

## АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ПРОЦЕСІ ДЕМПФІРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОЛИВАНЬ ПРУЖНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ

**І.М. Задорожня\***, канд.техн.наук, **М.О. Задорожній\*\***, канд.техн.наук  
Донбаська державна машинобудівна академія,  
вул. Академічна, Краматорськ, 84313, Україна.  
E-mail: [zadorozhnyava\\_in@ukr.net](mailto:zadorozhnyava_in@ukr.net)

*Розглянуто актуальну задачу врахування параметрів силової частини електроприводів технологічних машин для вдосконалення їх динамічних якостей, що забезпечить задану точність руху робочих механізмів ще на етапі проектування. Показано, що в процесі вибору параметрів силової частини електроприводу для підготовки до етапів синтезу параметрів системи автоматичного керування необхідна оцінка процесів електро-механічного перетворення енергії пружних механічних коливань. Акцентовано увагу на необхідності оцінки динамічних показників координат перетворювача – струму і відхилення електрорушійної сили за граничної міри демпфірування пружних коливань, що є важливим для визначення умов, які сприяють реалізації максимуму демпфуючої дії електроприводу і дають змогу обмежити динамічні навантаження та оптимізувати перехідні процеси. Бібл. 13, рис. 1, табл. 1.*

**Ключові слова:** електромеханічна система, електропривод, тиристорний перетворювач, демпфірування.

**Вступ.** Регульований електропривод (ЕП) є основним структурним елементом автоматизації сучасних технологічних машин. Комплекти регульовані ЕП оснащуються електродвигунами значної переважувальної спроможності, керованими перетворювачами високої швидкодії та економічного регулювання. Фундаментальні перетворення елементної бази засобів систем керування ЕП і елементів обчислювальної техніки дають змогу сформулювати (теоретично) динамічні процеси заданої якості та реалізувати нетрадиційні алгоритми функціонування регуляторів.

**Проблематика досліджень.** Позитивні тенденції вдосконалення технічних компонентів ЕП призвели до виникнення негативних явищ, пов'язаних із взаємозв'язком процесів в електромагнітній та пружній механічній підсистемах електроприводів [1]. Найявністю пружних ланок механічної підсистеми ЕП за керуючої та збурюючої діях є причиною виникнення коливань зі зростанням динамічних навантажень на механічне та електричне обладнання [2-5]. Періодичні динамічні навантаження спричиняють втомне руйнування деталей передач, коливання якоря (ротора) у разі обертання двигуна з підвищенням струмового (теплого) навантаження обмоток і, відповідно, коливань струму та додаткової складової електрорушійної сили (ЕРС) перетворювача.

Традиційні методи синтезу електромеханічних систем (ЕМС) приводів машин не забезпечують необхідної точності регулювання та мінімізації коливальності. ЕП за певних співвідношень параметрів проявляє демпфуючу дію на пружні механічні коливання, що дає змогу вирішити в процесі синтезу актуальну задачу обмеження динамічних навантажень в ЕМС технологічних машин, і наблизити перехідні процеси до оптимальних згідно із заданим критерієм – мінімумом коливальності (максимумом демпфірування) [6].

**Постановка задачі дослідження.** Реалізація демпфуючої дії ЕП вимагає активної електро-механічної взаємодії процесів і полягає у відведенні та перетворенні енергії пружних коливань з її розсіюванням у силовому ланцюзі або поверненням у мережу. Основним завданням ЕП у процесі проектування є обмеження максимального рівня динамічних навантажень і часу їх дії. Оскільки електродвигун регулюється шляхом впливу на нього керованого перетворювача, то **метою дослідження** є оцінка динамічних показників вихідних координат перетворювача – максимуму (перерегулювання) струму та максимуму відхилення електрорушійної сили від сталих значень та визначення їхніх значень за граничної міри демпфірування пружних коливань.

