

УДК 621.771.06:233.2

**ВЗАИМОСВЯЗИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С АКТИВНЫМ ПОДАВЛЕНИЕМ  
УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ**

**Н. А. Задорожний, И. Н. Задорожня**

Донбасская государственная машиностроительная академия  
ул. Шкадинова, 72, г. Краматорск, 84313, Украина. E-mail: 4nd@list.ru

Предложен метод синтеза с активным демпфированием упругих электромеханических колебаний, которое достигается выбором определенного соотношения динамических параметров. Параметры, в свою очередь, в электромеханических системах находятся во взаимосвязи, а предельная степень демпфирования колебаний зависит от коэффициента соотношения инерционных масс  $\gamma$ . Реализация расчетных соотношений при оптимизации основана на компенсации влияния упругих сил инерционными и может быть использована для настройки систем подчиненного и модального управления.

**Ключевые слова:** электромеханическая система, демпфирование, электропривод, взаимодействие.

**ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ  
СИСТЕМИ З АКТИВНИМ ГАСІННЯМ ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ**

**М. О. Задорожній, І. М. Задорожня**

Донбаська державна машинобудівна академія  
вул. Шкадінова, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна. E-mail: 4nd@list.ru

Запропоновано метод синтезу з активним демпфуванням пружних електромеханічних коливань, що забезпечується вибором відповідного співвідношення динамічних параметрів. Параметри, в свою чергу, в електромеханічних системах знаходяться у взаємозв'язку, а граничний ступінь демпфування коливань залежить від коефіцієнта співвідношення інерційних мас  $\gamma$ . Реалізація розрахункових співвідношень при оптимізації основана на компенсації впливу пружних сил інерційними та може бути використана для настроювання систем підлеглого та модального керування.

**Ключові слова:** електромеханічна система, демпфування, електропривод, взаємодія.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Расчетные статические и динамические показатели регулируемых электроприводов ограничиваются не только свойствами электродвигателя, управляемого преобразователя и элементной базой, но и в значительной степени параметрами упругих механических передач.

Отрицательный эффект влияния упругих механических связей проявляется в динамике при возбуждении колебаний с ростом уровня динамических нагрузок на электрическое и механическое оборудование электропривода. Упругие механические колебания приводят также к отклонению переходных процессов координат рабочих органов привода от требуемых технологическим процессом.

Электропривод при определенных условиях оказывает демпфирующее действие на колебания в упругой механической передаче, и фундаментальной задачей электропривода является ограничение динамических нагрузок в электромеханической системе [1].

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** В теории электропривода и практике проектирования технологических машин задачи демпфирования электромеханических колебаний рассматриваются со следующих позиций:

- интерпретация действия на электропривод возмущения по нагрузке в виде колебаний момента упругой механической подсистемы;
- усиление электромеханической связи при взаимодействии электромагнитной и механической подсистем.

Решение задач синтеза первого направления позволяет сформировать переходные процессы с заданными показателями динамики для координат

электромагнитной подсистемы как разомкнутой, так и замкнутой систем. Структурная схема электромеханической системы в обобщенном виде для задач данного направления приведена на рис. 1.

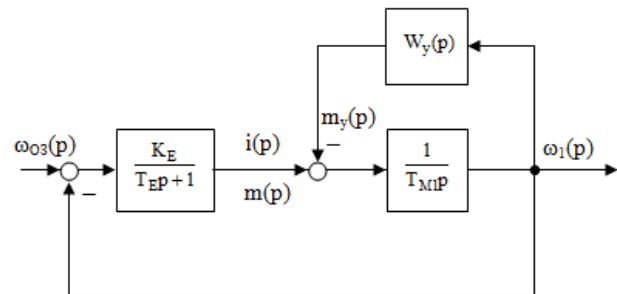


Рисунок 1 – Структурная схема электропривода при действии упругих колебаний

Передаточная функция

$$W_y(p) = \frac{T_{M2}p}{\gamma T_y^2 p^2 + 1} \tag{1}$$

характеризует приложенный к валу двигателя упругий момент  $m_y(p)$  – выходной координаты механической подсистемы. На структурной схеме в относительной форме параметров приняты обозначения:  $K_E = U_H / I_H R_E$  – коэффициент передачи электромагнитной подсистемы по моменту (току);  $T_E = L_E / R_E$  – электромагнитная постоянная времени;  $T_{M1} = J_1 \omega_H / M_H$ ,  $T_{M2} = J_2 \omega_H / M_H$  – механическая постоянная времени, соответственно, двигателя и механизма;  $\gamma = (J_1 + J_2) / J_1 = (T_{M1} + T_{M2}) / T_{M1}$  – коэффициент распределения инерционных масс двигателя и механизма;  $T_y = 1 / \Omega_{12}$  – постоянная времени упругих колебаний;

$\Omega_{12}$  – частота свободных колебаний двухмассовой системы.

