

УДК 621.771.06:233.2

И. Н. Задорожня, канд. техн. наук, Н. А. Задорожний, канд. техн. наук, О. А. Ребедак
 Донбасская государственная машиностроительная академия,
 Кафедра ЭСА, ДГМА, ул. Шкадинова 72, г. Краматорск, 84313, Украина
 ПАО “Новокраматорский машиностроительный завод”
 КПЦ “НКМЗ-Автоматика”, ул. Орджоникидзе, 5, г. Краматорск, 84305, Украина

АНАЛИЗ ДЕМПФИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЯХ В РЕЖИМЕ НИЗКИХ СКОРОСТЕЙ

Рассмотрены особенности динамики электропривода с упругими звеньями в режиме низких скоростей. Показано, что в режимах низких скоростей необходимо учитывать влияние переменных сил трения на демпфирующую способность электропривода. Получены соотношения для определения коэффициентов электромеханического демпфирования с учетом изменения знака трения. Библ. 4, рис. 4

Ключевые слова: электропривод, демпфирование, упругие колебания, оптимизация.

Розглянуто особливості динаміки електроприводу з пружними ланками в режимі низьких швидкостей. Показано, що в режимах низьких швидкостей необхідно враховувати вплив змінних сил тертя на демпфуючу здатність електроприводу. Отримано співвідношення для визначення коефіцієнтів електромеханічного демпфірування з урахуванням зміни знака тертя. Бібл. 4, рис. 4

Ключові слова: електропривод, демпфирование, упругие колебания, оптимизация.

Введение

Основной задачей автоматизированного электропривода является обеспечение заданной точности регулирования и ограничение динамических нагрузок на электрическое и механическое оборудование.

Для больших групп регулируемых электроприводов, используемых в станкостроении, робототехнике, металлургических машинах и подъемно-транспортных механизмах характерной особенностью является наличие упругих механических звеньев и значительное трение на валу двигателя. В динамике упругие механические звенья являются причиной возбуждения колебаний с ростом дополнительных механических нагрузок электропривода и искажением заданных законов движения.

Целью работы является исследование влияния трения на демпфирующее действие электропривода в режимах низких скоростей. Ограничение механических нагрузок достигается формированием механических характеристик с усилением демпфирующего действия электропривода [3]. В режиме снижения скорости при регулировании проявляются специфические свойства переменных сил трения на валу электродвигателя. На рис. 1 приведен график характеристики трения $M_{тр} = f(\omega_d)$ – зависимость момента трения от угловой скорости [1].

Материалы и результаты исследований

В диапазоне скоростей электродвигателя $\omega_1 < \omega_d < \omega_3$ при отработке ошибки регулирования, составляющие вязкого трения изменяются по величине и могут принимать отрицательные значения.

В результате влияния “отрицательного” вязкого трения на валу электродвигателя ослабляется демпфирование упругих колебаний в механической подсистеме электропривода, и при определенных значениях коэффициента трения.

$$a = \frac{dM_{тр}}{d\omega_d} \quad (1)$$

происходит самовозбуждение колебаний (дестабилизация) и потеря устойчивости.

Эти специфические свойства характеристики трения необходимо учитывать при синтезе систем автоматического управления и при выборе корректирующих звеньев. Поэтому вопросы исследования демпфирующего действия электропривода с упругими связями и переменными силами трения актуальны и способствуют дальнейшему совершенствованию динамических качеств электропривода.

