і структур ЕМС і навіть самої постановки задач демпфірування пружних коливань.

Одним з раціональних напрямків синтезу параметрів ЕМС вважається напрямок, де використовуються методи синтезу з метою мінімізації реакції ЕП на дію коливань моменту сил пружної передачі, як зовнішнього збурення [3, 4], що дозволяє при динамічному «огрубінні» сформувати перехідні процеси з заданими показниками для координат електромагнітної підсистеми розімкнутих і замкнених ЕМС (m, i, ω_1). Проте результати, отримані в рамках даного напрямку мають обмежену сферу раціонального застосування і визначаються конкретною ситуацією, що приводить до ряду частинних рішень мінімізації коливальності координат електропривода, які не в повній мірі враховують особливості електромеханічної взаємодії процесів в ЕМС.

Разом з тим, триває розвиток більш продуктивного, з точки зору синергетики, напрямку активного придушення пружних механічних коливань при посиленні специфічних ефектів взаємодії підсистем, методи синтезу в рамках якого дозволяють визначити оптимальні за загасанням коливань параметри і їх співвідношення для основних координат системи ($m, m_y, \omega_1, \omega_2$) на основі закономірностей електромеханічної взаємодії з відведенням і перетворенням енергії пружних коливань [9-12]. Таким чином, останнім часом при дослідженнях ЕМС необхідно більше уваги приділяти встановленню фізичних закономірностей електромеханічної взаємодії підсистем ЕП, що є основою для подальшого розвитку методів оптимізації систем автоматичного керування (САК) з метою мінімізації коливальності при активному демпфіруванні пружних коливань.

Формулювання мети дослідження

При проектуванні ЕП нового покоління на початковому етапі необхідним є раціональний вибір таких параметрів ЕМС та їх сполучень, які дозволять в ЕП з пружними механічними коливаннями забезпечити обумовлені технологією показники якості та мінімальну коливальність перехідних процесів згідно критеріям взаємозв'язку коливальних процесів в електромагнітній (ЕМП) і механічній (МП) підсистемах ЕП та співвідношенням параметрів ЕМС з оцінкою демпфуючої дії ЕП, що і є метою роботи.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для вибору оптимальних параметрів ЕМС при проектуванні ЕП технологічних машин з реалізацією граничного ступеня демпфірування пружних механічних коливань пропонується керуватися закономірностями електромеханічної взаємодії [13] при використанні узагальнених показників для типової системи підлеглого регулювання (СПР). В якості об'єкту керування розглядається ЕП з лінійною механічною характеристикою, структурна схема якого для досліджень представляється у формі узагальненої структурної схема класичної двомасової ЕМС [24], що відображає фізичні закономірності реальних процесів на основній частоті електромеханічної взаємодії [2, 13] та наведена на рис. 1 з позначеннями у відносній формі параметрів (β – коефіцієнт жорсткості механічної характеристики ЕП; T_{M1} – механічна стала часу електродвигуна; T_{M2} – механічна стала часу механізму; C_{I2} – коефіцієнт пружності механічної передачі; T_E – електромагнітна стала часу електродвигуна; $T_V = 1/\Omega_{12}$ – стала часу пружних механічних коливань; $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1 = (T_{M1} + T_{M2})/T_{M1}$ – коефіцієнт розподілу інерційних мас електродвигуна J_1 та механізму J_2 ; $\Omega_{12} = \sqrt{C_{I2}(J_1 + J_2)/(J_1 J_2)}$ – частота вільних коливань двомасової механічної частини ЕП).