**Матеріали досліджень.** Для аналізу ЕМС використано узагальнену структурну схему автоматизованого електроприводу постійного струму зі стабілізацією швидкості механізму, яка показана на рис. 1, з позначеннями у відносній формі параметрів [7]:  $T_{MI}$  – механічна стала часу електродвигуна;

© Задорожня І.М., Задорожній М.О., 2020

ORCID ID: \* <https://orcid.org/0000-0002-7822-3517>, \*\* <http://orcid.org/0000-0003-0957-9998>

$T_{M2}$  – механічна стала часу механізму;  $c_{12} = C_{12}\omega_H/M_H$  – коефіцієнт пружності механічної передачі;  $T_E$  – електромагнітна стала часу електродвигуна;  $T_y = 1/\Omega_{12}$  – стала часу пружних механічних коливань;  $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1 = (T_{M1} + T_{M2})/T_{M1} = T_M/T_{M1}$  – коефіцієнт розподілу інерційних мас електродвигуна  $J_1$  та механізму  $J_2$ ;  $T_M = \gamma T_{M1}$  – сумарна механічна стала часу;  $\Omega_{12} = \sqrt{C_{12}(J_1 + J_2)/(J_1 J_2)}$  – частота вільних коливань двомасової механічної частини ЕП;  $\Omega_E$  – частота коливань електричної частини ЕП;  $K_i = U_H/I_H R_E$  – коефіцієнт передачі ланцюга обмотки якоря електродвигуна;  $R_E$  – активний опір силового ланцюга;  $L_E$  – індуктивність силового ланцюга;  $K_{II}$  – коефіцієнт передачі перетворювача;  $K_P$  – коефіцієнт передачі регулятора швидкості.

У процесі аналізу ЕМС приймаємо наступні загальноприйняті допущення: деформації в механічній передачі пропорційні моменту, тобто підпорядковуються закону Гука; електродвигун представлено типовою динамічною ланкою другого порядку; в розглянутому діапазоні частот ( $\Omega_{12} = 30\text{--}150 \text{ c}^{-1}$ ) пружних коливань керований перетворювач апроксимується пропорційною ланкою ( $W_{II}(p) = K_{II}$ ) [8]; регулятор за керуючої та збурюючої дія не входить у режим обмеження і є пропорційною ланкою ( $W_{PШ}(p) = K_P$ ).

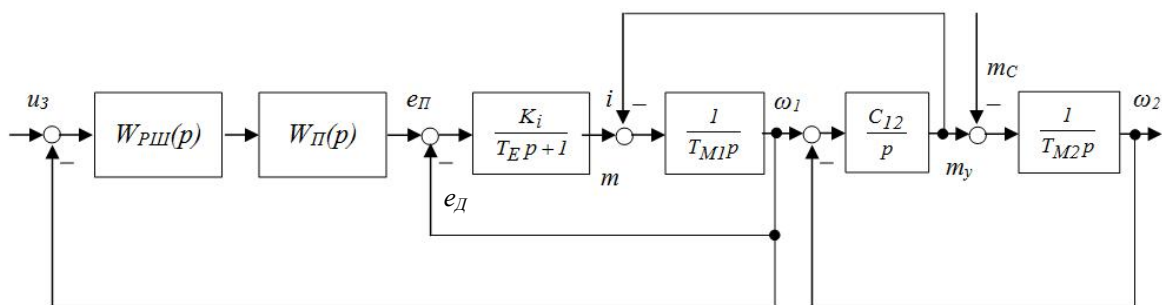


Рис. 1

На основі структурної схеми рис. 1 отримано передавальні функції

$$W_1(p) = \frac{\omega_2(p)}{u_3(p)} = \frac{K}{Q(p)}; \quad W_2(p) = \frac{i(p)}{m_c(p)} = \frac{K}{Q(p)}; \quad (1, 2)$$

$$W_3(p) = \frac{e(p)}{m_c(p)} = \frac{K(T_E p + 1)}{Q(p)}; \quad (3)$$

$$Q(p) = \gamma T_{M1} T_E T_y^2 p^4 + \gamma T_{M1} T_y^2 p^3 + \gamma (T_{M1} T_E + K_i (1 + K_P K_{II}) T_y^2) p^2 + \gamma T_{M1} p + K_i (1 + K_P K_{II}) \quad (4)$$

де  $Q(p)$  – характеристичний поліном ЕМС приводу;  $K = K_P K_{II} K_i$  – коефіцієнт передачі.

