

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ДЕМПФЕРА

Известным решением ограничения динамических нагрузок в приводах машин с упругими механическими связями является применение в механических передачах дополнительных демпфирующих устройств (ДУ). По действию на процессы рассеяния энергии колебаний такие устройства-демпферы - разделяют на демпферы трения, гидравлические, инерционные, вихревых токов [1,2], а по способу установки относительно упругой связи - на параллельные и последовательные [3,4].

Анализу и исследованию динамики систем с упругими звеньями и демпферами параллельного типа уделено достаточное количество публикаций, их действие вполне эффективно при резонансных явлениях, учёт демпфирующих составляющих осуществляется дополнительно элементом вязкого трения на структурной схеме, приведенной на рис.1. Структурная схема описывает динамику электропривода с двигателем постоянного тока и упругой связью с демпфированием для принятых в литературе обозначений в относительной форме параметров.

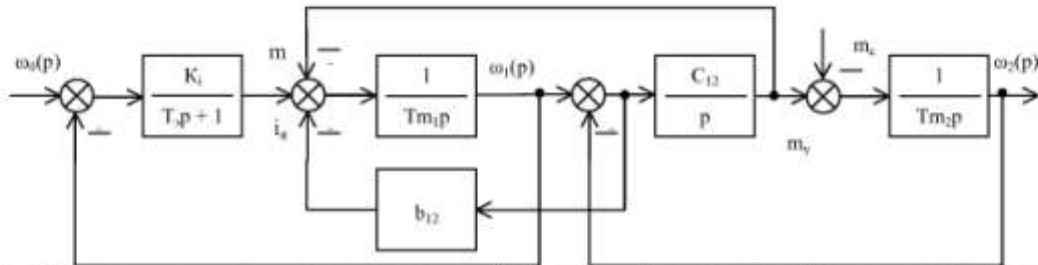


Рис. 1 Структурная схема электропривода с упругой механической связью и демпфером параллельного типа

На основании структурной схемы двухмассовой электромеханической системы для исследования демпфирующих свойств получены передаточные функции с характеристическим уравнением следующего вида:

$$Q(p) = \frac{\gamma T_m T_c}{\Omega_{12}^2} p^4 + \gamma (T_m T_c T_{d1} + \frac{T_m T_c}{\Omega_{12}^2}) p^3 + \gamma (T_m T_c + T_m T_{d1} + \frac{K_i}{\Omega_{12}^2}) p^2 + (\gamma T_m + K_i T_{d1}) p + K_i = 0. \quad (1)$$

В характеристическом уравнении кроме общепринятых в качестве динамических параметров использованы следующие обобщенные: $\gamma = (T_m + T_m) / T_m = (J_1 + J_2) / J_1$ - коэффициенты соотношения инерционных масс; $\Omega_{12}^2 = C_{12}(T_m + T_m) / T_m T_m$ - квадрат частоты недемпфированных (свободных) колебаний двухмассовой механической части; $T_{d1} = b_{12} / c_{12}$ - постоянная времени демпфирования свободных колебаний, с.

Структурная схема электромеханической системы (ЭМС) с демпфером последовательного типа для сравнительного анализа получена на основании дифференциальных уравнений механической части [4], и применительно к электроприводу постоянного тока приведена на рис.2

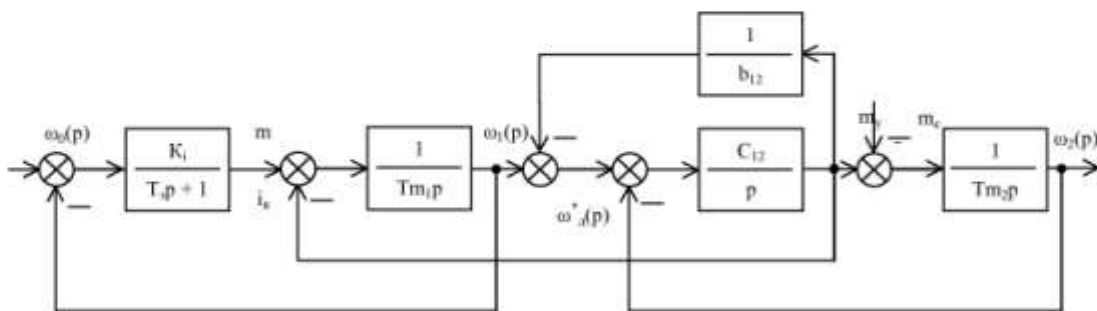


Рис. 2 Структурная схема электропривода с упругой механической связью и демпфером последовательного типа

