

УДК 621.771.06 – 233.2

СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ С АКТИВНЫМ ПОДАВЛЕНИЕМ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ

Задорожний Н.А., к.т.н., доц.

Донбасская государственная машиностроительная академия

83902, г. Краматорск, ул. Школьная, 14, кв. 43

E-mail: bathot@mail.ru

В статті розглянуто методику синтезу автоматизованого електропривод модальної структури на основі принципу електромеханічної сумісності з гасінням пружних коливань. Методика синтезу дозволяє отримати задані динамічні властивості повної системи шляхом формування властивостей електричної підсистеми. Методика синтезу в загальному випадку передбачає реалізацію механічних, конструктивних і електротехнічних способів демпфірування пружних коливань.

Ключові слова: методика синтезу, модальна структура, принцип електромеханічної сумісності.

A method of synthesis of automated electrical drive of modal structure on the basis of principle of electromechanical compatibility with extinguishing resilient vibrations is considered in article. The method of synthesis allows to get set dynamic properties of the complete system by forming properties of electric subsystem. The method of synthesis in the general case supposes realization of mechanical, structural and electrical engineering methods of damping of resilient vibrations.

Key words: method of synthesis, modal structure, principle of electromechanical compatibility.

Введение. Основным структурным элементом автоматизации современных технологических машин является регулируемый электропривод, в котором интегрированы все технические достижения в области электромашиностроения, силовой преобразовательной электроники, средств систем управления и вычислительной техники.

Конструкции механических кинематических цепей приводов имеют тенденцию приближения рабочего органа к электродвигателю, что способствует их упрощению и увеличению жесткости передач при достижении высокой динамической точности обработки заданных движений.

Практически реализовать указанные направления совершенствования технического уровня электроприводов не удастся из-за проявления влияния упругих свойств механических передач, которое способствует развитию колебательных процессов с ростом динамических нагрузок на механическое и электрическое оборудование.

В теории электропривода указывается, что основной задачей электропривода является ограничение динамических нагрузок в электромеханической системе и обеспечение заданной точности движения её исполнительных органов. Решить такую задачу возможно на основании системного подхода путем рационального выбора структуры и параметров электромеханической системы при использовании демпфирующего эффекта электропривода.

Демпфирующий эффект электропривода возникает в результате электромеханической связи, и энергия упругих механических колебаний при определенных условиях рассеивается в диссипативных

элементах электродвигателя или возвращается в сеть [1].

Анализ предыдущих исследований. Анализ известных публикаций по практической оптимизации демпфирующего эффекта в электромеханических системах (ЭМС) свидетельствует, что вопросы синтеза систем при реализации принципов активного подавления упругих колебаний остаются актуальными. Так, для усиления демпфирующего эффекта структур электроприводов с системами подчиненного регулирования требуются дополнительные корректирующие обратные связи. Методика синтеза параметров регуляторов подчиненных контуров при учете упругой механической подсистемы становится громоздкой и аналитическое решение задачи демпфирования колебаний возможно только при упрощении структуры и существенных допущениях. Эффективного демпфирования упругих колебаний удастся добиться в электроприводах с системой подчиненного регулирования при предельном быстродействии контура регулирования тока и значениях коэффициента соотношения инерционных масс $2 \leq \gamma < 5$. Для других областей значений γ демпфирования колебаний электроприводом возможно добиться изменением настройки регуляторов, но при отклонении динамической точности и быстродействия от требуемых технологией (то есть оптимальных).

Высокую точность регулирования и требуемое быстродействие при эффективном демпфировании упругих колебаний обеспечивают электромеханические системы управления модальной структуры [2, 3].

Синтез электромеханических систем отмеченных структур основан на формировании цепей регуляторов или обратных связей для придания замкнутой системе требуемых динамических свойств по заранее выбранному распределению корней характеристического уравнения.

