

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЛАСТИНЧАТЫХ КОНВЕЙЕРОВ С УЧЕТОМ УПРУГО-ВЯЗКОСТИ

Қайырбеков Салауат Еркінбекұлы

arpabekov_m@mail.ru

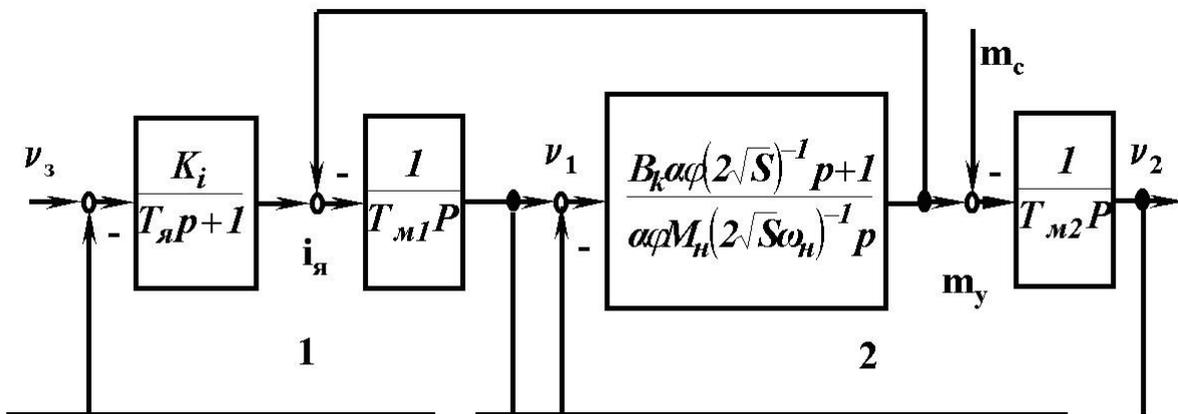
студент 4 курса специальности 5В090100- «Организация перевозок, движения и эксплуатация транспорта» транспортно-энергетического факультета, ЕНУ им. Л.Н.Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

Научный руководитель - М.И.Арпабеков

Рассмотрим условия предельного демпфирования электрической подсистемой упруго-вязких механических колебаний пластинчатого конвейера (рисунок 1).

На структурной схеме использованы общепринятые обозначения в относительной форме записи величин [1]:

$$\begin{aligned}
 m_d = i_{\text{я}} = J_{\text{я}} J_{\text{я.н}}^{-1}; m_y = i_y = M_y M_{\text{н}}^{-1}; m_c = i_c = M_c M_{\text{н}}^{-1}; \\
 \nu = \omega \omega_0^{-1}; \rho = R_{\text{я}} R_{\text{н}}^{-1}; R_{\text{н}} = U_{\text{н}} J_{\text{н}}^{-1}; T_{\text{м1}} = J_1 \omega_{\text{н}} M_{\text{н}}^{-1}; \\
 T_{\text{м2}} = J_2 \omega_{\text{н}} M_{\text{н}}^{-1}; T_{\text{я}} = L_{\text{я}} R_{\text{я}}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$



1 – электрическая подсистема (ЭП); 2 – механическая подсистема (МП); $m_c, m_y, i_{\text{я}}, \nu_1, \nu_2, \nu_3$ - величины моментов, тока и скоростей в относительных единицах соответственно

Рисунок 1 - Структурная схема конвейера

Рассмотрим демпфирующее действие системы с учетом постоянной времени жесткости T_c и постоянной упруго-вязкости T_d .

Упруго-вязкость тягово-несущего органа грузенного пластинчатого конвейера определяется следующим выражением [1-3]:

$$b = B_k w_H \cdot M_H^{-1}, \quad (2)$$

где B_k – коэффициент вязкости грузонесущего органа конвейера .
Постоянная времени жесткости динамической системы:

$$T_c = \frac{\alpha \varphi M_H}{2\sqrt{S} \omega_H} \quad (3)$$

где φ – коэффициент приведения жесткости первого и второго родов

Тогда постоянная времени T_d , которой определяется время затухания свободных колебаний в динамической системе, определяется с учетом и (2) следующим образом:

$$T_d = bT_c = \frac{B_k \alpha \varphi}{2\sqrt{S}}. \quad (4)$$

В качестве координаты электропривода рассматривается момент в упруговязкой МП – m_y . Передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям имеют вид:

$$W_1(p) = \frac{m_y(p)}{v_3(p)} = \frac{K_i T_{M2} p + [B_k \alpha \varphi (2\sqrt{S})^{-1} p + 1]}{Q(p)}, \quad (5)$$

$$W_2(p) = \frac{m_y(p)}{m_c(p)} = \frac{[B_k \alpha \varphi (2\sqrt{S})^{-1} p + 1] (T_{M1} T_{я} p^2 + T_{M1} p + K_i)}{Q(p)}. \quad (6)$$