Синтез электромеханических систем (ЭМС) в задачах второго направления основан на эффекте взаимодействия отдельных (парциальных) электромагнитной и упругой механической подсистем с отводом и преобразованием энергии упругих колебаний. Степень электромеханического взаимо-

действия подсистем определяется коэффициентом электромеханического взаимодействия  $K_B$  и скоростью преобразования энергии с коэффициентом демпфирования  $\xi_D$  [2].

Демпфирующее действие рассматривается при анализе характеристического уравнения ЭМС при представлении процессов взаимодействия парциальных подсистем структурной схемой (рис. 2).

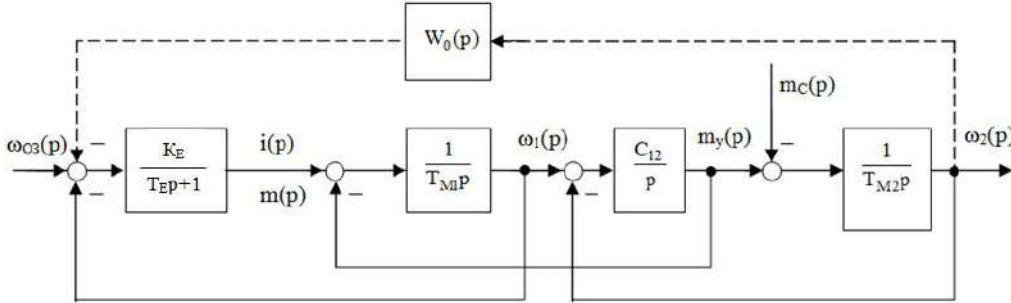


Рисунок 2 – Структурная схема электропривода при электромеханическом взаимодействии подсистем

Обобщенный анализ и синтез ЭМС значительно упрощается, если расчет процессов демпфирования упругих колебаний производится не для частных параметров исходной структурной схемы, а в нормированной форме [3] с показателями:

$$\left. \begin{aligned} K_B &= \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_E^2} = \frac{T_{M1} T_E}{K_E T_y^2} = \frac{T_{M1}^* T_E}{T_y^2}, \\ \xi_D &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_{M1}}{K_E T_E}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_{M1}^*}{T_E}}, \\ \gamma &= \frac{(T_{M1} + T_{M2})}{T_{M1}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $T_{M1}^* = T_{M1}/K_E$  – электромеханическая постоянная времени электродвигателя (электромагнитной подсистемы).

Характеристический полином ЭМС получен на основании структурной схемы (рис. 2) и имеет следующий вид:

$$Q_1(p) = \gamma T_{M1} T_E T_y^2 p^4 + \gamma T_{M1} T_y^2 p^3 + \gamma (T_{M1} T_E + K_E T_y^2) p^2 + \gamma T_{M1} p + K_E. \quad (3)$$

Характеристический полином (3) в форме показателей электромеханического взаимодействия (2) принимает вид:

$$Q_1(p) = \gamma K_B T_y^4 p^4 + 2\gamma \sqrt{K_B} \xi_D T_y^3 p^3 + \gamma (1 + K_B) T_y^2 p^2 + 2\gamma \sqrt{K_B} \xi_D T_y p + 1. \quad (4)$$

Демпфирующее действие электропривода оценивается по расположению корней характеристического уравнения  $Q(p) = 0$  на комплексной плоскости.