Цель работы. Синтез электромеханической системы управления привода модальной структуры для обеспечения демпфирования явления упругих колебаний как момента непосредственно в валах

механической подсистемы, так и в электрических цепях (тока двигателя).

Материал и результаты исследований. Электроприводы класса машин с существенным взаимным влиянием упругих механических звеньев в широком диапазоне собственных частот систем представляют двухмассовой упругой электромеханической системой с обратными связями по координатам первой и второй масс. Обобщенная структурная схема электромеханической системы привода постоянного тока приведена на рис. 1.

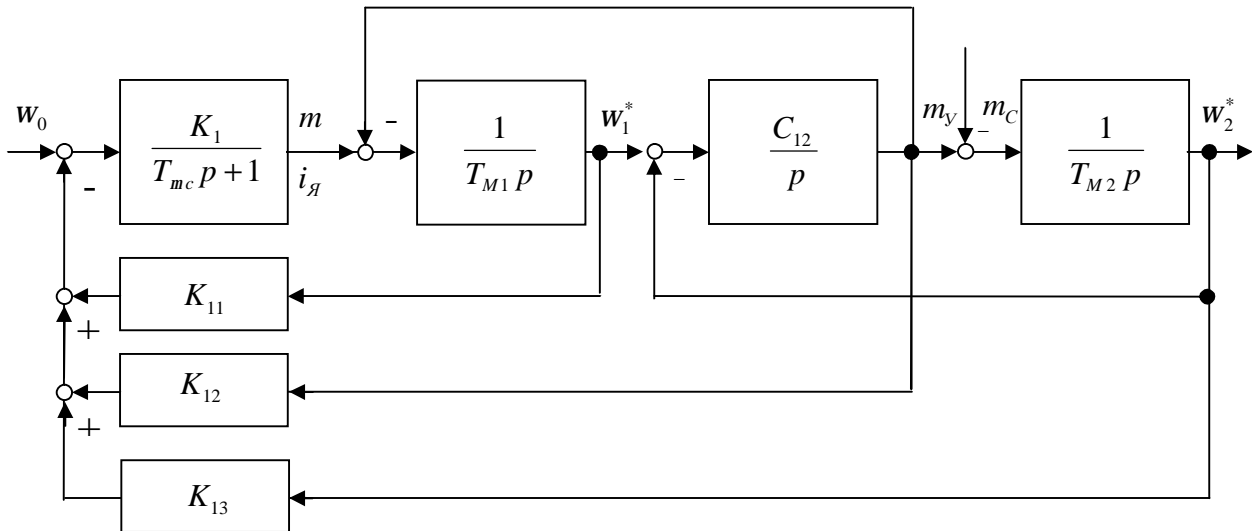


Рисунок 1 – Структурная схема электропривода с модельным регулятором

Решение задачи синтеза при общем подходе комплектации корней возможно приведением характеристического уравнения ЭМС к типовым нормированным уравнениям [4], что предполагает неоднозначность выбора параметров для обеспечения совместности уравнений. Приемы синтеза ЭМС по нормированным стандартным полиномам не позволяют также выявить механизм (физическую природу) влияния отдельных параметров на показатели затухания процессов в электрической (ЭП) и механической (МП) подсистемах.

Широко используемые частототные методы наглядны, но имеют косвенную связь с показателями затухания процессов и довольно громоздки.

Главным и общим недостатком предлагаемых в литературных источниках к практическому применению методов является, что они не учитывают взаимосвязи параметров ЭП и упругой МП, диктуемых наличием физической инерциальной связи [5], и невозможностью явно оценить влияния параметров отдельных подсистем на свойства полной ЭМС.

Простым и практически представительным методом анализа и синтеза ЭМС с упругими связями с целью активного гашения колебаний является метод, основанный на физических закономерностях взаимосвязи и взаимовлияния подсистем и распределением корней характеристического уравнения по принципу электромеханической совместимости [3].