Для дослідження динаміки характеристичний поліном  $Q(p)$  (4) представимо в нормованій формі узагальнених показників процесів електромеханічної взаємодії [7, 9]:

$$K_B = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_E^2} = \frac{T_{M1} T_E}{K_i (1 + K_P K_{II}) T_y^2}; \quad \zeta_D = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_{M1}}{T_E K_i (1 + K_P K_{II})}}; \quad (5, 6)$$

$$\gamma = (J_1 + J_2)/J_1 = (T_{M1} + T_{M2})/T_{M1} = T_M / T_{M1}. \quad (7)$$

Введемо позначення:  $T_{M1}^* = \frac{T_{M1}}{K_i (1 + K_P K_{II})}$  – еквівалентна механічна стала часу в замкненій системі ЕП.

Тоді шляхом алгебраїчних перетворень (4) отримаємо характеристичний поліном

$$Q(p) = [K_i (1 + K_P K_{II})] (\gamma T_{M1}^* T_E T_y^2 p^4 + \gamma T_{M1}^* T_y^2 p^3 + \gamma (T_{M1}^* T_E + T_y^2) p^2 + \gamma T_{M1}^* p + 1) = 0. \quad (8)$$

Під електромагнітною сталою часу  $T_E$  у (8) вважаємо скориговану, відповідно заданого критерію оптимальності, сталу  $T_E^* = L_E^* / R_E^*$ , корекція якої здійснюється вибором елементів силового

ланцюга (трансформатор перетворювача, дросель, обмотка якоря двигуна) з необхідними активним опором  $R_E^*$  та індуктивністю  $L_E^*$  силового ланцюга.

Враховуючи прийняті показники (5), (6), (7), характеристичне рівняння  $Q(p)$  (4) у нормованій формі буде мати наступний вигляд:

$$Q(p) = \gamma K_B T_y^4 p^4 + 2\gamma \sqrt{K_B} \xi_D T_y^3 p^3 + \gamma(1 + K_B) T_y^2 p^2 + 2\gamma \sqrt{K_B} \xi_D T_y p + 1 = 0, \quad (9)$$

де  $K_B$  – коефіцієнт електромеханічної взаємодії;  $\xi_D$  – коефіцієнт демпфірування електродвигуна.

Граничний ступінь демпфуючої дії ЕП (максимум) досягається у разі тотожності процесів в електромагнітній і механічній підсистемах за дотримання умов [9]

$$K_B = 1/\gamma; \quad (10)$$

$$\xi_D = \sqrt{(\gamma - 1)/\gamma}. \quad (11)$$

Тотожність процесів у даному випадку характеризує те, що процеси в механічній та електромагнітній підсистемах здійснюють коливання однієї частоти та однакового загасання, а саме відбуваються з однаковою рівнозначною відтворюваністю вхідних впливів.

Характеристичне рівняння четвертого порядку в нормованій формі (9) за дотримання умов (10) та (11) описує вільний рух ЕМС у вигляді двох взаємодіючих тотожних підсистем, властивості кожної з яких у динаміці визначаються характеристичними рівняннями коливальних ланок (другого порядку)

$$Q(p) = (T_y^2 p^2 + \sqrt{\gamma - 1} T_y p + 1) \times (T_y^2 p^2 + \sqrt{\gamma - 1} T_y p + 1) = 0. \quad (12)$$

Подібна форма представлення (12) дає змогу визначити показники процесів ЕМС у граничному випадку на підставі аналізу коренів  $p_{12} = p_{34} = -\alpha \pm j\beta$  характеристичного рівняння підсистем як типових коливальних ланок [7, 10, 11]

$$\xi_E = \xi_M = \xi_0 = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} = \frac{1}{2} \sqrt{\gamma - 1}; \quad \Omega_E = \Omega_M = \Omega_0 = \beta = \Omega_{12} \sqrt{1 - \xi_0^2} = \frac{\Omega_{12} \sqrt{5 - \gamma}}{2}, \quad (13, 14)$$

де  $\xi_E$  – коефіцієнт демпфірування електромагнітної підсистеми;  $\xi_M$  – коефіцієнт демпфірування механічної підсистеми;  $\xi_0$  – коефіцієнт демпфірування в граничному випадку;  $\Omega_E$  – частота коливань електромагнітної підсистеми;  $\Omega_M$  – частота коливань механічної підсистеми;  $\Omega_0$  – частота коливань у граничному випадку.