Предельная степень демпфирования достигается при условии полной тождественности процессов в электромагнитной и механической подсистемах, когда корни являются кратными, комплексно-сопряженными. Обобщенные показатели электромеханического взаимодействия для предельного случая (экстремум) – максимума демпфирующего

действия – определяются только коэффициентом распределения инерционных масс [2] и

$$\left. \begin{aligned} K_B^0 &= \frac{1}{\gamma}; \\ \xi_D^0 &= \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ЭМС с упругими связями в динамике при выполнении (5) имеет свойства эквивалентной одно-массовой системы с показателями свободной составляющей процессов электромеханического взаимодействия

$$\left. \begin{aligned} \xi_0 &= \frac{1}{2} \sqrt{\gamma - 1}; \\ \mu_0 &= \sqrt{\frac{5 - \gamma}{\gamma - 1}}; \\ \Omega_0 &= \frac{\sqrt{5 - \gamma}}{2\theta_0}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\xi_0$  – коэффициент демпфирования;  $\mu_0$  – колебательность;  $\Omega_0$  – частота колебаний.

Параметры оптимальной (по критерию минимума колебательности) ЭМС связаны соотношениями [3]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_{M1}}{K_E} &= 2\sqrt{K_B^0 \xi_D^0} T_y; \\ T_E &= \frac{\sqrt{K_B^0} T_y}{2\xi_D^0}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Выбором параметров ЭМС по соотношению (7) обеспечиваются процессы с компенсацией в динамике влияния упругих сил электромеханической системы силами инерционными. При практической реализации демпфирующих свойств электропривода важно иметь оценку степени демпфирования для оптимальной ЭМС и соотношения параметров в области реально существующих коэффициентов  $\gamma$ . С этой целью были рассчитаны соотношения параметров оптимальной ЭМС (5) с показателями эквивалентной «жесткой» (6) и физически одно-массовой системы. Результаты расчетов сведены в табл. 1, где

для характерных значений коэффициента демпфирования  $\xi$  ( $0 < \xi \leq 1,0$ ) приведены соотношения параметров электромагнитной подсистемы и полной

ЭМС одномассовой и двухмассовой систем соответственно.

Таблица 1 – Соотношения параметров одномассовой и двухмассовой ЭМС

№ п/п	Коэффициент демпфирования ЭМС $\xi$	Коэффициент распределения инерционных масс $\gamma$	Соотношение параметров электродвигателя, ЭМС и коэффициент демпфирования электромагнитной подсистемы					
			Одномассовая расчетная схема			Двухмассовая расчетная схема		
			$T_{M1}^*/T_E$	$\xi_{D0}$	$T_M^*/T_E$	$T_{M1}^*/T_E$	$\xi_D$	$T_M^*/T_E$
1	0,25	1,25	1/5	1/2√5	0,25	4/5	1/√5	1,0
2	√2/4	1,5	1/3	1/2√3	0,5	4/3	1/√3	2,0
3	0,5	2,0	1/2	√2/4	1,0	2,0	√2/2	4,0
4	√2/2	3,0	2/3	√2/2√3	2,0	8/3	√2/√3	8,0
5	1,0	5,0	4/5	1/√5	4,0	16/5	2/√5	16,0

Анализ результатов показывает, что предельная степень демпфирования для равных величин соотношения динамических параметров  $T_M^*/T_E$  достигается в двухмассовой системе за счет роста колебательности. Так, например, для  $T_M^*/T_E = \gamma T_{M1}^*/T_E = 2$  в эквивалентно «жесткой» ЭМС коэффициент демпфирования  $\xi = \sqrt{2}/4$ , а процессы в одномассовой ЭМС с  $T_M^*/T_E = 2$  имеют коэффициент демпфирования с критическим значением  $\xi = \sqrt{2}/2$ .

Из анализа табл. 1 также следует, что обеспечить предельное демпфирование в двухмассовой ЭМС с коэффициентом демпфирования  $\xi = \sqrt{2}/2$  можно выбором соотношения параметров  $T_M^*/T_E = 8$ . Максимум электромеханического взаимодействия процессов по условиям (5) возможен, если  $T_M^*/T_E = T_y^2$  при колебательном характере извлечения энергии из МП с коэффициентом демпфирования электромагнитной подсистемы  $\xi_D = \sqrt{(\gamma - 1)/\gamma}$ .