На структурной схеме показано, что в точке соединения последовательного демпфера с упругим звеном момент сил упругости равен моменту вязкого трения:

$$b_{12}(\omega_1 - \omega_2) = c_{12}(\omega_1 - \omega_2),$$

где ω_1 - угловая скорость демпфера, отличающаяся в переходном режиме от угловой скорости двигателя ω и механизма ω_2 .

Характеристическое уравнение ЭМС с демпфером последовательного типа получено на основании преобразования структурной схемы (рис.2) и имеет вид:

$$Q(p) = \frac{\gamma T_M T_D}{\Omega_{12}^2} p^4 + \gamma T_M \left(\frac{T_D}{T_D \Omega_{12}^2} + \frac{1}{\Omega_{12}^2} \right) p^3 + \left(\gamma T_M T_D + \frac{T_M}{T_D \Omega_{12}^2} + \frac{K_i}{\Omega_{12}^2} \right) p^2 + \left(\gamma T_M + \frac{K_i}{T_D \Omega_{12}^2} \right) p + K_i = 0. \quad (2)$$

Сравнительный анализ коэффициентов характеристических уравнений (1) и (2) показывает, что характер процессов в ЭМС с ДУ параллельного и последовательного типов будет различным, несмотря на единое функциональное назначение демпфирующих устройств. Процессы электромеханической взаимосвязи параметрически установить намного сложнее в ЭМС для характеристического уравнения (2) с последовательным ДУ.

Действие демпфирующих сил параллельного и последовательного ДУ не является однонаправленным. Так, при оптимизации параметров системы уменьшение постоянной времени T_d в случае (1) требует усиления демпфирующего действия электропривода и его ослабления для случая применения последовательного ДУ (2). При увеличении T_d эффект введения демпфирования за счёт электромеханической связи будет обратным.

Бессистемный перебор параметров при оптимизации не позволяет получить выводы и рекомендации с единых позиций анализа и сохранения физического смысла, поэтому необходимо воспользоваться формой нормирования характеристических уравнений по обобщённым показателям электромеханического взаимодействия [5].

Для принятой формы обобщённых показателей физические параметры электрической подсистемы электромеханической системы представим в следующем виде:

$$\frac{T_M}{K_i} = 2\sqrt{K_B} \xi_D T_Y, \quad (3)$$

$$T_D = \frac{\sqrt{K_B} T_Y}{2\xi_D}, \quad (4)$$

$$T_Y = \frac{1}{\Omega_{12}^2}. \quad (5)$$

В приведенных выражениях (3), (4), (5) электромеханическое взаимодействие электрической и механической подсистем определяется коэффициентом

$$K_B = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_D^2} = \frac{T_M T_D}{K_i T_Y^2}, \quad (6)$$

а демпфирования со стороны электропривода – коэффициентом

$$\xi_D = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_M}{K_i T_D}}. \quad (7)$$

Для механической подсистемы с дополнительным ДУ параллельного типа коэффициенты демпфирования

$$\xi_{M1} = \frac{1}{2} \frac{T_{D1}}{\sqrt{\gamma T_Y}}, \quad (8)$$

а для случая применения ДУ последовательного типа

$$\xi_{M2} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\gamma T_Y}}{T_{D2}}. \quad (9)$$

При обосновании решений по конструированию ДУ того или иного типов следует отметить, что для одинаковых значений постоянной демпфирования $T_d = T_{d1}$ коэффициент относительного демпфирования последовательного демпфера

$$\xi_{M2} = \frac{1}{4\xi_{M1}}. \quad (10)$$

После подстановки соотношений (3), (4) и постоянной $T_d = T_{d1}$ из (9) в характеристическое уравнение (2) получаем его в обобщённом виде:

$$\gamma K_B T_Y^4 p^4 + 2(\gamma \sqrt{K_B} \xi_D + \sqrt{\gamma K_B} \xi_{M2}) T_Y^3 p^3 + (\gamma \gamma K_B + 4\xi_D \xi_{M2} \sqrt{\gamma K_B} + \gamma) T_Y^2 p^2 + 2(\gamma \sqrt{K_B} \xi_D + \sqrt{\gamma} \xi_{M2}) T_Y p + 1 = 0. \quad (11)$$

