

УДК: 62-83:621+531.395

Д. А. КАМИНСКАЯ,

канд. техн. наук,

Б. Е. КОРОТЕНКО,

канд. техн. наук,

А. Г. ГРИНЧЕНКО

АНАЛИЗ ДЕМПФИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ
МЕХАНИЗМА И ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ПРИ СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЯХ
МАШИННЫХ АГРЕГАТОВ

Рассмотрим колебания машинного агрегата с упругой связью и электрическим приводом при воздействии на механизм случайной внешней нагрузки. Структурная схема электромеханической системы приведена на рис. 1. Силы трения в механизме и электрический привод вызывают рассеивание энергии колебаний машинного агрегата, что приводит к их демпфированию.

Структурной схеме (рис. 1) соответствуют следующие передаточные функции системы при входной величине-моменте M_B и выходных величинах-моменте в упругой связи механизма M_1 , скорости механизма ω_2 и моменте двигателя M_d :

$$W_1(p) = \frac{M_1(p)}{M_B(p)} = \frac{B_1(p)}{A(p)}; \quad (1)$$

$$W_2(p) = \frac{\omega_2(p)}{M_B(p)} = \frac{1}{J_2 \omega_0} \cdot \frac{B_2(p)}{A(p)}, \quad (2)$$

$$W_3(p) = \frac{M_A(p)}{M_B(p)} = \frac{B_3(p)}{A(p)}, \quad (3)$$

где

$$B_1(p) = p_1 K_2 + K_2 \psi;$$

$$B_2(p) = p_1^2 + p_1 [\psi + \psi_{\text{тр}} (1 - K_2)] + (1 - K_2);$$

$$B_3(p) = p_1 \psi \psi_{\text{тр}} K_2 + K_2 \psi;$$

$$A(p) = p_1^3 + p_1^2 (\psi + \psi_{\text{тр}}) + p_1 (1 + K_2 \psi \psi_{\text{тр}}) + K_2 \psi;$$

$$p_1 = \frac{p}{\omega_0};$$

p — оператор дифференцирования;

$\omega_0 = \sqrt{C J_{\Sigma}^{-1}}$ — частота собственных колебаний механизма;

$\psi = \frac{K_A}{J_1 \omega_0}$ — степень электрического демпфирования [1];

$\psi_{\text{тр}} = \frac{K_{\text{тр}}}{J_{\Sigma} \omega_0}$ — степень механического демпфирования;

$$K_2 = \frac{J_1}{J_1 + J_2}$$

$$J_{\Sigma} = \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2}$$

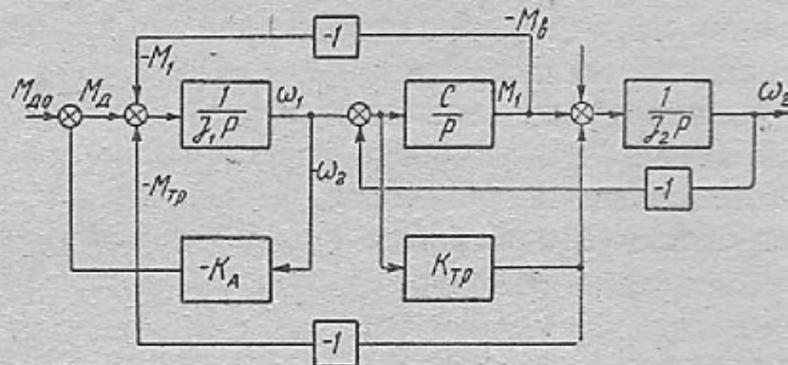


Рис. 1. Структурная схема электромеханической системы: J_1 ; J_2 — момент инерции привода и механизма; C — жесткость упругой связи; K_A — коэффициент жесткости механической характеристики; $K_{\text{тр}}$ — коэффициент механического трения; $M_{\text{тр}}$ — момент сил трения в механизме.

Передаточным функциям (1) — (3) отвечают выражения для дисперсии выходных величин при случайной внешней нагрузке механизма M_B , аппроксимируемой белым шумом со спектральной плотностью S_B :

$$\sigma_1^2 = \frac{S_B \omega_0}{2} \cdot \frac{\psi_{\text{тр}} B_{11} + B_{01}}{\psi_{\text{тр}}^2 A_{21} + \psi_{\text{тр}} A_{11} + A_{01}}; \quad (4)$$

$$\sigma_2^2 = \frac{S_B}{2 J_2 \omega_0^2} \cdot \frac{\psi_{\text{тр}}^2 B_{22} + \psi_{\text{тр}} B_{21} + B_{02}}{\psi_{\text{тр}}^2 A_{22} + \psi_{\text{тр}} A_{12} + A_{02}}; \quad (5)$$

$$\sigma_3^2 = \frac{S_B \omega_0}{2} \cdot \frac{\psi_{\text{тр}}^2 B_{23} + \psi_{\text{тр}} B_{13} + B_{03}}{\psi_{\text{тр}}^2 A_{23} + \psi_{\text{тр}} A_{13} + A_{03}}, \quad (6)$$