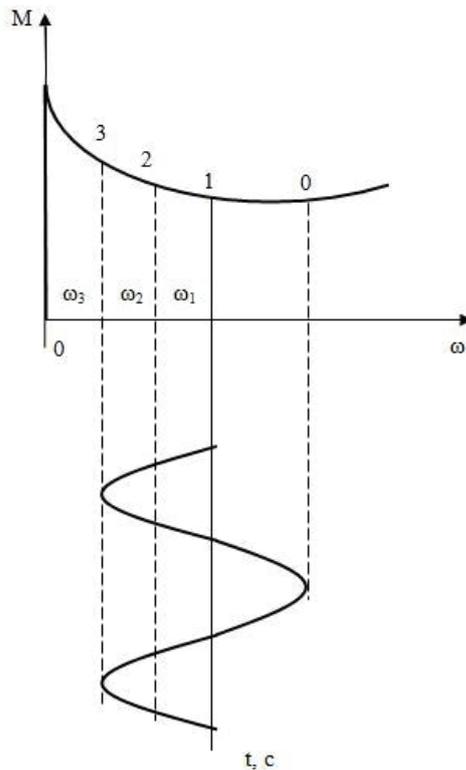


Рис. 1

В паспортных данных электродвигателей, в том числе и высокомоментных, условиями эксплуатации указано, что устойчивость работы в режиме низких скоростей обеспечивается системой регулирования. Силы трения в режиме низких скоростей изменяют частотные свойства двигателя как объекта управления, и показатели – коэффициент затухания ξ и резонансная частота Ω_p – также отклоняются от нормируемых (расчетных). При положительных значениях коэффициента (1) в работе [4] определены возможные границы отклонения показателей ξ , Ω_p и для режима низких и сверхнизких угловых скоростей приведены формулы оценки влияния механического трения. В работе [2] при учете диапазона регулирования с положительной составляющей вязкого трения определены условия достижения предельной степени демпфирующего действия электропривода и получены соотношения для параметрического синтеза, показано, что механическое трение нельзя считать просто вспомогательным для процесса затухания упругих колебаний.

В данной работе используются свойства собственно электромеханического преобразователя (двигателя) для условий проявления дестабилизирующего действия механического трения при упругих колебаниях.

Динамические свойства исследуемого электропривода можно представить структурной схемой в обобщенной форме и общепринятыми обозначениями, приведенной на рис. 2.

Механическая подсистема (МП) интерпретирована двухмассовой расчетной схемой с упругим звеном, электромагнитная подсистема (ЭП) – электродвигатель – колебательным звеном с трением на валу. В режиме малых отклонений угловой скорости трение принимается вязким, но в зависимости от скорости знак коэффициента принимает положительные и отрицательные значения. Исследование электропривода как электромеханической системы (ЭМС) производится на основании метода её представления отдельными (парциальными) взаимодействующими подсистемами – МП и ЭП.

Демпфирующие свойства ЭМС определяются характеристическим уравнением [2]:

$$Q(p) = \gamma T_{M1} T_{\vartheta} T_y^2 p^4 + \gamma (T_{M1} + a T_{\vartheta}) T_y^2 p^3 + \gamma ((K_i + a) T_y^2 + T_{M1} T_{\vartheta}) p^2 + (\gamma T_{M1} + a T_{\vartheta}) p + K_i + a = 0, \quad (2)$$

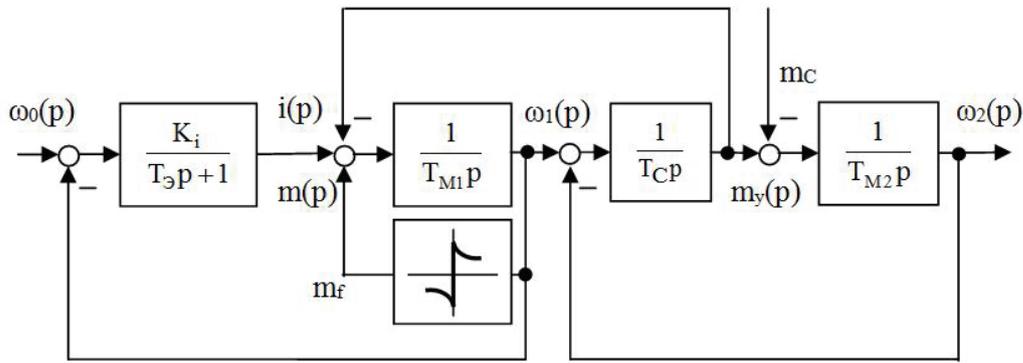


Рис. 2.

где $T_y^2 = T_{M1} T_{M2} T_c / (T_{M1} + T_{M2})$ – постоянная времени упругих колебаний;

$\gamma = (T_{M1} + T_{M2}) / T_{M1}$ – коэффициент распределения инерционных масс.

