

УДК 621.771.06:233.2

Задорожная И. Н., канд. техн. наук,

Задорожный Н. А., канд. техн. наук

ВЗАИМОСВЯЗИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПРЕДЕЛЬНОЙ СТЕПЕНЬЮ ДЕМПФИРОВАНИЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ

Аннотация. Представлено исследование проблематики выбора оптимальных параметров электромеханических систем для обеспечения минимальной колебательности переходных процессов. Показано, что параметры, характеризующие той или иной тип электропривода с максимальным демпфированием и минимальной динамической нагрузкой, определяются закономерностями электромеханической взаимосвязи.

Ключевые слова: электромеханическая система, упругие колебания, демпфирование, двухмассовая система, предельная степень, взаимодействие, оптимизация, синтез

Задорожня І. М., канд. техн. наук,

Задорожній М. О., канд. техн. наук

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКИ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ГРАНИЧНИМ СТУПЕНЕМ ДЕМПФІРУВАННЯ ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ

Анотація. Представлено дослідження проблематики вибору оптимальних параметрів електро механічних систем для забезпечення мінімальної коливальності перехідних процесів. Показано, що параметри, які характеризують тій або інший тип електроприводу з максимальним демпфуванням і мінімальним динамічним навантаженням, визначаються закономірностями електро механічного взаємозв'язку.

Ключові слова: електро механічна система, пружні коливання, демпфування, двохмасова система, гранична міра, взаємозв'язок, оптимізація, синтез

Zadorozhnyaya I., PhD.,

Zadorozhniy N., PhD

THE INTERCOMMUNICATIONS AND OPTIMIZATION OF PARAMETERS IN ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH MAXIMUM DEGREE OF DAMPING OF RESILIENT VIBRATIONS

Abstract. The article deals with choice of optimum parameters of the electromechanical systems for providing of minimum shake of transients. It is shown that the parameters of one or another type of electromechanical with the maximal damping and minimum dynamic loading are determined conformities to law of electromechanical intercommunication.

Keywords: electromechanical system, resilient vibrations, damping, two-mass system, maximum degree, intercommunication, optimization, synthesis

Введение. Электропривод является основным структурным элементом автоматизации современных технологических машин. В качестве локальных систем автоматизации технологических машин используется современный регулируемый комплектный электропривод, в котором интегрированы все технические достижения электромашиностроения, силовой преобразовательной техники, средств систем управления и вычислительной техники.

Практическая реализация заявленных динамических возможностей современных компонентов нового уровня качества управления и регулирования оказалась проблематичной из-за взаимосвязи и взаимного влияния на динамику электро-

механической системы (ЭМС) особенностей электромагнитной подсистемы и упругих механических звеньев кинематических передач.

Цель исследования. В процессе проектирования электроприводов нового поколения опытный конструктор должен уметь выбирать параметры и их сочетания таким образом, чтобы в ЭМС с упругими связями обеспечивались требуемые технологией показатели и минимальная колебательность переходных процессов [1].

Решение такой задачи возможно на основании знания взаимосвязи и соотношения параметров ЭМС с оценкой демпфирующего действия электропривода.

Определим взаимосвязи и соотношения путем анализа закономерностей электро-механического взаимодействия [2] при использовании обобщенных показателей.

Материалы исследования. Компактная и физически прозрачная форма нормирования характеристического уравнения электро-механической системы, применяемая авторами при исследованиях [3, 4], позволяет при минимальном числе обобщенных показателей K_B , ξ_D , γ упростить анализ динамических свойств. Практически ценным следует отметить и то, что обобщенные показатели выражаются через конкретные (частные) значения параметров исходной структурной схемы ЭМС [5]:

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

На основании (1) для двухмассовых ЭМС с упругой механической подсистемой установлена связь демпфирующего действия электропривода с параметрами ЭМС. Такая форма показателей (1) позволяет произвести в относительных единицах по виду корней характеристического уравнения [6]

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

обобщенный анализ демпфирующего действия широкого класса электроприводов.

В зависимости от величин K_B , ξ_D , γ формируется различная комплектация корней характеристического уравнения (2), которая в конечном итоге и определяет динамические свойства ЭМС с соответствующими значениями параметров (постоянных времени T_{Σ} , T_{M1}).