Из анализа характеристического уравнения (11) можно сделать вывод, что и для случая применения ДУ последовательного типа динамические свойства ЭМС определяются при заданных γ и T_d обобщёнными показателями

телями K_B, ξ_2, ξ_{M2} . Характеристическое уравнение (11) позволяет на стадии проектирования оценить действие ДУ по подавлению упругих механических колебаний в совокупности с демпфирующим действием электропривода.

Предельная степень демпфирования упругих механических колебаний последовательным ДУ может быть установлена для случая слабого демпфирования со стороны электропривода ($\xi_2 < \xi_{M2}$). Граничным значением демпфирующего действия электропривода является $\xi_2 = 0$ при использовании, например, системы источник тока - двигатель в диапазоне частот свободных колебаний $\Omega_0 = 10...30 \text{ с}^{-1}$. Тогда характеристическое уравнение (11) принимает вид:

$$\gamma K_B T_y^4 p^4 + 2\sqrt{\gamma} K_B \xi_{M2} T_y^3 p^3 + \gamma(1 + K_B) T_y^2 p^2 + 2\sqrt{\gamma} \xi_{M2} T_y p + 1 = 0. \quad (12)$$

Минимум колебательности в системе с характеристическим уравнением (12) достигается при динамической равнозначности процессов и выполнении условий:

$$K_B = \gamma, \quad (13)$$

$$\xi_{M2} = \sqrt{\gamma - 1}. \quad (14)$$

Условия (13) и (14) связывают параметры отдельных (парциальных) подсистем, а в полной ЭМС показатели затухания упругих механических колебаний могут быть определены из корней характеристического уравнения (12) для оптимальных K_B и ξ_{M2} :

$$p_{1,2} = p_{3,4} = -\frac{1}{\sqrt{\gamma} T_y} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\gamma - 1} \pm j \frac{1}{2} \sqrt{5 - \gamma} \right). \quad (15)$$

Тогда переходные процессы в ЭМС с последовательным ДУ и предельной степенью демпфирования в ЭМС характеризуются следующими показателями:

$$\xi_D = \frac{1}{2} \sqrt{\gamma - 1} - \text{относительный коэффициент затухания};$$

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{5 - \gamma}{\gamma - 1}} - \text{колебательность};$$

$$\Omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\gamma} T_y} - \text{частота свободных колебаний двухмассовой ЭМС}.$$

Соотношения (13), (14) и (9) позволяют определить параметры демпфирующего устройства при учете электромеханических свойств двигателя:

$$T_{D2} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\gamma} T_y}{\xi_{M2}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} T_y. \quad (16)$$

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- демпфирующие устройства последовательного типа целесообразно устанавливать на машинах и механизмах, которые по требованию технологии допускают реализацию предельного коэффициента ξ_{M2} при малых значениях сил демпфирования (10);
- полученные соотношения (13), (14) позволяют реализовать предельную степень демпфирования в ЭМС при более низких частотах по сравнению с ДУ параллельного типа;
- соотношения (6), (7) ,(9) позволяют обеспечить заранее заданные показатели затухания при учете характера электромеханической взаимосвязи и взаимодействия;
- результаты анализа могут быть рекомендованы для практики проектирования ЭМС при обосновании выбора типа демпфирующих устройств.

Литература

1. Лурье Б.Я. Эйрайт П. Дж. Классические методы автоматического управления/ Под ред. А.А. Ланнэ.- СПб.: БХВ – Петербург, 2004.- 540с.
2. Шаталов А.С. Структурные методы в теории управления и электроавтоматике. – М. – Л.: Госэнергонздат, 1962, – 408с.
3. Смирнов В.В., Яковлев Р.А. Механика приводов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1977 – 216 с.
4. Иванченко Ф.К., Красношарпа В.А. Прикладные задачи динамики машин. – Киев: Вища школа, 1983. – 200с.
5. Задорожний Н.А. Элементы теории электромеханического взаимодействия в двухмассовых системах электропривода с упругими механическими связями. – Краматорск, ДГМА, 2006. – 71с.
6. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.