Характеристический полином

$$Q(p) = T_{я} \frac{\alpha \varphi M_H}{2\sqrt{S} \omega_H} T_{M1} T_{M2} p^4 + \left(T_M T_{я} \frac{B_k \alpha \varphi}{2\sqrt{S}} + \frac{\alpha \varphi M_H}{2\sqrt{S} \omega_H} T_{M1} T_{M2} \right) p^3 + \\ + \left[T_M \left(T_{я} + \frac{B_k \alpha \varphi}{2\sqrt{S}} \right) + K_i \gamma \frac{\alpha \varphi M_H}{2\sqrt{S} \omega_H} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1} \right] p^2 + \left(T_M + \frac{B_k \alpha \varphi}{2\sqrt{S}} \right) p + K_i. \quad (7)$$

где $T_M = K_i T_{эм}$; $T_{эм}$ – электромеханическая постоянная времени электропривода;
 $K_i = U_H (J_H R_{я})^{-1}$; $T_M = T_{M1} + T_{M2}$.

Коэффициент соотношения масс системы определяется:

$$\gamma = (J_1 + J_2) \cdot J_1^{-1} = (T_{M1} + T_{M2}) \cdot T_{M1}^{-1} \quad (8)$$

Постоянная времени, которая соответствует периоду упругих колебаний системы (постоянная времени упругости)

$$T_y = \left[\frac{\alpha \varphi M_H}{2\sqrt{S} \omega_H} T_{M1} T_{M2} (T_{M1} + T_{M2})^{-1} \right]^{0,5} \quad (9)$$

Для анализа демпфирующего действия достаточно рассмотреть характеристический полином (7).

Получить аналитические зависимости для реализации максимального электромеханического демпфирования упругих колебаний можно следующим образом.

Согласно терминологии теории колебаний (рисунок 1) состоит из двух (МП и ЭП) подсистем; электрическая подсистема (ЭП) описывается характеристическим уравнением вида (контур 1):

$$T_{M1}T_{я}p^2 + T_{M1}p + K_i = 0. \quad (10)$$

Характер переходных процессов в ЭП зависит от коэффициента относительного демпфирования

$$\xi_{э} = 0,5\sqrt{T_{M1} / K_i T_{я}}, \quad (11)$$

и может быть колебательным ($0 < \xi_{э} < 1$) или аperiodическим ($\xi_{э} \geq 1$). Характеристическое уравнение механической подсистемы (МП) при учете вязкого трения (контур 2) имеет вид:

$$\gamma \frac{\alpha \varphi M_{н}}{2\sqrt{S}\omega_{н}} T_{M1}T_{M2}T_M^{-1} p^2 + \frac{B_k \alpha \varphi}{2\sqrt{S}} p + 1 = 0. \quad (12)$$

Относительный коэффициент демпфирования в МП

$$\xi_M = 0,5B_k \alpha \varphi (2\sqrt{S})^{-1} \left(\sqrt{\gamma} \sqrt{\frac{\alpha \varphi M_{н}}{2\sqrt{S}\omega_{н}} T_{M1}T_{M2}T_M^{-1}} \right)^{-1}. \quad (13)$$

При взаимосвязи процессов в МП и ЭП частоты будут отклоняться от свободных из-за наличия демпфирования. Из анализа условий существенного взаимодействия процессов в МП и ЭП по коэффициенту связанности получена зависимость

$$\frac{K_i}{T_{M1}T_{я}} = \frac{1}{K_{в} \frac{\alpha \varphi M_{н}}{2\sqrt{S}\omega_{н}} T_{M1}T_{M2}T_M^{-1}}, \quad (14)$$

означающая равенство парциальных частот, где $K_{в}$ – коэффициент взаимосвязанности процессов в ЭП и МП.