При анализе свойств ЭМС исследованиями [7] установлено, что в теоретически существующем интервале варьирования обобщенных показателей K_B , ξ_D для заданного γ имеется одно экстремальное значение функции степени демпфирующего

действия привода, которая характеризуется логарифмическим декрементом затухания

$$\lambda = 2\pi \left| \frac{\alpha}{\Omega_{P.O}} \right| = \lambda_{\text{ОПТ}} = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma-1}{5-\gamma}}. \quad (3)$$

Экстремальное значение λ является предельным для ЭМС с конкретным значением $\gamma = \text{const}$, так как проявляется при электро-механическом взаимодействии электро-магнитной (ЭП) и механической подсистем (МП) с полным отбором и одновременным преобразованием энергии с минимальной длительностью процессов. При подстановке в общем виде условий предельной степени электро-механического взаимодействия

$$\begin{cases} K_B = K_{B,\text{ОПТ}} = \frac{1}{\gamma}, \\ \xi_D = \xi_{D,\text{ОПТ}} = \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma}}. \end{cases} \quad (4)$$

в соотношения взаимосвязи параметров парциальных МП и ЭП получаем зависимости для определения оптимальных постоянных времени ЭП двухмассовой ЭМС:

$$\begin{cases} T_{\Sigma,\text{ОПТ}} = \frac{1}{2\sqrt{\gamma-1}} T_y = \frac{1}{2\sqrt{\gamma-1}\Omega_{12}}, \\ T_{M1,\text{ОПТ}} = \frac{2\sqrt{\gamma-1}}{\gamma} T_y = \frac{2\sqrt{\gamma-1}}{\gamma} \cdot \frac{1}{\Omega_{12}}. \end{cases} \quad (5)$$

Для количественной оценки величин оптимальных параметров было произведено сравнение соотношений параметров ЭМС с упругой связью и ЭМС при идеализации механической передачи абсолютно «жестким» звеном и произведен расчет соотношения параметров – электро-механической и электро-магнитной постоянных времени, которые обеспечивают реализацию равных величин коэффициента демпфирования в рассматриваемых ЭМС.

Собственные частоты колебаний ЭМС для экстремального случая, при оптимальном K_B определяются параметрами

$$(T_{M1,\text{ОПТ}} \cdot T_{\Sigma,\text{ОПТ}})_y = \frac{1}{\gamma} \cdot T_y^2. \quad (6)$$

Коэффициент демпфирования при предельной степени в зависимости от γ может иметь значение

$$\xi_0 = \xi_{D,\text{ОПТ}} = \frac{1}{2} \sqrt{\gamma-1}, \quad (7)$$

При этом соотношение параметров отдельных (парциальных) подсистем при предельном демпфировании в ЭМС, как определено (5), имеет вид

$$\left(\frac{T_{M1}^*}{T_{\Theta}^*}\right)_y = 4 \cdot \frac{\gamma - 1}{\gamma}. \quad (8)$$

При сравнении соотношений параметров ЭМС с упругой связью необходимо учесть суммарный приведенный момент инерции (и соответственно T_M), то есть

$$m = \left(\frac{\gamma T_{M1}}{T_{\Theta}}\right)_y = \left(\frac{\gamma T_{M1}^*}{T_{\Theta}^*}\right)_y = 4 \cdot (\gamma - 1). \quad (9)$$

Для ЭМС при допущении абсолютной «жесткости» механической передачи соотношение параметров

$$n = \left(\frac{T_M}{T_{\Theta}}\right)_ж = \left(\frac{\gamma T_{M1}}{T_{\Theta}}\right)_ж. \quad (10)$$

определяет коэффициент демпфирования

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{T_M}{T_{\Theta}}\right)_ж}, \quad (11)$$

где T_M – электромеханическая постоянная времени привода с суммарным приведенным моментом инерции; T_{Θ} – электромагнитная постоянная времени (фактическая).

Анализ результатов расчета позволил установить, что при одинаковых значениях соотношения параметров T_M/T_{Θ} в ЭМС с жесткой и упругой связью, реализовать предельное демпфирование упругих колебаний удастся при более высокой колебательности: в ЭМС с жесткой связью и $n = 1,0$ коэффициент демпфирования $\xi = 0,5$, а для ЭМС с упругим звеном $m = 1,0$ можно обеспечить при $\gamma = 1,25$ и $\xi = 0,25$. Чтобы обеспечить демпфирование в ЭМС как для абсолютно жесткой передачи с коэффициентом $\xi_ж = 0,5$ при $n = 1,0$, в ЭМС с упругим звеном необходимо выбрать соотношения $m = 4,0$ и $\gamma = 2,0$, так как $\xi_y = (\sqrt{\gamma} - 1)/2$.