где σ_1^2 — дисперсия момента в упругой связи механизма M_1 ;

σ_2^2 — дисперсия скорости механизма ω_2 ;

σ_3^2 — дисперсия момента двигателя M_d ;

$$B_{11} = K_2 \psi,$$

$$B_{01} = K_2 (\psi^2 + K_2),$$

$$B_{22} = \psi K_2 (1 - K_2)^2,$$

$$B_{12} = \psi^2 K_2 (2 - K_2) + (1 - K_2)^2,$$

$$B_{02} = (1 - 3K_2 + 3K_2^2) \psi + K_2 \psi^3,$$

$$B_{23} = K_2^2 \psi^2,$$

$$B_{13} = K_2 \psi,$$

$$B_{03} = K_2 \psi^2,$$

$$A_{21} = A_{23} = K_2 \psi,$$

$$A_{11} = A_{13} = 1 + K_2 \psi^2,$$

$$A_{01} = A_{03} = \psi (1 - K_2),$$

$$A_{22} = \psi^2 K_2^2,$$

$$A_{12} = K_2 \psi (1 + K_2 \psi^2),$$

$$A_{02} = K_2 \psi^2 (1 - K_2).$$

Уравнению (4) соответствует следующая зависимость для оптимальной степени электрического демпфирования — $\psi_{\text{лопт}}$, при которой обеспечивается минимизация дисперсии момента M_1 :

$$\psi_{\text{лопт}} = \sqrt{K_2 + K_2 \psi_{\text{тр}}^2 (1 + K_2) - \psi_{\text{тр}} (1 + K_2)}.$$

Минимизация дисперсии скорости ω_2 при заданных параметрах механизма обеспечивается при жесткости механической характеристики электропривода, соответствующей оптимальной степени демпфирования — $\psi_{2\text{лопт}}$, определяемой уравнением

$$\left. \frac{\partial \sigma_2^2}{\partial \psi} \right|_{J_1, \omega_0} = 0.$$

Как показывает исследование динамики электромеханических систем подъемно-транспортных машин и экскаваторов, в ряде случаев основное демпфирующее действие на колебания машинного агрегата оказывает электрический привод, а влияние сил механического трения является незначительным и им можно пренебречь [2]. В связи с этим представляет интерес определение зависимостей между обобщенными параметрами машинного агрегата — K_2 , ψ , $\psi_{\text{тр}}$, при которых расчет случайных колебаний

может выполняться без учета сил трения в механизме. Отношение дисперсии σ_i^2 при $\psi_{\text{тр}} = 0$ к дисперсии с учетом сил механического трения обозначим коэффициентом γ_1 . Граничное значение степени механического демпфирования — $\psi_{\text{тр. гр}}$, при котором отношение дисперсии колебаний в упрощенной системе (при $\psi_{\text{тр}} = 0$) к точному ее значению (рассчитанному с учетом демпфирующего влияния сил трения в механизме) равно заданному значению γ_1 , определяется в соответствии с уравнениями (4) — (6) зависимостью

$$\psi_{\text{тр. гр}}^2 \left(\gamma_1 \frac{A_{0i}}{B_{0i}} B_{2i} - A_{2i} \right) + \psi_{\text{тр. гр}} \left(\gamma_1 \times \right. \\ \left. \times \frac{A_{0i}}{B_{0i}} B_{1i} - A_{1i} \right) + A_{0i} (\gamma_1 - 1) = 0. \quad (7)$$

На рис. 2 приведены зависимости между обобщенными параметрами машинного агрегата — K_2 , ψ и $\psi_{\text{тр. гр}}$, при которых среднеквадратичные отклонения M_1 , ω_2 и M_d увеличиваются при пренебрежении силами механического трения на 10%. Эти зависимости рассчитаны по уравнению (7) при значениях коэффициента $\gamma_1 = 1,21$. Кривые 1а—4а получены для момента механизма M_1 ; кривые 1б—4б — для скорости ω_2 ; кривые 1в—4в — для момента двигателя M_d .