Характеристичне рівняння, що згідно структурній схемі рис. 1, описує властивості двомасової ЕМС для вільної складової руху

$$Q(p) = \gamma T_{M1} T_E T_V^2 p^4 + \gamma T_{M1} T_V^2 p^3 + \gamma (T_{M1} T_E + T_V^2) p^2 + \gamma T_{M1} p + 1. \quad (1)$$

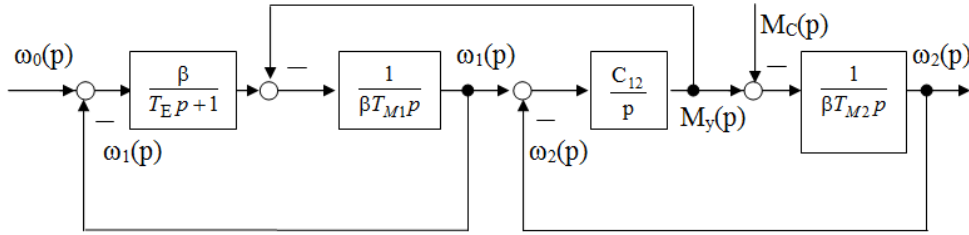


Рис.1. Узагальнена структурна схема двомасової ЕМС

Згідно запропонованій формі нормування характеристичного рівняння ЕМС [10-13], що є компактною та фізично прозорою та при мінімальній кількості узагальнених показників K_B , ξ_D , γ і дозволяє спростити аналіз динамічних властивостей ЕМС:

$$\begin{cases} K_B = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_E^2} = T_{M1} T_E \Omega_{12}^2 = \frac{T_{M1} T_E}{T_Y^2}, \\ \xi_D = \frac{\alpha_E}{\Omega_E} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_{M1}}{T_E}}, \\ \gamma = (J_1 + J_2) / J_1 = (T_{M1} + T_{M2}) / T_{M1}. \end{cases} \quad (2)$$

На підставі (2) для двомасових ЕМС із пружною МП встановлений зв'язок демпфівальної дії ЕП з параметрами ЕМС, що дозволяє у відносних одиницях зробити узагальнений аналіз за виглядом перетвореного згідно (2) рівняння (1) коренів характеристичного рівняння:

$$Q(p) = \gamma K_B T_Y^4 p^4 + 2\gamma \sqrt{K_B} \xi_D T_Y^3 p^3 + \gamma(1 + K_B) T_Y^2 p^2 + 2\gamma \sqrt{K_B} \xi_D T_Y p + 1 = 0 \quad (3)$$

демпфівальної дії широкого класу ЕП.

Залежно від величин K_B , ξ_D , γ формується різна комплектація коренів характеристичного рівняння (1), що у результаті й визначає динамічні властивості ЕМС із відповідними значеннями параметрів – електромеханічну T_{M1} та електромагнітну T_E сталі часу:

$$T_E = \frac{\sqrt{K_B}}{2\xi_D} T_Y, T_{M1} = 2\sqrt{K_B} \xi_D T_Y. \quad (4)$$

При аналізованні властивостей ЕМС [13] встановлено, що в теоретично існуючому інтервалі варіювання узагальнених показників K_B , ξ_D для конкретного значення коефіцієнту γ є одне екстремальне значення функції ступеня демпфівальної дії ЕП, що характеризується логарифмічним декрементом загасання:

$$\lambda = 2\pi \left| \frac{\alpha}{\Omega_{p.o}} \right| = \lambda_{опт} = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma-1}{5-\gamma}}. \quad (5)$$

Екстремальне значення λ є граничним для ЕМС із конкретним $\gamma = \text{const}$, тому що проявляється при електромеханічній взаємодії ЕП і МП із повним відбором і перетворенням енергії і мінімально можливою тривалістю процесів, при цьому електромеханічний зв'язок і взаємодія залежать від близькості парціальних частот і загасання в підсистемах.