Для основных координат электропривода считаются известными передаточные функции по возмущающему и управляющему воздействию:

$$\left. \begin{aligned} W_1(p) &= \frac{m_y(p)}{m_C(p)} = \frac{R(p)}{Q(p)}; \\ W_2(p) &= \frac{i_я(p)}{m_C(p)} = \frac{D(p)}{Q(p)}; \\ W_3(p) &= \frac{m_y(p)}{v_0(p)} = \frac{M(p)}{Q(p)}; \\ W_4(p) &= \frac{i_я(p)}{v_0(p)} = \frac{N(p)}{Q(p)}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} W_3(p) &= \frac{m_y(p)}{v_0(p)} = \frac{M(p)}{Q(p)}; \\ W_4(p) &= \frac{i_я(p)}{v_0(p)} = \frac{N(p)}{Q(p)}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $Q(p)$ – характеристическое уравнение вида:

$$Q(p) = \frac{\gamma T_{M1} T_{\mu C}}{\Omega_{I2}^2} p^4 + \frac{\gamma T_{M1}}{\Omega_{I2}^2} p^3 + \left[\gamma T_{M1} T_{\mu C} + K_1 K_{11} \frac{\gamma}{\Omega_{I2}^2} \right] p^2 + (\gamma T_{M1} + K_1 K_{12} \times \times T_{M2}) p + K_1 (K_{11} + K_{13}) = 0. \quad (3)$$

В характеристическом уравнении (3) приняты следующие обозначения: $\gamma = (T_{M1} + T_{M2}) / T_{M1}$ – коэффициент распределения инерционных масс двигателя и механизма; $T_{\mu C}$ – постоянная времени контура регулирования скорости; $K_1 = K_p \cdot K_{\Pi}$ – коэффициент передачи прямого канала, включающий регулятор и преобразователь; K_{11}, K_{12}, K_{13} – коэффициенты об-

ратных связей по скорости первой массы, упругому моменту, скорости второй массы; Ω_{12} - частота свободных (недемпфированных) колебаний.

Оценить демпфирующие свойства электромеханической системы достаточно по расположению корней характеристического уравнения. Оптимальное демпфирование упругих механических колебаний достигается при предельном электромеханическом взаимодействии подсистем, которое зависит от коэффициента взаимодействия:

$$K_B = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_{\Sigma}^2} = \frac{T_{M1} T_{\mu c} \Omega_{12}^2}{K_1 (K_{11} + K_{13})}, \quad (4)$$

и электромеханического демпфирования собственно активного элемента ЭП (двигателя):

$$\xi_d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_{M1}}{K_1 (K_{11} + K_{13}) T_{\mu c}}}. \quad (5)$$

Характеристическое уравнение (3) при записи его в форме показателей электромеханического взаимодействия (4), (5) будет иметь следующий вид:

$$\gamma K_B T_y^4 p^4 + 2\gamma \sqrt{K_B} \xi_d T_y^3 p^3 + \gamma (K_B + \frac{1}{\varepsilon}) \times \\ \times T_y^2 p^2 + 2\gamma \sqrt{K_B} (1 + \varphi_y) \xi_d T_y p + 1 = 0. \quad (6)$$

В характеристическом уравнении для удобства преобразований и расчета значений физических параметров ЭМС введены дополнительно обозначения:

$$K_1 \cdot (K_{11} + K_{13}) = K_1 \cdot K_{11} (1 + \frac{K_{13}}{K_{11}}) = K_1 \cdot K_{11} \cdot \varepsilon,$$

где $\varepsilon = 1 + K_{13}/K_{11}$ - коэффициент глубины обратной связи по скорости первой и второй масс; $\varphi_y = K_1 \cdot K_{12}(\gamma - 1)/\gamma$ - коэффициент веса обратной связи по упругому моменту. В зависимости от конкретных ЭМС, параметров и степени реализации демпфирующего эффекта коэффициенты обратной связи могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

В результате электромеханической связи в консервативную МП (без диссипации энергии) «вносится» из ЭП демпфирование, и колебательные процессы в подсистемах по характеру будут тождественными, но с различной огибающей, что соответствует представлению характеристического уравнения (6) в виде:

$$(T_y^2 p^2 + 2\xi_M T_y p + 1) \times \\ \times (T_y^2 p^2 + 2\xi_{\Sigma} T_y p + 1) = 0. \quad (7)$$

Предельная степень демпфирования упругих механических колебаний (момента в валах) и электрических цепях (тока в обмотке якоря) достигается при динамической равнозначности процессов в МП и ЭП, то есть когда $\xi_M = \xi_{\Sigma}$.