Реалізація процесів в ЕМС можлива шляхом вибору оптимальних параметрів, що досягаються через різні способи корекції [6, 12]. Оскільки передавальна функція (2) не має нулів (коренів чисельника), то корені характеристичного рівняння (9) є прямою оцінкою якості процесів регулювання швидкості та струму.

Для оцінки можливих перевантажень керованого перетворювача за струмом максимальне значення у разі електромеханічного демпфірування для комплексно-сполучених коренів описується виразом

$$\left. \begin{aligned} i_{max} &= 1 + 2e^{\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} && \text{для} && 1,04 < \gamma < 2,44; 0 < \xi < 0,707 \\ i_{max} &= 1 + e^{\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} && \text{для} && 2,44 < \gamma < 5,0; 0,707 < \xi < 1,0 \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

час досягнення першого максимуму

$$\tau_{max} = \frac{\pi}{\Omega_{12} \sqrt{1 - \xi^2}} = \frac{2\pi}{\Omega_{12} \sqrt{5 - \gamma}}, \quad (16)$$

де  $\xi = \xi_0$  – граничне демпфірування згідно з (13);  $\Omega_{12}$  – кутова частота коливань двомасової ЕМС.

Вирази (15) та (16) отримано на основі аналізу коренів характеристичного рівняння (12), до складу якого входять типові коливальні ланки (другого порядку) [12], з розрахункових формул перегулювання для комплексно-сполучених коренів у межах недодемпованого процесу для  $0 < \xi < 0,707$ , що відповідає варіації коефіцієнта співвідношення інерційних мас  $1,04 < \gamma < 2,44$  та у межах передемпованого процесу  $0,707 < \xi < 1,0$ , що відповідає варіації коефіцієнта співвідношення інерційних мас  $2,44 < \gamma < 5,0$ .

Кількісні оцінки динамічних показників вихідних координат перетворювача для різних співвідношень параметрів замкненої системи для реальних коефіцієнтів розподілу інерційних мас  $\gamma$  ЕМС для одиничного ступеневого впливу за навантаженням показані для відносної форми параметрів ( $m$ ,  $\gamma$  та  $\xi$  – представлені у відносній формі;  $i_{max}$ ,  $\Delta e$  – віднесено до базових (номінальних) значень струму та ЕРС відповідно) у таблиці.

Аналіз чисельних значень максимумів струму показує, що забезпечити демпфірування пружних коливань для заданого коефіцієнта розподілу інерційних мас  $\gamma$  в екстремальному випадку для коефіцієнта  $\xi$  (13) можливо за коливального характеру струму керованого перетворювача із значенням часу максимумів, які визначаються залежністю (16). Природно, що необхідна взаємодія електромагнітної і механічної підсистем досягається коливаннями струму та у випадку підвищення перерегулювання струму.

Якщо ЕП має керований перетворювач із досить високим рівнем обмеження максимальної напруги, то необхідні процеси демпфірування пружних коливань можливі внаслідок «форсування» електрорушійної сили.

Для практичних цілей оцінити перевищення ЕРС безінерційного керованого перетворювача можна зі структурної схеми рис. 1 з урахуванням передавальної функції (3) або за спрощеною формулою [13], яку у відносній формі представлення параметрів можна записати у вигляді

$$\Delta e = e_{II} - e_D = e_{d0} - e_D \approx T_E^* \frac{1}{K_i} \left( \frac{di}{dt} \right)_{max}, \quad (17)$$

де  $e_{d0}$  – ЕРС перетворювача, коли кут регулювання дорівнює 0 рад;  $(di/dt)_{max}$  – швидкість наростання струму ( $I_H/c$ ), яка обчислюється на основі (15), (16) та для конкретних значень може бути обчислена згідно зі значенням у таблиці.