У граничному випадку максимуму демпфівальної дії узагальнені показники K_B і ξ_D повинні мати значення, визначені коефіцієнтом розподілу інерційних мас γ ЕП, що повною мірою відповідає фізичним уявленням про зв'язаність підсистем ЕМС [13], а математичні співвідношення представляють собою еталон – міру граничних можливостей ЕП як динамічного гасителя коливань:

$$\begin{cases} K_B = K_{B,опт} = \frac{1}{\gamma}, \\ \xi_D = \xi_{D,опт} = \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma}}. \end{cases} \quad (6)$$

При підстановці в загальному вигляді умов граничного ступеня електромеханічної взаємодії (6) у співвідношення взаємозв'язку параметрів парціальних МП і ЕМП (4) одержуємо залежності для визначення оптимальних сталей часу ЕП двомасової ЕМС:

$$T_{E,опт} = T_E^* = \frac{1}{2\sqrt{\gamma-1}} T_Y = \frac{1}{2\sqrt{\gamma-1}\Omega_{12}}, T_{M1,опт} = T_{M1}^* = \frac{2\sqrt{\gamma-1}}{\gamma} T_Y = \frac{2\sqrt{\gamma-1}}{\gamma} \cdot \frac{1}{\Omega_{12}}. \quad (7)$$

При аналізі властивостей ЕМС необхідно також враховувати умови взаємодії ЕМП та МП [13], а саме, умови ізоляції процесів у підсистемах для випадку слабого демпфірування в ЕП:

$$\left. \begin{aligned} \xi_D &\leq 0.1 \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \\ K_B &\geq \frac{40(\gamma-1)}{\gamma}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

а також умови, коли процеси в ЕМП і МП можна розглядати роздільно (ізолювано):

$$\left. \begin{aligned} \xi_D &\geq \frac{10(\gamma-1)}{\sqrt{\gamma}}, \\ K_B &\geq \frac{1}{\gamma}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

На основі принципу електромеханічної взаємодії на етапі проектування технологічних машин, обладнаних електроприводом із пружною механічною частиною, можна визначити оптимальні параметри, які забезпечать бажані показники загасання перехідних процесів з мінімальною коливальністю. Співвідношення (7) свідчать про те що динамічні параметри оптимальної ЕМС знаходяться у взаємозв'язку, обумовленому коефіцієнтом розподілу інерційних мас γ .

Оптимальне демпфірування пружних коливань може бути досягнуто тільки за умови коливального характеру електромеханічної взаємодії. Тому значення γ конкретного варіанта ЕП накладає обмеження на параметри ЕП. Так, з урахуванням виразів (6), (7) одержуємо залежність:

$$\frac{T_{MI}}{4T_E} = \frac{\gamma-1}{\gamma}, \quad (10)$$

з якої витікає, що:

$$\frac{T_{MI}}{4T_E} < 1.0. \quad (11)$$

Отримані співвідношення (10), (11) в формалізованому вигляді представляють узагальнені вимоги до конструювання пружної механічної передачі машин з мінімальною коливальністю процесів. Співвідношення функціонально зв'язують не тільки параметри електротехнічних, але й конструктивних, механічних і технологічних варіантів обмеження динамічних навантажень ЕП. Закономірності оптимального перетворення енергії електромеханічної взаємодії вимагають вибору частоти двомасової системи за співвідношеннями (6), (7) з урахуванням сталих часу ЕП для оптимального значення γ .

Для кількісної оцінки величин оптимальних параметрів здійснюємо порівняння співвідношень параметрів ЕМС із пружним зв'язком і ЕМС при ідеалізації механічної передачі абсолютно «жорсткою» ланкою та розраховуємо співвідношення електромеханічної й електромагнітної сталих часу, які забезпечують реалізацію рівних величин коефіцієнта демпфірування в розглянутих ЕМС.

Власні частоти коливань ЕМС для екстремального випадку при оптимальному коефіцієнті взаємодії K_B (6) визначаються параметрами:

$$\left(T_E^* \cdot T_{MI}^*\right)_y = \frac{1}{\gamma} \cdot T_y^2. \quad (12)$$

Коефіцієнт демпфірування при граничному ступені залежно від γ може мати значення

$$\xi_0 = \xi_{D,OPT} = \frac{1}{2} \sqrt{\gamma-1} \quad (13)$$

при цьому співвідношення параметрів окремих (парціальних) підсистем при граничному демпфіруванні в ЕМС прийматиме наступний вигляд:

$$\left(\frac{T_{MI}^*}{T_E^*}\right)_y = 4 \cdot \frac{\gamma-1}{\gamma}. \quad (14)$$