Упругая парциальная МП при оценке собственно демпфирующего действия электропривода представляется характеристическим уравнением консервативного динамического звена

$$Q_{МП}(p) = T_y^2 p^2 + 1 = 0, \quad (3)$$

с коэффициентом затухания $\xi_{МП} = 0$.

Электропривод при определенных соотношениях параметров “вносит” демпфирование в МП за счет электромеханической связи. Существенность электромеханической связи зависит от свойств электромагнитной парциальной подсистемы, которая при учете переменных сил трения описывается характеристическим уравнением звена второго порядка

$$Q_{ЭП}(p) = T_{M1} T_{Э} p^2 + (T_{M1} + a T_{Э}) p + K_i + a = 0. \quad (4)$$

Для удобства анализа динамических свойств ЭП в общем виде необходимо абстрагироваться от абсолютных значений параметров. Характеристическое уравнение (4) приводится к типовой форме, и вводятся обобщенные показатели.

При отсутствии внешнего момента сопротивления ($m_c = 0$) в установившемся режиме угловая скорость вала двигателя определена уравнением механической характеристики

$$\Omega_1 = \Omega_0 - m_f / K_i, \quad (5)$$

где $m_f = a \Omega_1$ – момент сил трения на валу двигателя при линеаризации участков характеристики трения;

Ω_1 – фактическое значение угловой скорости двигателя;

Ω_0 – угловая скорость идеального холостого хода (задания).

Для режима низких скоростей влияние моментов сил трения $m_f = a \Omega_1$ количественно можно определить по отклонению скорости от идеального холостого хода (задания), если из (5) после подстановки величин m_f выразить

$$\frac{\Omega_0}{\Omega_1} = \left(1 + \frac{a}{K_i} \right) = \varepsilon, \quad (6)$$

где ε – коэффициент отклонения скорости ($\varepsilon > 0$ из физических соображений).

Характер влияния момента сил трения на амплитуду колебаний определяется для паспортного диапазона низких скоростей по (6) так

$$\begin{cases} \varepsilon > 1,0, & \Omega_1 < \Omega_0, & a > 0; \\ \varepsilon = 1,0, & \Omega_1 = \Omega_0, & a = 0; \\ \varepsilon < 1,0, & \Omega_1 > \Omega_0, & a < 0. \end{cases}$$

В первом случае момент сил трения оказывает стабилизирующее действие, так как трение положительно, во втором случае влияние момента сил отсутствует, так как нет трения, а в третьем – оказывает дестабилизирующее действие, так как электромеханическая связь ослабляется.

Характеристическое уравнение (4) с учетом (6) приводится для придания подсистеме свойств демпфирования упругих механических колебаний к типовому колебательному звену

$$Q_{ЭП}(p) = T_0^2 p^2 + 2\xi_d T_0 p + 1 = 0. \quad (7)$$

при соблюдении следующих соотношений между параметрами

$$T_0^2 = \frac{T_{M1} T_{Э}}{K_i + a} = \frac{T_{M1} T_{Э}}{K_i \left(1 + \frac{a}{K_i}\right)} = \frac{T_{M1} T_{Э}}{K_i \varepsilon}; \quad (8)$$

$$2\xi_d T_0 = \left(\frac{T_{M1}}{K_i \varepsilon} + \frac{a}{K_i \varepsilon} T_{Э} \right) = \left(\frac{T_{M1}}{K_i \varepsilon} + \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} T_{Э} \right), \quad (9)$$

где T_0 – определяет постоянную времени колебаний;

ξ_d – относительный коэффициент суммарного (электромеханического) затухания колебаний ЭП.

Электродвигатель, как ЭП, имеет согласно (9), слагаемые с электромагнитным действием подавления амплитуды колебаний ($\xi_{Э} > 0$) всегда и механическим ξ_M

$$\xi_{Э} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_{M1}}{K_i \varepsilon}}; \quad (10)$$

$$\xi_M = \frac{\varepsilon - 1}{4\xi_{Э}}, \quad (11)$$

которое зависит от величин ε и $\xi_{Э}$.