Как следует из приведенных зависимостей, граничные значения степени механического демпфирования для M_1 , ω_2 и M_d весьма близки. По мере увеличения коэффициента K_2 значения $\psi_{\text{тр. гр}}$ уменьшаются, так как при этом наблюдается снижение демпфирующей способности электропривода и соответственно повышается влияние сил механического трения [1, 2].

При значениях степени механического демпфирования $\psi_{\text{тр}} < \psi_{\text{тр. гр}}$ расчет случайных колебаний машинного агрегата может выполняться без учета сил механического трения. Оптимальные значения степени электрического демпфирования определяются при этом с помощью зависимостей, полученных в [3].

При степени электрического демпфирования ψ , существенно повышающей оптимальные значения $\psi_{\text{опт}}$, демпфирующее действие электрического привода резко ослабляется и может оказаться незначительным по сравнению с силами механического трения.

По мере увеличения степени электрического демпфирования (при $\psi > \psi_{\text{опт}}$) динамические качества рассматриваемой электро-механической системы приближаются к качествам одномассовой, односвязной механической системы, имеющей момент инерции $J_1 = \infty$ [2]. Определим граничные значения степени электрического демпфирования — $\psi_{\text{гр}}$, при которых вместо исходной двухмассовой расчетной схемы механизма с электрическим приводом при расчете случайных колебаний момента M_1 и скорости ω_2 может рассматриваться упрощенная одномассовая механическая система с моментом инерции привода J_1 , равным бесконечности.

Отношение дисперсии σ_i при $J_1 = \infty$ к дисперсии с учетом демпфирующего влияния электропривода обозначим коэффициентом γ_2 .

Граничные значения степени электрического демпфирования $\psi_{гр}$, при которых отношение дисперсии колебаний скорости ω_2 упрощенной системы (при $J_1 = \infty$) к точному ее значению (расчитанному с учетом демпфирующего действия электрического

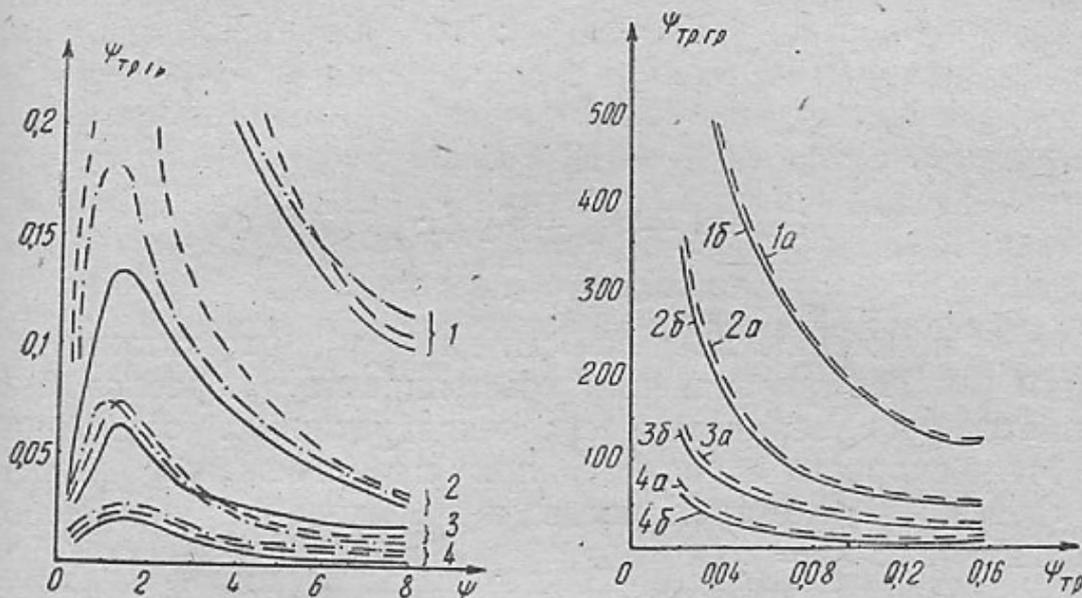


Рис. 2. Зависимость граничных значений степени электрического демпфирования от параметров машинного агрегата. Кривые 1а, 1б, 1в — при коэффициенте $K_2 = 0,2$; 2а, 2б, 2в — $K_2 = 0,4$; 3а, 3б, 3в — $K_2 = 0,6$; 4а, 4б, 4в — $K_2 = 0,8$.

Рис. 3. Зависимость граничных значений степени механического демпфирования от параметров машинного агрегата. Кривые 1а, 1б — при коэффициенте $K_2 = 0,2$; 2а, 2б — $K_2 = 0,4$; 3а, 3б — $K_2 = 0,6$; 4а, 4б — $K_2 = 0,8$.