При порівнянні співвідношень параметрів ЕМС із пружним зв'язком необхідно врахувати сумарний зведений момент інерції (i , відповідно, T_M), тобто:

$$m = \left(\frac{\gamma T_{MI}}{T_E}\right)_y = \left(\frac{\gamma T_{MI}^*}{T_E^*}\right)_y = 4 \cdot (\gamma-1). \quad (15)$$

Для ЕМС при допущенні абсолютної «жорсткості» механічної передачі співвідношення параметрів

$$n = \left(\frac{T_M}{T_E}\right)_Ж = \left(\frac{\gamma T_{MI}}{T_E}\right)_Ж. \quad (16)$$

визначає коефіцієнт демпфірування

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{T_M}{T_E}\right)_Ж} \quad (17)$$

де T_M – електромеханічна стала часу ЕП із сумарним зведеним моментом інерції;
 T_E – електромагнітна стала часу (фактична).

Дослідження

Для характерних значень коефіцієнта демпфірування системи ξ було виконано відповідні розрахунки, результати яких представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри і співвідношення ЕМС

№ з/п	Коефіцієнт демпфірування	Співвідношення параметрів ЕМС		Коефіцієнт розподілу інерційних мас
		жорстка передача, n	пружна передача, m	
	ξ	T_M/T_E	$\gamma T_{M1}/T_E$	γ
1	$\sqrt{2}/8$	0.125	0.5	1.125
2	0.25	0.25	1.0	1.25
3	$\sqrt{2}/4$	0.5	2.0	1.5
4	0,5	1.0	4.0	2.0
5	$\sqrt{2}/2$	2.0	8.0	3.0
6	0.75	2.25	9.0	3.25
7	$\sqrt{3}/2$	3.0	12.0	4.0
8	0.9	3.24	12.96	4.24
9	1.0	4.0	16.0	5.0

З аналізу результатів розрахунку табл.1 можна встановити, що при однакових значеннях співвідношення параметрів T_M/T_E в ЕМС із жорстким і пружним зв'язком реалізувати граничне демпфірування пружних коливань вдається при більш високій коливальності: в ЕМС із жорстким зв'язком і $n = 1.0$ коефіцієнт демпфірування $\xi = 0.5$, а для ЕМС із пружною ланкою $m = 1.0$ можна забезпечити при $\gamma = 1.25$ і $\xi = 0.25$. Або щоб забезпечити демпфірування в ЕМС як для абсолютно жорсткої передачі з коефіцієнтом $\xi_{ж} = 0.5$ при $n = 1.0$, в ЕМС із пружною ланкою необхідно вибрати співвідношення $m = 4.0$ і $\gamma = 2.0$, тому що $\xi_{\nu} = \sqrt{\gamma - 1} / 2$.

Результативність методу оптимізації параметрів ЕМС ілюструється на рис. 2, де наводяться перехідні процеси по координаті $M_y(t)$ при одиничному ступінчастому збуренні по моменту навантаження M_C у відносних одиницях. При $\gamma = 1.5$ і $T_{\gamma} = 0.016$ с ($\Omega_{12} = 62.8$ с⁻¹) в ЕМС при оптимальних значеннях (7) параметрів T_{M1} опт і T_E опт реалізується граничний ступінь демпфірування з коефіцієнтом $\xi = \sqrt{2}/4$ для співвідношення параметрів $m = \gamma T_{M1}/T_E = 2.0$.

Для порівняння на рис. 3 також наведено графік перехідного процесу по координаті M_y у відносних одиницях при такому ж співвідношенні параметрів для випадку слабкої електромеханічної взаємодії при виборі сталих часу без врахування оптимальних співвідношень взаємозв'язку ($T_{M1} = 0.04$ с; $T_E = 0.03$ с; $\gamma = 1.5$; $\Omega_{12} = 62.8$ с⁻¹).