После преобразования характеристического уравнения (7) и сравнения его коэффициентов при соответствующих степенях с характеристическим уравнением в форме обобщенных показателей (6),

получаем условия оптимизации ЭМС по критерию предельного затухания колебаний:

$$K_B^* = \frac{1}{\gamma(1 + \varphi_y)^2}; \quad (8)$$

$$\xi_d^* = \frac{1}{(1 + \varphi_y)} \sqrt{\frac{\gamma(1 + \varphi_y)^2 - 2\varepsilon(1 + \varphi_y) + \varepsilon}{\gamma\varepsilon}}, \quad (9)$$

где K_B^* , ξ_d^* - оптимальные коэффициенты.

Для реального сочетания параметров при выполнении условий (8), (9) электропривод представляет собой активное демпфирующее звено, свойства которого реализуются при колебательных процессах в электрической подсистеме с $\xi_o < 1,0$ и $\varphi_y < 1,0$, $\varepsilon \neq 0$.

Предельная степень демпфирования в ЭМС достигается соответствующим выбором параметров по соотношениям, которые получены при совместном рассмотрении системы из выражений (4) и (5):

$$\frac{T_{M1}}{K_1 K_{11} (1 + \frac{K_{13}}{K_{11}})} = 2\sqrt{K_B^* \xi_d^*} \frac{1}{\Omega_{12}} = 2\sqrt{K_B^* \xi_d^*} T_y; \quad (10)$$

$$T_{\mu c} = \frac{\sqrt{K_B}}{2\xi_d \Omega_{12}} = \frac{\sqrt{K_B^*} T_y}{2\xi_d^*}. \quad (11)$$

При подстановке в (10), (11) условий оптимизации (8), (9) можно установить соотношения для расчета коэффициентов обратной связи и базовой величины постоянной времени, которая характеризует инерционность прямого канала регулирования:

$$K_1 \cdot K_{11} = \frac{\gamma(1 + \varphi_y)^2 \cdot T_{M1}}{2\sqrt{\varepsilon[\gamma(1 + \varphi_y)^2 - 2\varepsilon(1 + \varphi_y) + \varepsilon]} \cdot T_y}. \quad (12)$$

$$T_{\mu c} = \frac{\sqrt{\varepsilon} \cdot T_y}{2\sqrt{\gamma(1 + \varphi_y)^2 - 2\varepsilon(1 + \varphi_y) + \varepsilon}}. \quad (13)$$

Пользуясь соотношениями (12), (13), можно синтезировать параметры ЭМС по критерию минимума колебательности координат и расчет выполнить, придерживаясь следующего порядка:

- на основании известных параметров прототипа электропривода для двухмассовой расчетной схемы с коэффициентом соотношения инерционных масс $\gamma = \gamma_0$ принимается, что $\varphi_y < 1,0$. Динамические свойства элементной базы современных систем управления и допустимые границы коэффициента $1,1 < \gamma < 2,0$ для динамичных приводов машин с реальными параметрами объектов управления показывают, что коэффициент веса:

$$\varphi_y = K_1 \cdot K_{12}(\gamma - 1)/\gamma < 1,0.$$

Глубина обратной связи по скорости первой и второй масс для обеспечения условий устойчивости может корректироваться коэффициентом ε со значением близким к (как слева, так и справа) к единице;