Метод оптимизации ЭМС на основе электромеханической совместимости процессов позволяет производить коррекцию соотношений параметров с целью активного подавления упругих колебаний. Максимум демпфирующей способности электропривода зависит в предельном случае только от коэффициента соотношения инерционных масс  $\gamma$ . Следовательно, если по требованиям технологического процесса или при действии ограничений на координаты в электромагнитной подсистеме показатели (6) реализовать затруднительно, то требуемое соотношение параметров  $T_M^*/T_E$  можно скорректировать [3]. Коррекция параметров ЭМС достигается как в рамках систем каскадного (подчиненного) регулирования или модального управления. При параллельной коррекции с введением производной по угловой скорости механизма  $\omega_2$  (пунктирная связь на структурной схеме рис. 2) ЭМС имеет характеристический полином:

$$Q_2(p) = \gamma T_{M1} T_E T_y^2 p^4 + \gamma T_{M1} T_y^2 p^3 + \gamma (T_{M1} T_E + K_E T_y^2) p^2 + (\gamma T_{M1} + K_E T_0) p + K_E. \quad (8)$$

При использовании формы нормирования (2) характеристический полином (8) принимает следующий вид:

$$Q_2(p) = \gamma K_B T_y^4 p^4 + 2\gamma \sqrt{K_B} \xi_D T_y^3 p^3 + \gamma (1 + K_B) T_y^2 p^2 + 2\gamma \sqrt{K_B} \xi_D (1 + \varphi_0) T_y p + 1, \quad (9)$$

где  $\varphi_0 = K_E T_0 / \gamma T_{M1}$  – коэффициент глубины обратной связи.

Предельная степень демпфирования в электроприводе с процессами компенсации влияния упругих сил (при тождественности процессов ЭП и МП) возможна, когда

$$\left. \begin{aligned} K_B &= \frac{1}{\gamma \cdot (1 + \varphi_0)^2}; \\ \xi_D &= \frac{1}{1 + \varphi_0} \sqrt{\frac{\gamma(1 + \varphi_0)^2 - 2(1 + \varphi_0) + 1}{\gamma}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Показатели затухания свободной составляющей переходного процесса в ЭМС:

$$\left. \begin{aligned} \xi_0 &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma(1 + \varphi_0)^2 - 2(1 + \varphi_0) + 1}{(1 + \varphi_0)}}; \\ \Omega_0 &= \frac{1}{2T_y} \sqrt{6(1 + \varphi_0) - 1 - \gamma(1 + \varphi_0)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Введением гибкой обратной связи по угловой скорости  $\omega_2$  в динамике обеспечиваются процессы как в эквивалентной одномассовой («жесткой») системе с эффектом увеличения коэффициента распределения инерционных масс  $\gamma$ . Например, при коэффициенте  $\varphi_0 = 1,0$  и  $\gamma = 1,25$  коэффициент демпфирования  $\xi_0 = 0,5$  ( $\Omega_0 = \sqrt{6}\Omega_{12}/2$ ), при  $\gamma = 1,75$  затухание колебаний происходит с  $\xi_0 = \sqrt{2}/2$  ( $\Omega_0 = \Omega_{12}$ ), а при  $\gamma = 2,75$  и  $\varphi_0 = 1,0$  в ЭМС упругие колебания полностью задемпфированы с  $\xi_0 = 1,0$  ( $\Omega_0 = 0$ ). В ЭМС без дополнительной обратной связи при предельном демпфировании такие показатели возможны только для  $\gamma = \gamma_1 = 2,0$ ,  $\gamma = \gamma_2 = 3,0$ ,  $\gamma = \gamma_3 = 5,0$  соответственно. Таким образом, при оптимизации параметров за счет дополнительных обратных связей (или в системе с модальным управлением [4]) добиваются требуемого соотношения параметров  $T_M^*/T_E$  с целью активного гашения упругих электромеханических колебаний.

Аналитические соотношения для характерных значений величин параметров ЭМС проверялись на математической модели. На рис. 3 приведены графики переходных процессов в ЭМС при ступенчатом воздействии  $m_c(t)$  для координаты  $m(t)$ : 1 – для  $\gamma = 2$  ( $\xi = 0,5$ ), 2 –  $\gamma_0 = 1,25$  ( $\xi_0 = 0,5$ ).