привода) составляет заданную величину γ_2 , определяется зависимостью

$$\psi_{гр}^3 (\gamma_2 K_2 \psi_{тр} A_4 - E_4) + \psi_{гр}^2 (\gamma_2 K_2 \psi_{тр} B_4 - Ж_4) + \psi_{гр} (\gamma_2 K_2 \psi_{тр} C_4 - M_4) + \gamma_2 K_2 \psi_{тр} D_4 = 0, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} A_4 &= K_2; \\ B_4 &= \psi_{тр} K_2 (2 - K_2); \\ C_4 &= (1 - 3K_2 + 3K_2^2 + \psi_{тр} K_2 (1 - K_2)^2); \\ D_4 &= \psi_{тр} (1 - K_2)^2; \\ E_4 &= K_2^2 \psi_{тр}; \\ Ж_4 &= K_2 (1 - K_2) + K_2^2 \psi_{тр}^2; \\ M_4 &= K_2 \psi_{тр}. \end{aligned}$$

Граничные значения степени электрического демпфирования $\psi_{гр}$, для дисперсии момента M_1 могут быть рассчитаны с помощью уравнения

$$\psi_{гр}^2 (\gamma_2 \psi_{тр} A_5 - D_5) + \psi_{гр} (\gamma_2 \psi_{тр} B_5 - E_5) + (\gamma_2 \psi_{тр} C_5 - Ж_5) = 0, \quad (9)$$

где

$$A_5 = K_2;$$

$$B_5 = K_2 \psi_{тр};$$

$$C_5 = K_2^2;$$

$$D_5 = K_2 \psi_{тр};$$

$$E_5 = 1 - K_2 + K_2 \psi_{тр}^2;$$

$$Ж_5 = \psi_{тр}.$$

На рис. 3 приведены зависимости для $\psi_{гр}$, рассчитанные по уравнениям (8), (9) при значении коэффициента γ_2 , равном 1,21, что соответствует увеличению среднеквадратичных отклонений момента M_1 и скорости ω_2 на 10% при пренебрежении демпфирующим действием электропривода и переходе к упрощенной схеме механизма с $J_1 = \infty$.

Кривые 1а — 4а соответствуют $\psi_{гр}$ для момента M_1 ; кривые 1б — 4б — значениям $\psi_{гр}$ для скорости ω_2 . Граничные значения степени электрического демпфирования для момента и скорости механизма практически совпадают.

В подъемно-транспортных машинах и экскаваторах значение степени механического демпфирования — $\psi_{тр}$ составляет обычно 0,03—0,1 (что соответствует логарифмическому декременту затухания $\lambda = 0,1—0,3$).

Оценка возможности перехода к упрощенной динамической системе (с $J_1 = \infty$) может быть выполнена при этом с помощью неравенства

$$\psi \geq (0,83 - 0,98K_2) \cdot 10^3, \quad (10)$$

полученного в результате аппроксимации зависимостей рис. 3 при $\psi_{тр} = 0,03$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каминская Д. А. Анализ вынужденных колебаний машинного агрегата с электрическим приводом.—Иzv. вузов. Машиностроение, 1970, № 11, с. 28—32.
2. Волков Д. П., Каминская Д. А. Динамика электромеханических систем экскаваторов. М., «Машиностроение», 1971. 382 с.
3. Каминская Д. А., Гринченко А. Г. Анализ колебаний машинного агрегата с электроприводом при случайных внешних возмущениях.—«Приборы и системы автоматизации». Вып. 23, Харьков, 1972, с. 52—57.

Анализ демпфирующего действия механизма и электропривода при случайных колебаниях машинных агрегатов. Каминская Д. А., Коротенко Б. Е., Гринченко А. Г. Сб. «Автоматизированные системы управления и приборы автоматики», вып. 34, 1975, с. 71—76.

Рассмотрено демпфирующее действие электрического привода и сил механического трения на случайные колебания машинного агрегата, имеющего двухмассовую односвязную расчетную схему. Получены условия, при которых основное демпфирующее влияние оказывает, электрический привод, а действие сил механического трения является незначительным и им можно пренебречь. Показано, что относительное влияние сил механического трения возрастает по мере увеличения момента инерции привода по сравнению с моментом инерции механизма. Получены условия, при которых основное влияние на демпфирование случайных колебаний оказывает сила трения в механизме, а демпфирующим действием электрического привода можно пренебречь. Получены зависимости между обобщенными параметрами машинного агрегата, при которых обеспечивается минимизация дисперсии момента механизма при учете сил трения в механизме и демпфирующего влияния электропривода.

Ил. 3. Библиогр. 3.