На рис. 4 наводяться графіки перехідних процесів за координатою $M_y(t)$ при одиничному східчастому збуренні за моментом навантаження M_C для характерних значень коефіцієнтів демпфірування при реалізації в ЕМС граничного ступеня демпфірування у відносних одиницях:

- графік 1 – $\gamma = 1,16$ і $\xi = 0,2$;
- графік 2 – $\gamma = 1,5$ і $\xi = \sqrt{2} / 4$;
- графік 3 – $\gamma = 3,0$ і $\xi = \sqrt{2} / 2$;
- графік 4 – $\gamma = 5,0$ і $\xi = 1,0$.

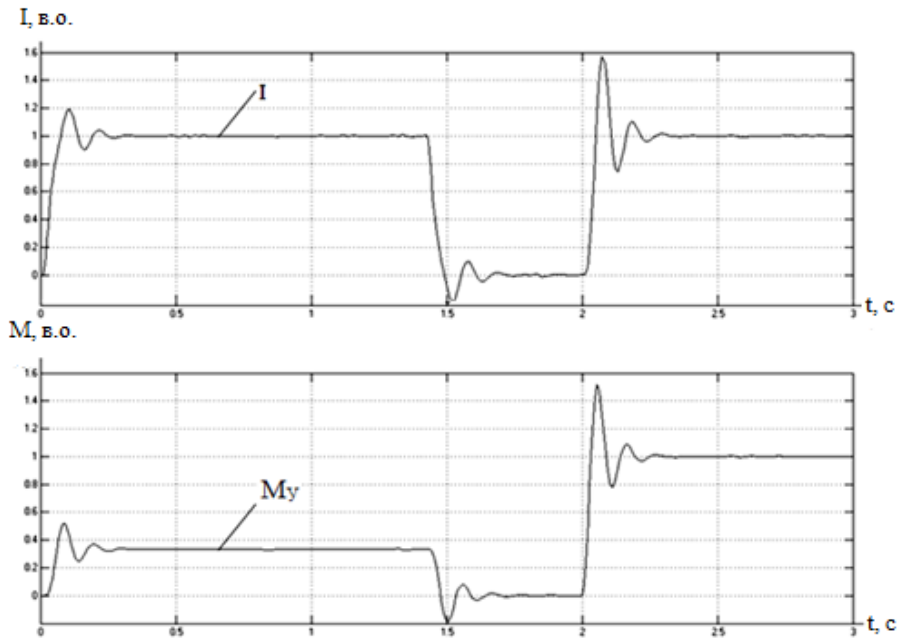


Рис. 2. Графіки перехідних процесів для оптимальних параметрів ЕМС у в.о.