Совместное решение (11) и (14) дает следующие зависимости:

$$T_{я} = 0,5\sqrt{K_{в}} \sqrt{\frac{\alpha \varphi M_{н}}{2\sqrt{S}\omega_{н}} T_{M1}T_{M2}T_M^{-1}} \xi_{э}^{-1}; \quad (15)$$

$$T_{M1} = 2\xi_{э} K_i \sqrt{K_{в}} \sqrt{\frac{\alpha \varphi M_{н}}{2\sqrt{S}\omega_{н}} T_{M1}T_{M2}T_M^{-1}}. \quad (16)$$

Из выражения (13)

$$T_d = \frac{B_k \varphi \alpha}{2\sqrt{S}} = 2\xi_M \sqrt{\gamma} \sqrt{\frac{\alpha \varphi M_{н}}{2\sqrt{S}\omega_{н}} T_{M1}T_{M2}T_M^{-1}}. \quad (17)$$

При решении задачи демпфирования свободной составляющей движения правая часть характеристического полинома (6) приравняется нулю:

$$\begin{aligned}
 & T_{\gamma} \frac{\alpha \varphi M_{\gamma}}{2\sqrt{S}\omega_{\gamma}} T_{M1} T_{M2} p^4 + \left(T_M T_{\gamma} \frac{B_k \alpha \varphi}{2\sqrt{S}} + \frac{\alpha \varphi M_{\gamma}}{2\sqrt{S}\omega_{\gamma}} T_{M1} T_{M2} \right) p^3 + \\
 & + \left[T_M \left(T_{\gamma} + \frac{B_k \alpha \varphi}{2\sqrt{S}} \right) + K_i \gamma \frac{\alpha \varphi M_{\gamma}}{2\sqrt{S}\omega_{\gamma}} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1} \right] p^2 + \\
 & + \left(T_M + \frac{B_k \alpha \varphi}{2\sqrt{S}} \right) p + K_i = 0.
 \end{aligned} \tag{18}$$

Подстановка из (15), (16) и (17) значений T_{γ} , T_{M1} и T_d в уравнение (18) позволяет получить уравнение с обобщенными параметрами ξ_{γ} , ξ_M и K_{γ} при данных γ и T_{γ} [109, 110]:

$$\begin{aligned}
 & \gamma K_{\gamma} \left(\sqrt{\frac{\alpha \varphi M_{\gamma}}{2\sqrt{S}\omega_{\gamma}} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1}} \right)^4 p^4 + \\
 & + \left(2\gamma \sqrt{K_{\gamma}} \xi_{\gamma} + 2\gamma \sqrt{\gamma} K_{\gamma} \xi_M \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{\alpha \varphi M_{\gamma}}{2\sqrt{S}\omega_{\gamma}} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1}} \right)^3 p^3 + \\
 & + \left[4\xi_{\gamma} \xi_M \gamma \sqrt{\gamma K_{\gamma}} + \gamma(1 + K_{\gamma}) \right] \cdot \left(\frac{\alpha \varphi M_{\gamma}}{2\sqrt{S}\omega_{\gamma}} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1} \right) p^2 + \\
 & + 2 \left(\xi_{\gamma} \gamma \sqrt{K_{\gamma}} + \xi_M \sqrt{\gamma} \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{\alpha \varphi M_{\gamma}}{2\sqrt{S}\omega_{\gamma}} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1}} \right) p + 1 = 0.
 \end{aligned} \tag{19}$$

Уравнение свободного движения (19) описывает колебательный процесс, затухание которого зависит от ξ_{γ} , ξ_M и K_{γ} . Предельное значение демпфирующего действия достигается при равенстве вещественных и мнимых частей корней характеристических уравнений МП и ЭП, что указывает на равенство декрементов затухания в подсистемах.

Оптимальные значения K_{γ}^0 при предельном электромеханическом демпфировании определяются по выражению

$$\xi^0 = (\xi_{\gamma} - \xi_M) = \pm \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}. \tag{20}$$

Знак модуля в математическом выражении (20) физически означает факт преобладания демпфирования в ЭП ($\xi_{\gamma} > \xi_M$) или МП ($\xi_M > \xi_{\gamma}$), знаком "минус" учитываются случаи, когда в реальном электроприводе $\xi_{\gamma} > \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$ или $\xi_M > \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$. Таким образом, характеристическое уравнение (18) принимает вид:

$$\left[\begin{aligned} & \left(\frac{\alpha \varphi M_n}{2\sqrt{S\omega_n}} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1} \right) p^2 + \\ & + \sqrt{\gamma} (\xi_\varepsilon + \xi_M) \cdot \sqrt{\frac{\alpha \varphi M_n}{2\sqrt{S\omega_n}} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1}} \cdot p + 1 \end{aligned} \right] \times \quad (21)$$

$$\times \left[\begin{aligned} & \left(\frac{\alpha \varphi M_n}{2\sqrt{S\omega_n}} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1} \right) p + \\ & + \sqrt{\gamma} (\varepsilon_\varepsilon + \xi_M) \cdot \sqrt{\frac{\alpha \varphi M_n}{2\sqrt{S\omega_n}} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1}} p + 1 \end{aligned} \right] = 0.$$