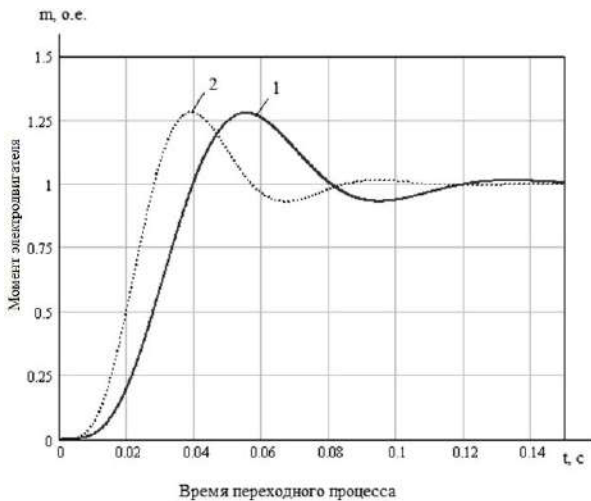


Рисунок 3 – Графики переходных процессов для соотношений параметров при  $\gamma$  и  $\gamma_0$

**ВЫВОДЫ.** Активное демпфирование упругих электромеханических колебаний достигается выбором определенного соотношения динамических параметров (7). Параметры ЭМС находятся во взаимосвязи, но предельная степень демпфирования колебаний зависит только лишь от коэффициента соотношения инерционных масс  $\gamma$  (6).

Соотношения параметров ЭМС при предельной степени демпфирования могут не отвечать требованиям к процессам или ограничениям со стороны оборудования, и их можно скорректировать. Коррекция требуемого соотношения параметров дости-

гается в динамике за счет эффекта косвенного изменения коэффициента инерционных масс  $\gamma$  (10).

Оптимальные соотношения параметров обеспечивают в ЭМС с упругими связями процессы, эквивалентные процессам в одномассовой системе электропривода с показателями (11).

Реализовать предлагаемые расчетные соотношения при оптимизации ЭМС с компенсацией влияния упругих сил инерционными возможно в системах подчиненного и модального управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключев В.И., Жильцов Л.В., Калашников Ю.П. Состояние и перспективы развития теории электропривода с упругими механическими связями // *Электричество*. – 1981. – № 7. – С. 29–32.
2. Задорожний Н.А., Задорожня И.Н. Оптимизация процессов преобразования энергии электро-механического взаимодействия в электроприводах с упругими связями // *Электроинформ*. Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Львов: Экоинформ, 2009. – С. 80–81.
3. Земляков В.Д., Задорожний Н.А. О демпфировании электроприводом упругих электромеханических колебаний // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 1985. – С. 99–92.
4. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. – СПб.: Энергоиздат, 1992. – 228 с.

INTERCOMMUNICATIONS AND OPTIMIZATION OF DYNAMIC PARAMETERS FOR ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH ACTIVE SUPPRESSION OF RESILIENT VIBRATIONS

N. Zadorozhny, I. Zadorozhnyaya

Donbass State Machine-Building Academy  
ul. Schkadinova, 72, Kramatorsk, 84313, Ukraine. E-mail: 4nd@list.ru

The method of the active resilient electromechanical oscillation damping is offers in the article. The decline of shake and influence of the negative loading is arrived at by the choice of certain correlation of dynamic parameters. Parameters in the electromechanical systems are closely associate and the maximum degree of the oscillation damping depends on the correlation coefficient of the inertia masses  $\gamma$ . An offer methodology of tuning can be used for tuning of the systems of inferior and modal management.

**Key words:** electromechanical system, damping, electrical drive, intercommunications.

REFERENCES

1. Klyutchev V.I., Zhiltsov L.V., Calashnikov Y.P. State and prospects of development of theory of electromechanical with resilient mechanical connections // *Electricity*. – 1981. – № 7. – С. 29–32. [in Russian]
2. Zadorozhnyj N., Zadorozhnyaya I. Optimization of processes of transformation of energy of electromechanical cooperation in electromechanical with resilient connections // *Electroinform*. – Lviv: Ekoinform, 2009. – С. 80–81. [in Russian]
3. Zemlyakov V.D., Zadorozhnyj N.A. About damping by the electromechanical of resilient electro-mechanical vibrations // *Electromechanics*. – 1985. – С. 88–92. [in Russian]
4. *Automatic electric drive with resilient connections* / Y.A. Bortsov, G.G. Sokolovkyj. – St.-Ptb.: Energizdat, 1992. – 228 с. [in Russian]

Стаття надійшла 10.07.2012.  
Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Садовим О.В.