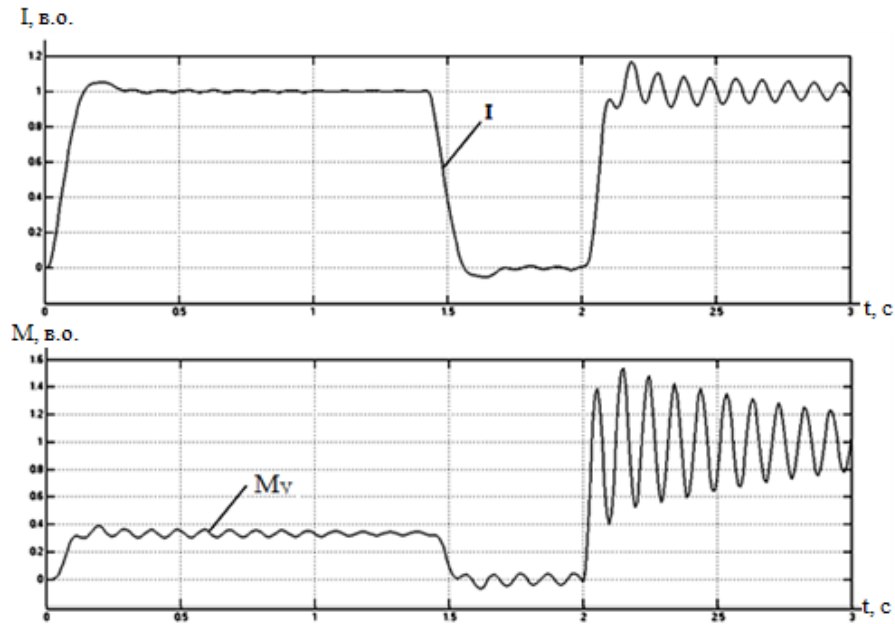


Рис. 3. Графіки перехідних процесів для типових налаштувань регуляторів ЕМС у в.о.

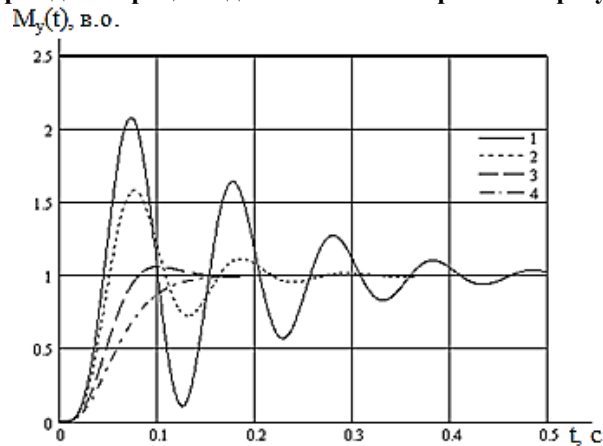


Рис. 4. Графіки перехідних процесів при реалізації в ЕМС граничного ступеня демпфірування у в.о.

Висновки

1. Основні параметри ЕМС – T_{MI} , T_E , γ , $T_V(\Omega_{12})$, що характеризують той або інший варіант ЕП з мінімальною коливальністю і мінімальним динамічним навантаженням, перебувають у взаємозв'язку, обумовленому коефіцієнтом розподілу інерційних мас γ , тому при оптимізації ЕМС за критерієм мінімуму коливальності основних координат параметри не можна обрати безпідставно, довільно призначити або задати, як того вимагає, наприклад, оптимізація систем за коефіцієнтами стандартного розподілу полюсів характеристичного полінома [6, 14, 15].

2. Співвідношення взаємозв'язку параметрів (2) з показниками коливальності перехідних процесів, дозволяють здійснити оптимізацію параметрів ЕМС за критерієм загасання коливань і враховують електротехнічні, механічні та конструктивні способи зниження динамічних навантажень в електроприводі, тобто чином відповідають вимогам системного аналізу

3. Процедура синтезу параметрів ЕМС із граничним ступенем взаємодії підсистем (2) при дотриманні умов (6) надає можливість впливати на посилення демпфірувальної дії ЕП конструктивними, механічними й електротехнічними способами, тобто співвідношення взаємозв'язку параметрів (7) дозволяють при проектуванні використати варіанти оптимізації, регламентовані параметрами лівої і правої частин від знаку рівності співвідношень оптимізації.

4. При невідповідності параметрів у конкретній розімкнутій ЕМС оптимальним (7) необхідно їх скорегувати відповідними способами або, якщо це дозволяє вирішення завдання, реалізувати оптимальні співвідношення шляхом охоплення регульованих координат жорсткими або гнучкими зворотними зв'язками САК.

5. Граничний ступінь демпфірування в ЕМС досягається при повній тотожності процесів у підсистемах, власні частоти системи є кратними і рівні парціальним, дія сил пружного зв'язку компенсується силами інерційного зв'язку, таким чином, у двомасовій ЕМС із пружним зв'язком при дотриманні умов граничного ступеня взаємодії (6) і з оптимальними параметрами ефект двомасовості не проявляється, а в системі відтворюються динамічні процеси однієї частоти як в еквівалентно жорсткій.