Обобщенное уравнение (21) описывает затухающий колебательный процесс со следующими показателями:

$$\xi = 0,5\sqrt{\gamma} (\xi_\varepsilon + \xi_M) \quad (22)$$

$$\Omega = \sqrt{4 - \gamma (\xi_\varepsilon + \xi_M)^2} \left(2 \sqrt{\frac{\alpha \varphi M_n}{2\sqrt{S\omega_n}} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1}} \right)^{-1} \quad (23)$$

$$\mu = \sqrt{1 - \xi^2} / \xi \quad (24)$$

где ξ - коэффициент электромеханического демпфирования; Ω - частота демпфированных колебаний координат МП и ЭП; μ - колебательность.

Для конкретного случая реализации предельного значения необходимо соблюдать соотношение (2). Тогда

$$\left. \begin{aligned} & \sqrt{\gamma - 1} + 2\xi_M \sqrt{\gamma} = 2 \text{ при } \xi_\varepsilon > \xi_M; \\ & \sqrt{\gamma - 1} + 2\xi_\varepsilon \sqrt{\gamma} = 2 \text{ при } \xi_M > \xi_\varepsilon. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Подстановка K_ε^0 и ξ^0 в выражения для параметров ЭП и МП (15), (16) и (17) дает следующие зависимости для реализации предельного демпфирования для любого данного значения γ и T_y с учетом упруго-вязкости конвейера]:

$$\left. \begin{aligned} T_\varepsilon &= \frac{\frac{\alpha \varphi M_n}{2\sqrt{S\omega_n}} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1}}{\frac{B_k \alpha \varphi}{2\sqrt{S}} + 2\sqrt{\gamma - 1} \sqrt{\frac{\alpha \varphi M_n}{2\sqrt{S\omega_n}} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1}}}; \\ T_{M1} &= K_i \frac{\frac{B_k \alpha \varphi}{2\sqrt{S}} + 2\sqrt{\gamma - 1} \sqrt{\frac{\alpha \varphi M_n}{2\sqrt{S\omega_n}} T_{M1} T_{M2} T_M^{-1}}}{\gamma}; \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Коэффициент вязкости грузонесущего органа пластинчатого конвейера $B_k = 216,6$ кНс
5664

при номинальном моменте $M_n = 57,87$ кНм и скорости $w_n = 77,4$ рад/с. При значении конструктивного коэффициента $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-5}$ кН^{-0,5} и приведенной жесткости $C_{пр} = 11,83$ кНм постоянная времени $T_c = 0,06$ с., постоянная времени упруго-вязкости $T_d = 18,3$ с., а постоянная времени упругости $T_y = 0,16$ с. При этом коэффициент $K_i = 1,9$, а коэффициент соотношения масс приводных блоков $\gamma = 2$, коэффициент взаимосвязанности процессов в ЭП и МП $K_v = 0,86$, а коэффициент относительного демпфирования ξ составляет 0,91, и находится в пределах $0 < \xi < 1$, и показывает, что система совершает колебательный процесс. В результате проведенных расчетов установлено, что постоянная времени конвейера как электромеханической динамической системы составляет 18,3 с. с учетом упруго-вязкости грузонесущего органа. Период колебаний ТНО составляет 15,3 с. Степень колебательности $\mu = 0,45$.

Зависимости (21), (22) и (24), (25) дают представление о закономерностях электромеханического демпфирования в ЭМС с вязким трением и упругим звеном.

Список использованных источников

1 Тазабеков И.И., Балгабеков Т.К. Перспективы развития многоприводного пластинчатого конвейера на горнорудных предприятиях и определение основных параметров. Труды Международной конференции. 2001. - С.610-614.

2 Тазабеков И.И. Динамика функционирования компенсирующего устройства гидравлического действия // Труды университета. №2. -Алматы: Изд-во КазНТУ им. Сатпаева, 2003. - С.56-63.

3 Тазабеков И.И. Динамика функционирования цепных конвейеров с компенсацией уравнительных усилий // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию КарГТУ, – Караганды: Изд-во КарГТУ, 2003. - С.79-81.