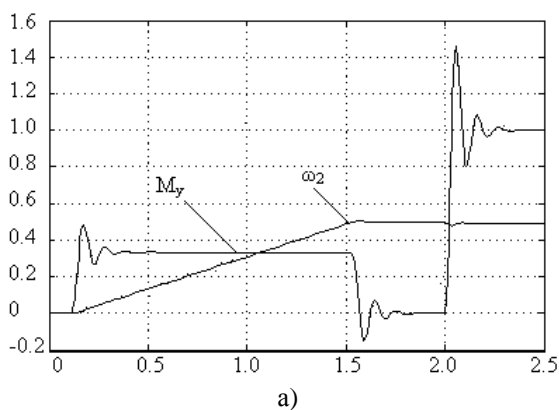
- принятые значения γ , φ_y , ε для известных параметров объекта позволяют по соотношениям (12), (13) вычислить оптимальные параметры цепей об-

ратных связей по координатам первой и второй масс K_{11}, K_{12}, K_{13} , а также постоянной времени $T_{цс}$;

- полученные значения оптимальных параметров должны удовлетворять условиям физической реализуемости. Если реализовать значения коэффициентов не удастся, требуется компромиссное решение с вариацией параметров не только электрической подсистемы, но и упругой механической подсистемы.

Для иллюстрации практического исполнения методики синтеза ЭМС модальной структуры были рассчитаны оптимальные коэффициенты и постоянная времени (12), (13) для электромеханической системы регулирования скорости клетки непрерывного заготовочного стана КМК со значениями параметров $T_{M1} = 0,945$ с; $T_{\Theta} = 0,065$ с; $K_1 = 12,32$; $\gamma = 1,5$; $\Omega_{12} = 62,8$ с⁻¹. Процессы пуска и захвата металла валками клетки моделировались по структурной схеме в среде пакета Matlab Simulink и приведены на рис. 2.

Осциллограммы машинного расчета показывают, что система обеспечивает предельное демпфирование упругих колебаний в электрической и механической подсистемах при высокой статической и динамической точности поддержания скорости.



Выводы. Предлагаемая методика проста, удовлетворяет требованиям системного анализа, имеет прозрачное физическое содержание. Синтез параметров электромеханической системы управления и регулирования модальной структуры позволяет реализовать благоприятное свойство активного гашения электроприводом упругих колебаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Ключев В. И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
2. Бургин Б.Ш. Анализ и синтез двухмассовых электромеханических систем: Монография / Новосибир. электротехн. ин-т. – Новосибирск, 1992. – 199 с.
3. Задорожний Н.А. , Задорожня И.Н. Корневые оценки качества регулирования электроприводов со свойствами электромеханической совместимости // Вестник НТУ ХПИ, вып. 12, том 2. - Харьков: НТУ ХПИ, 2002 – С. 445-447.
4. Марущак Я.Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним коригуванням: Навч. посібник. – Львів: Видавництво Нац. унів-ту Львівська політехніка, 2005. – 208 с.

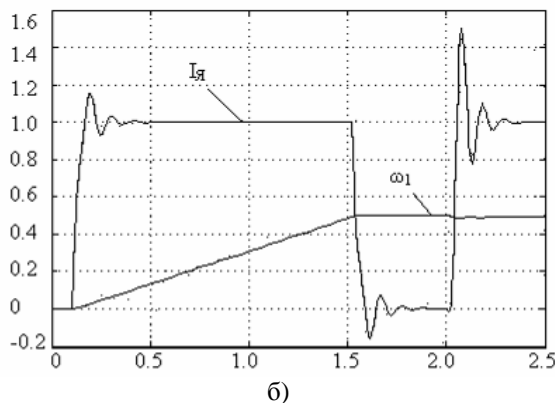


Рисунок 2 – Переходные процессы при пуске и ударном приложении нагрузки:
 а) – механическая подсистема;
 б) – электрическая подсистема

Стаття надійшла 15.04.2007 р.
 Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
 Родькіним Д.Й.