Список використаної літератури

1. Ключев, В. И. Состояние и перспективы развития теории электропривода с упругими механическими связями / В. И. Ключев, Л. В. Жильцов, Ю. Т. Калашников // Электричество. – 1981. – № 7. – С. 28–32.
2. Ключев В. И. Теория электропривода : учебник / В. И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
3. Борцов, Ю. А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.
4. Марущак, Я. Ю. Синтез электромеханических систем с последовательным та паралельним керуванням / Я. Ю. Марущак. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 208 с.
5. Осичев, А.В. Представление лимитирующих факторов быстрого действия в единой частотной плоскости при оценке полосы пропускания электропривода / А. В. Осичев // Вісник ХДПУ. Збірка наукових праць. Тематичний випуск 113. – Харків : ХДПУ, 2000. – С. 241–249.
6. Осичев А.В. Стандартные распределения корней в задачах синтеза в электроприводе / Осичев А.В., Котляров В.О., Марков В.С. // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: [Труды конференции]. – Харьков: Основа, 1997. – С. 104 – 109.
7. Samuelsson, O. Load modulation at two locations for damping of electromechanical oscillations in a multimachine system // O. Samuelsson / Power Engineering Society Summer Meeting 2000. IEEE. – 2000. – Vol. 3. – P. 1912–1917.
8. Pyatibratov, G. Ya. On the Use of Electromechanical Systems for Limiting Dynamic Loads in Spring Mechanisms // G. Ya. Pyatibratov / Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 89, Issue 1. – P. 36–41.
9. Земляков В.Д., Задорожний Н.А. О демпфировании электроприводом упругих электромеханических колебаний // Изв. вузов. Электромеханика. – 1985. – С. 99-92.
10. Задорожний, Н. А. Обобщенные оценки взаимосвязи упругих электромеханических колебаний в приводах грузоподъемных машин / Н. А. Задорожний, Н. Г. Марилев // Проблемы подъемно-транспортной техники. Печатные материалы научно-технической конференции с международным участием. – Алушта, 1993. – Секция 3. – С. 62 – 65.
11. Задорожний, Н. А. О комплексном подходе при проектировании электромеханических систем с упругими связями / Н. А. Задорожний // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика : печатные материалы конференции с международным участием. – Харьков : ХГПУ. – 1994. – С. 109–111.
12. Задорожний, Н. А. Анализ демпфирующего действия электропривода с упругими механическими связями при астатическом регулировании / Н. А. Задорожний, А. Н. Беш,

И. Н. Задорожня // Электротехнічні та комп'ютерні системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» – Київ: Техніка. – 2011. – Вип. 03(79). – С. 101–104.

13. Задорожний, Н. А. Взаимосвязи и оптимизация параметров двухмассовых электромеханических систем: монография / Н. А. Задорожний, И. Н. Задорожня. – Краматорск : ДГМА, 2015. – 202 с.

14. Кузовков, Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н. Т. Кузовков – М. : Машиностроение, 1976. – 184 с.

15. Бургин Б.Ш. Анализ и синтез двухмассовых электромеханических систем: монография / Бургин Б.Ш. – Новосибирск: НЭТИ, 1992. – 199 с.

References

1. Kliuchev V.I., Zhil'tsov L.V., Kalashnikov Iu.T. *Sostoianie i perspektivy razvitiia teorii elektroprivoda s uprugimi mekhanicheskimi svyaziami* [Status and development prospects of the theory of electric drives with elastic mechanical connections]. *Elektrichestvo (Electricity)*, 1981, no.7, pp. 28–32.

2. Klyuchev V. I. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of electric drive], (1985) Moskow, Russian Federation, Energoatomizdat, 560 p (In Russian).

3. Bortsov Iu.A., Sokolovskii G.G. *Avtomatizirovannyi elektroprivod s uprugimi svyaziami* [Automated electric drive with elastic connections]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1992. 288 p.

4. Marushhak Ya.Yu. *Sintez elektromekhanicheskikh sistem z poslidovnim ta paralel'nim keruvanniam* [Synthesis of Electromechanical systems with serial and parallel control]. L'viv, «L'viv's'ka politekhnik» Publ., 2005. 208 p.