После преобразования (8), (9) выражение для коэффициента электромеханического демпфирования ЭП запишется в виде

$$\xi_d = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \left(\xi_{Э} + \frac{\varepsilon - 1}{4\xi_{Э}} \right) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} (\xi_{Э} + \xi_M). \quad (12)$$

Согласно зависимостям, при $\varepsilon > 1,0$ $\xi_M > 0$ и в ЭМС вносится дополнительное демпфирование колебаний, а при $\varepsilon < 1,0$ $\xi_M < 0$ – затухание колебаний ослабляется, а в зависимости от величины ξ_M также возможно возрастание амплитуды.

В общем случае, как видно из сопоставления (10), (11) и (12) величина электромеханического демпфирования ξ_d определяется составляющими $\xi_{Э}$ и ξ_M связанными следующими соотношениями

$$(\xi_{Э} + \xi_M) = \sqrt{\varepsilon} \xi_d; \quad (13)$$

$$\xi_{Э} \xi_M = \frac{(\varepsilon - 1)}{4}. \quad (14)$$

В зависимости от значений $\varepsilon > 0$ и расчетных значений $\xi_{Э}$ (10) коэффициент ξ_d определяет демпфирующие возможности ЭП.

Электропривод при действии сил трения в динамике может в режиме низких скоростей проявлять следующие свойства:

1) $\varepsilon = 1,0$ и $\xi_d = \xi_{Э}$ – демпфирование колебаний осуществляется за счет электромагнитной составляющей, так как $\xi_M = 0$;

2) $\varepsilon > 1,0$ и $\xi_d = (\xi_{Э} + \xi_M) / \sqrt{\varepsilon}$ – демпфирование колебаний осуществляется электро-механически;

3) $\varepsilon < 1,0$ и $0 < \xi_d < 1,0$ – демпфирование колебаний ослабляется за счет $\xi_M < 0$;

4) $\varepsilon < 1,0$ и $\xi_d = 0$ – демпфирование со стороны ЭП отсутствует, т.к. $\xi_M = -\xi_{Э}$;

5) $\varepsilon < 1,0$ и $\xi_d < 0$ – возбуждение колебаний (дестабилизация).

По определению теории автоматического управления ЭП по свойствам 1,2,3 является минимально-фазовой, 4 – консервативной, 5 – неминимально-фазовой.

Частота свободных (недемпфированных) колебаний ЭП

$$\Omega_0 = \sqrt{K_i \varepsilon / T_{M1} T_{Э}}, \quad (15)$$

а частота демпфированных колебаний

$$\Omega_p = \Omega_0 \sqrt{1 - \xi_d^2}. \quad (16)$$

На рис. 3 приведены для иллюстрации графики зависимости $\xi_d(\varepsilon)$ от различных величинах демпфирования $1 - \xi_{\varepsilon 1} = 0,2$, $2 - \xi_{\varepsilon 2} = 0,4$, $3 - \xi_{\varepsilon 3} = 0,7$, из которых видно как влияет изменение коэффициента относительно значения $3 - \varepsilon = 1,0$ на величину ξ_d .

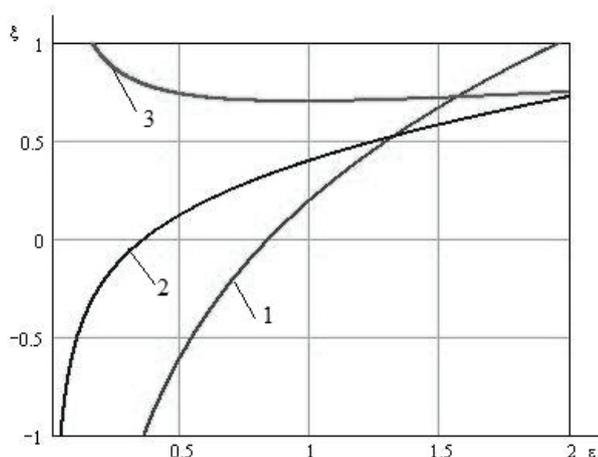


Рис. 3

Графики зависимости, приведенные на рис. 4, показывают возможности коррекции параметров ЭП для обеспечения требуемого демпфирования ξ_d упругих колебаний в ЭМС при различных значениях $1 - \varepsilon_1 = 0,5$, $2 - \varepsilon_2 = 1,0$, $3 - \varepsilon_3 = 2,0$.