На рис. 1 приведены графики переходных процессов по координате $M_y(t)$ в относительных единицах при единичном ступенчатом возмущении по моменту нагрузки M_c для характерных значений коэффициентов демпфирования при реализации в ЭМС предельной степени демпфирования:

– график 1 – $\gamma = 1,16$ и $\xi = 0,2$;

– график 2 – $\gamma = 1,5$ и $\xi = \sqrt{2}/4$;

– график 3 – $\gamma = 3,0$ и $\xi = \sqrt{2}/2$;

– график 4 – $\gamma = 5,0$ и $\xi = 1,0$.

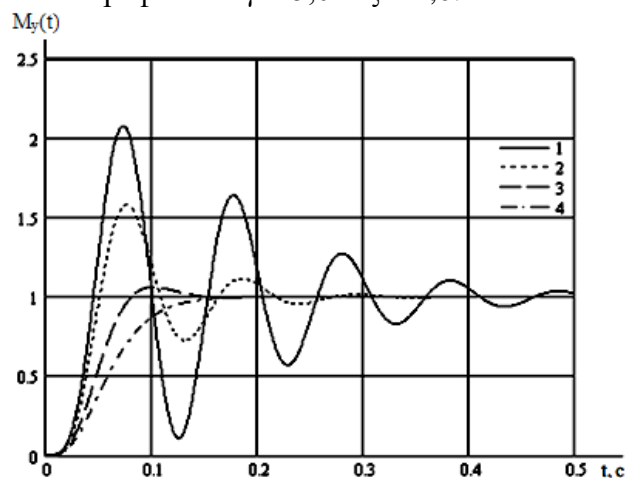


Рис. 1. Графики переходных процессов при реализации в ЭМС предельной степени демпфирования в о.е.

Заключение. Из анализа результатов расчета и полученных зависимостей можно сделать выводы о динамических свойствах двухмассовых ЭМС с упругой связью:

– основные параметры ЭМС – $T_{M1}, T_{\Theta}, \gamma, T_y (\Omega_{12})$, характеризующие тот или иной вариант привода с минимальной колебательностью и минимальной динамической нагрузкой, находятся во взаимосвязи, определяемой коэффициентом распределения инерционных масс γ , поэтому при оптимизации ЭМС по критерию минимума колебательности основных координат параметры нельзя выбирать «наудачу», произвольно «назначить» или задать, как того требует, например, оптимизация систем по коэффициентам стандартного распределения полюсов [8-10] характеристического полинома;

– зависимости (1) отвечают требованиям системного анализа, так как процедура синтеза параметров ЭМС с предельной степенью взаимодействия подсистем при соблюдении условий (4) предоставляет возможность влиять на усиление демпфирующего действия привода конструктивными, механическими и электротехническими способами, то есть соотношения взаимосвязи параметров (5) позволяют при проектировании использовать варианты

оптимизации, регламентируемые параметрами левой и правой частей от знака равенства соотношений оптимизации;

– при несоответствии параметров в конкретной разомкнутой ЭМС оптимальным зависимостям (5) необходимо их скорректировать соответствующими способами или, если это позволяет решение задачи, реализовать оптимальные соотношения путем охвата регулируемых координат жесткими или гибкими обратными связями системы автоматического управления;

– предельная степень демпфирования в ЭМС достигается при полной тождественности процессов в подсистемах, собственные частоты системы являются кратными и равны парциальным, и действие сил упругой связи компенсируется силами инерционной связи, таким образом, в двухмассовой ЭМС с упругой связью при соблюдении условий предельной степени взаимодействия (2) и с оптимальными параметрами эффект двухмассовости не проявляется, и в системе воспроизводятся динамические процессы одной частоты, как в эквивалентно жесткой.