№ з/п	Співвідношення параметрів $m = \gamma T_{MI}^* / T_E^*$	Коефіцієнт розподілу інерційних мас $\gamma$	Коефіцієнт демпфірування (граничний) $\xi$	Максимальне значення струму $i_{max}$	Запас за ЕРС $\Delta e$
1	0,16	1,04	0,1	2,458	0,54171
2	0,5	1,125	$\sqrt{2}/8$	2,136	0,48899
3	1,0	1,25	1/4	1,889	0,44684
4	2,0	1,5	$\sqrt{2}/4$	1,618	0,39759
5	3,0	1,75	$\sqrt{3}/4$	1,442	0,36617
6	4,0	2,0	1/2	1,1325	0,34307
7	5,0	2,25	$\sqrt{5}/4$	1,24	0,32488
8	6,0	2,5	$\sqrt{6}/4$	1,175	0,30992
9	8,0	3,0	$\sqrt{2}/2$	1,086	0,28633

### Висновки.

У результаті досліджень аналітично отримано кількісні результати для різних співвідношень параметрів замкненої ЕМС, згідно з якими визначено, що реалізація демпфуючої дії ЕП вимагає обов'язкової оцінки динамічних можливостей керованого перетворювача, а електромеханічне гасіння пружних коливань можливо за певних значень коефіцієнтів електромеханічної взаємодії  $K_B$  (10) і відносного демпфірування  $\xi_D$  (11). При цьому екстремум демпфуючого дії ЕП  $\xi_0$  визначається коефіцієнтом розподілу інерційних мас  $\gamma$  (13) і близькістю парціальних частот ЕМС (14). Таким чином, вибір керованого перетворювача ЕП необхідно здійснювати з урахуванням максимуму перевантаження за струмом (15) і часу досягнення цього максимуму (16), що визначає можливість реалізації динамічного гасіння пружних коливань в ЕП у випадку форсування процесів із додатковим запасом за ЕРС (17).

Отримані результати аналізу можуть бути використані у процесі теоретичних досліджень динамічних показників керованих перетворювачів комплектних ЕП за активного демпфірування пружних коливань ЕП і в практичній діяльності під час вибору параметрів обмежень за струмом та електро-рушійною силою.

*Робота виконана в рамках державної теми кафедри "Електромеханічні системи автоматизації" Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ) "Розробка та дослідження електронних та електромеханічних систем перетворення електричної енергії з використанням сучасних цифрових засобів автоматизації".*

1. Ключев В. И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. М.: Энергия, 1971. 320 с.
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. Pp.1193–1206.
3. 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. Pp. 18–21.
4. Pyatibratov G.Ya. On the Use of Electromechanical Systems for Limiting Dynamic Loads in Spring Mechanisms. *Russian Electrical Engineering*. 2018. Vol. 89. Issue 1. Pp. 36–41.
5. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 288 с.
6. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
7. Задорожний Н.А., Задорожня И.Н. Анализ и синтез электромеханических систем управления приводом машин с упругими механическими связями. Краматорск: ДГМА, 2010. 192 с.
8. Задорожний Н.А., Задорожня И.Н. О математических моделях тиристорного преобразователя электроприводов с упругими механическими связями. *Технічна електродинаміка*. Темат. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». 2011. Ч. 2. С. 206–209.
9. Задорожний Н.А. Обобщенные требования к конструированию механических передач с упругими связями. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2006. № 66. С. 27–29.
10. Задорожний Н.А., Задорожня И.Н. Взаимосвязи и оптимизация параметров двухмассовых электромеханических систем. Краматорск: ДГМА, 2015. 202 с.
11. Задорожня И.Н., Задорожний Н.А. Синтез электромеханической системы предельной степени устойчивости и минимальной колебательности упругой механической подсистемы. *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. 2017. № 27 (1249). С. 150–155.
12. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. М.: Машиностроение, 1978. 736 с.
13. Загальский Л.Н., Зильберлат М.Э. Частотный анализ автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1968. 112 с.