5. Osichev A.V. *Predstavlenie limitiruiushchikh faktorov bystrodeistviia v edinoy chastotnoi ploskosti pri otsenke polosy propuskaniia elektroprivoda* [Performance limiting factors performance in single frequency plane when evaluating the bandwidth of the actuator]. *Visnik XDPU. Zbirka naukovix pracz* [The collection of scientific works]. Xarkiv, 2000, no. 113. – pp. 241–249.

6. Osichev A.V., Kotlyarov V.O., Markov V.S. Standartnyie raspredeleniya korney v zadachah sinteza v elektroprivode [Standard distributing of roots in the tasks of synthesis in an electromechanic] // *Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika: [Trudy konferentsii]*. – Harkov: Osnova, 1997. – pp. 104 – 109 (In Russian).

7. O. Samuelsson Load modulation at two locations for damping of electromechanical oscillations in a multimachine system. *Power Engineering Society Summer Meeting 2000*. IEEE, 2000, vol. 3, pp. 1912–1917. **doi: 10.1109/pess.2000.868826**.

8. G.Ya. Pyatibratov On the Use of Electromechanical Systems for Limiting Dynamic Loads in Spring Mechanisms. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89, Issue 1, pp. 36–41. **doi.org/10.3103/s1068371218010121**

9. Zemlyakov V.D., Zadorozhnyi N.A. O dempfirovanii elektroprivodom uprugih elektromekhanicheskikh kolebaniy [About damping of resilient electromechanical vibrations an electric drive] // *Izv. vuzov. Elektromekhanika*. – 1985. – pp. 99-92. Print.

10. Zadorozhnyi N. and N. Marilov Obobschyonnyie otsenki vzaimosvyazi uprugih kolebaniy v privodah gruzopodyomnyih mashin [Generalized assess the relationship of elastic vibrations in drives hoisting machines]. (1993) *Pечатnyie materialy NTK «Problemyi pod'yomno-transportnoy tekhniki»*, Alushta, Ukraine, pp. 62–65 (In Russian).

11. Zadorozhnyi N. A. O kompleksnom podhode pri proektirovanii elektromekhanicheskikh sistem s uprugimi svyaziyami [About an integrated approach in the design of electromechanical systems with elastic ties]. (1994) *Pечатnyie materialy NTK «Problemyi avtomatizirovannogo elektroprivoda»*, Kharkov, Ukraine, pp. 109–111 (In Russian).

12. Zadorozhnyi N. A. Analiz dempfiru-yushego deystviya elektroprivoda s uprugimi mekhanicheskimi svyaziyami pri astaticheskoy regulirovanii [Analysis of antivibration action of electromechanic with resilient mechanical connections at the astatic adjusting] / N. A. Zadorozhnyi, A. N. Besh, I. N. Zadorozh-nyaya // *Elektrotekhnichni ta komp'yuterni sistemi. Tematichnyi vipusk «Problemi avtomatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika»* – Kyiv: Tehnika. – 03(79). 2011. – pp.101–104. Print (In Russian).

13. Zadorozhnyi N. A., Zadorozhniaia I. N. *Vzaimosvyazi i optimizatsiia parametrov dvukhmassovykh elektromekhanicheskikh sistem* [Interconnections and optimization of parameters for two-mass electromechanical systems]. Kramatorsk, DGMA Publ., 2015. 202 p.

14. Kuzovkov, N. T. Modalnoe upravlenie i nablyudayushchie ustroystva [Modal management and looking after devices] / N. T. Kuzovkov – М. : *Mashinostroenie*, 1976. Print (In Russian).

15. Bургин B. Sh. Analiz i sintez dvukhmassovykh elektromekhanicheskikh sistem [Analysis and synthesis of the two-mass electromechanics systems] / B. Sh. Bургин – Novosibirsk: Novosib. elektrotehn. in-t, 1992 Print. (In Russian).