Список использованной литературы

1 Ключев В. И. Теория электропривода: учебник / В. И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

2 Задорожний, Н. А. Обобщенные оценки взаимосвязи упругих электромеханических колебаний в приводах грузоподъемных машин / Н. А. Задорожний, Н. Г. Марилов // Проблемы подъемно-транспортной техники. Печатные материалы научно-технической конференции с международным участием. – Алушта, 1993. – Секция 3. – С. 62 – 65.

3 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.

4 Дрыга, А. И. Исследование электромеханических систем управления виброкомплексом / А. И. Дрыга, Н. А. Задорож-

ний // Тяжелое машиностроение. – М.: Машиностроение. – 1993. – № 9. – С. 10–14.

5 Земляков В.Д., Задорожний Н.А. О демпфировании электроприводом упругих электромеханических колебаний // Изв. вузов. Электромеханика. – 1985. – С. 99-92.

6 Задорожний, Н. А. Анализ демпфирующего действия электропривода с упругими механическими связями при астатическом регулировании / Н. А. Задорожний, А. Н. Беш, И. Н. Задорожня // *Електротехнічні та комп'ютерні системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика»* – Київ: Техніка. – 2011. – Вип. 03(79). – С. 101–104.

7 Задорожний Н. А. Анализ и синтез электромеханических систем управления приводом машин с упругими механическими связями: учебное пособие по дисциплине «Теория электропривода» для студентов специальности «ЭСА» / Н. А. Задорожний, И. Н. Задорожня. – Краматорск: ДГМА, 2010. – 192 с

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

9 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.

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

Получено 05.05.2016

References

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

2. Zadorozhniy N. and N. Marilov *Obobshchyonnyie otsenki vzaimosvyazi uprugih kolebaniy v privodah gruzopodyomnyih mashin* [Generalized assess the relationship of elastic vibrations in drives hoisting machines]. (1993)

Pечатnyie materialyi NTK «Problemyi podymno-transportnoy tekhniki», Alushta, Ukraine, pp. 62–65 (In Russian).

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

4. Dryiga A. I. Issledovanie elektromekhanicheskikh sistem upravleniya vibrokompleksami [Research of electromechanics control system by vibrocomplexes] / A. I. Dryiga, N. A. Zadorozhniy // *Tyazheloe mashinostroenie*. – M. : Mashinostroenie. – 1993. – Vol. 9. – pp. 10–14. (In Russian).

5. Zemlyakov V.D., Zadorozhniy 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.

6. Zadorozhniy N. A. Analiz dempfiruyushchego deystviya elektroprivoda s uprugimi mekhanicheskimi svyazyami pri astaticheskom regulirovanii [Analysis of antivibration action of electromechanic with resilient mechanical connections at the astatic adjusting] / N. A. Zadorozhniy, A. N. Besh, I. N. Zadorozhnyaya // *Elektrotekhnichni ta komp'yuterni sistemi. Tematichniy vipusk «Problemi avtomatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika»* – Kyiv: Tehnika. – 03(79). 2011. – pp.101–104. Print (In Russian).

7. Zadorozhniy N.A. Analiz i sintez elektromekhanicheskikh sistem upravleniya privodom mashin s uprugimi mekhanicheskimi svyazyami [Analysis and synthesis of electromechanical control system by the drive of machines with resilient mechanical connections]: uchebnoe posobie po distsipline «Teoriya elektroprivoda» dlya studentov spetsialnosti «ESA» / Zadorozhniy N.A., Zadorozhnyaya I.N. – Kramatorsk: DGMA, 2010. – 192 p (In Russian).

8. Kuzovkov, N. T. Modalnoe upravlenie i nablyudayushchie ustroystva [Modal management and looking after devices] /

N. T. Kuzovkov – M. : *Mashinostroenie*, 1976. Print (In Russian).

9. 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] // *Problemyi avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika: [Trudyi konferentsii]*. – Harkov: Osnova, 1997. – pp. 104 – 109 (In Russian)/

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



Задорожня
Инна Николаевна
к.т.н., доц.
доцент кафедры ЭСА
Донбасская государственная машиностроительная академия
84313 Краматорск,
ул. Шкадинова, 72
0951542300
zadorozhnyaya_in@ukr.net



Задорожний
Николай Алексеевич
к.т.н., доц.
доцент кафедры ЭСА
Донбасская государственная машиностроительная академия
84313 Краматорск,
ул. Шкадинова, 72
0660770779
bathot@mail.ru