УДК 621.313.1

## **АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ДЕМПФИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ**

**И.Н. Задорожня\***, канд.техн.наук, **Н.А. Задорожний\*\***, канд.техн.наук  
Донбасская государственная машиностроительная академия,  
ул. Академическая, 72, Краматорск, 84313, Украина.  
E-mail: [zadorozhnyaya\\_in@ukr.net](mailto:zadorozhnyaya_in@ukr.net)

*В работе рассмотрена актуальная задача учета параметров силовой части электроприводов технологических машин для совершенствования их динамических качеств, что обеспечит заданную точность движения рабочих механизмов еще на этапе проектирования. Показано, что при выборе параметров силовой части электропривода на этапе синтеза параметров системы автоматического управления необходима оценка процессов электромеханического преобразования энергии упругих механических колебаний. Акцентируется необходимость оценки динамических показателей координат преобразователя – тока и отклонения ЭДС при предельной степени демпфирования упругих колебаний. Это является важным для определения условий, способствующих реализации максимума демпфирующего действия электропривода, что позволит ограничить динамические нагрузки и оптимизировать переходные процессы. Библиографический список: 13, рис. 1, табл. 1.*

**Ключевые слова:** электромеханическая система, электропривод, тиристорный преобразователь, демпфирование.

# ANALYSIS OF QUALITY INDICATORS INTO THE PROCESS OF ENERGY TRANSFORMATION DURING DAMPING VIBRATIONS OF ELASTIC MECHANICAL TRANSMISSION BY THE DRIVE

**I.N. Zadorozhniaia, N.A. Zadorozhnii**  
Donbass state engineering academy,  
Akademicheskaiia str., 72, Kramatorsk, 84313, Ukraine.  
E-mail: [zadorozhnyava\\_in@ukr.net](mailto:zadorozhnyava_in@ukr.net)

*The decision of actual task of taking into account the parameters of the power part of electric drives of technological machines for improving their dynamic qualities is presented at the design stage, which will ensure the specified accuracy of the movement of working mechanisms. It is shown that when choosing the power part of the electric drive to prepare for the synthesis stages of the control system parameters, it is necessary to evaluate the processes of electromechanical energy conversion of elastic mechanical oscillations, which contributes to the maximum of the damping action of the electric drive, and will allow limiting dynamic loads in order to optimize the transient processes. References 13, figure 1, table 1.*

**Key words:** drive, electromechanical system, thyristor converter, damping, oscillations.

1. Kliuchev V.I. Limiting the dynamic loads of the drive. Moskva: Energiia, 1971. 320 p. (Rus)
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. Pp. 1193–1206.
3. 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. Pp. 18–21.
4. Pyatibratov G.Ya. On the Use of Electromechanical Systems for Limiting Dynamic Loads in Spring Mechanisms. *Russian Electrical Engineering*. 2018. Vol. 89. Issue 1. Pp. 36–41.
5. Bortsov Iu.A., Sokolovskii G.G. Automated electric drive with elastic connections. Sankt Peterburg: Energoatomizdat, 1992. 288 p. (Rus)
6. Kliuchev V.I. Theory of the electric drive. Moskva: Energoatomizdat, 2001. 704 p. (Rus)
7. Zadorozhnii N.A., Zadorozhniaia I.N. Analysis and synthesis of electromechanical drive control systems of machines with elastic mechanical connections. Kramatorsk: DGMA, 2010. 192 p. (Rus)
8. Zadorozhnii N.A., Zadorozhniaia I.N. About mathematical models of thyristor converter of electric drives with elastic mechanical connections. *Tekhnichna Elektrodynamika*. Tematychnyi vypusk Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist. 2011. Part 2. Pp. 206–209. (Rus)
9. Zadorozhnii N.A. Generalized requirements for the design of mechanical gears with elastic connections. *Electrical engineering and electrical equipment*. 2006. No 66. Pp. 27–29. (Rus)
10. Zadorozhnii N.A., Zadorozhniaia I.N. Interconnections and optimization of parameters for two-mass electro-mechanical systems. Kramatorsk: DGMA, 2015. 202 p. (Rus)
11. Zadorozhniaia I.N., Zadorozhnii N.A. 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*. 2017. No 27 (1249). Pp. 150–155. (Rus)
12. Ivashenko N.N. Automatic regulation. Moskva: Mashinostroenie, 1978. 736 p. (Rus)
13. Zagalskiy L.N., Zilberblat M.E. Frequency analysis of an automated electric drive. Moskva: Energiia, 1968. 112 p. (Rus)

Надійшла 22.02.2019  
Остаточний варіант 04.10.2019