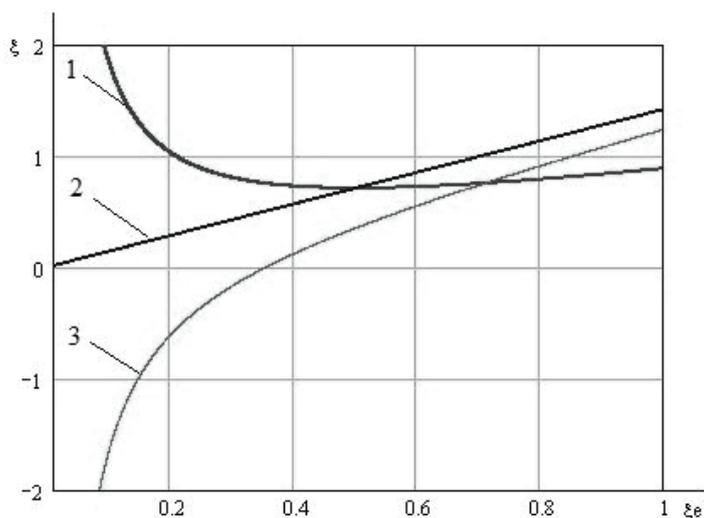


Рис. 4

Выводы

Метод анализа особенностей динамики ЭМС в режиме низких скоростей и полученные соотношения для определения показателей демпфирования упругих колебаний предложено использовать в практике проектирования, эксплуатации и наладки металлорежущих станков в условиях производства ПАО “НКМЗ” (г. Краматорск).

Список литературы

1. Андриященко В. А. Об устойчивости следящего электропривода низких скоростей при неограниченном возрастании некоторых его параметров // Изв. вузов. “Электромеханика”. – 1976. – №1. – С. 100–103.
2. Задорожний Н. А., Земляков В. Д. Оценка демпфирующей способности электропривода с упругим звеном и яским трением на валу двигателя // Электричество. – 1989. – № 4. – С. 70–72.
3. Земляков В. Д., Задорожний Н. А. О демпфировании электроприводом постоянного тока упругих электромеханических колебаний // Изв. вузов. “Электромеханика”. – 1984. – №5. – С. 92–98.
4. Михайлов О. П. Высокомоментные электродвигатели в режимах низких скоростей // Электротехника. – 1982. - №7. – С. 14–16.

ANALYSIS OF DAMPING ACTION BY THE DRIVE WITH ELASTIC VIBRATIONS IN THE LOW SPEED MODE

I.N. Zadorozhnyaya, N.A. Zadorozhny, O.A. Rebedak,
Donbass State Machine-building Academy,
Chair ESA, DSMBA, Shkadinova 72, Kramatorsk, 84313, Ukraine
PC “Novokramatorsky Machine-building plant”
DPC “NKMZ-Avtomatika”, Ordzhonikidze 5, Kramatorsk, 84305, Ukraine

The features of the dynamics of the electric drive with elastic links in low-speed mode. It is shown that in the low speed mode is necessary to consider the impact of variable forces of friction on the damping capacity of the drive. The relations for determining the coefficients of the electromechanical damping for the changes in the sign of friction. References 4, figure 4

Key words: electric damping, elastic vibrations, optimization.

1. Andriushenko V.A. On the stability of servo motor at low speeds unbounded growth of some of its parameters // *Izv. vuzov. “Elektromehanika”*. – 1976. – №1. – p. 100–103. (Rus)
2. Zadorozhnyj N.A., Zemljakov V.D. Rating damping capacity electric drive with an elastic element and the viscous friction of the motor // *Elektrichestvo*. – 1989. – № 4. – p. 70–72. (Rus)
3. Zemljakov V.D., Zadorozhnyj N.A. About cushioning dc drive electro-elastic vibrations // *Izv. vuzov. “Elektromehanika”*. – 1984. – №5. – p.92-98. (Rus)
4. Mihajlov O.P. High-torque motors in the low speed mode // *Elektrotehnika*. – 1982. – № 7. – P. 14–16. (Rus).