

УДК 621.879

Р.М. Валиев

**АНАЛИЗ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С
ПИ и И РЕГУЛЯТОРАМИ ТОКА**

В работах [4,5] были проанализированы электромеханические системы (ЭМС) одноковшовых экскаваторов – мехлопат с различной структурой регуляторов тока. В частности было показано, что степень собственных операторов передаточных функций систем управления с ПИ – регулятором (Г–Д с ТВ) и И – регулятором (УВ–Д) тока одинакова и выше степени соответствующих собственных операторов систем управления с ПИД и ПИ – регуляторами тока. Высокая степень полученных полиномов затрудняет исследование свойств системы, и в частности ее демпфирующей способности, с помощью логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ). Поэтому для анализа демпфирующей способности таких ЭМС удобно использовать метод нормированных передаточных функций [1, 2, 3].

Проведем анализ демпфирующей способности ЭМС для двух случаев: без введения дополнительной гибкой отрицательной обратной связи по упругому моменту (ГООСН) и с введением дополнительной ГООСН.

Случай 1 (ГООСН отсутствует).

Собственные операторы передаточных функций обеих систем принимают вид:

$$D(p) = p^6 T_{pm} T_n T_r T_{12}^2 \frac{T_M}{\lambda_1} + p^5 T_{pm} (T_n + T_r) T_{12}^2 \frac{T_M}{\lambda_1} +$$

$$+ p^4 T_{pm} (T_n T_r + T_{12}^2) \frac{T_M}{\lambda_1} + p^3 (T_{pm} (T_n + T_r) + \lambda_2 T_{12}^2) \frac{T_M}{\lambda_1} + p^2 (T_{pm} \frac{T_M}{\lambda_1} + \gamma T_{12}^2) + p \lambda_2 \frac{T_M}{\lambda_1} + 1. \quad (1)$$

В то время как собственные операторы передаточных функций для тех же ЭМС, но с применением ПИ и ПИД – регуляторов тока имеют вид:

$$D(p) = p^5 \cdot T_n T_{PT} T_{12}^2 \frac{T_M}{\lambda_1} + p^4 \cdot T_{PT} T_{12}^2 \frac{T_M}{\lambda_1} + p^3 \cdot \frac{T_M}{\lambda_1} (T_n T_{PT} + T_{12}^2 \cdot \lambda_2) + p^2 \cdot (T_{PT} \frac{T_M}{\lambda_1} + T_{12}^2 \cdot \gamma) + p \cdot T_M \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + 1. \quad (2)$$

Проанализируем полученные выражения. Известно, что электромагнитная постоянная времени якорей двигателей постоянного тока (ДПТ) не превышает $T_r < 0,1$ с, а постоянная времени тиристорных преобразователей лежит в интервале $T_n = 0,005 \div 0,01$ с. Следовательно, можно утверждать, что произведение $T_n \cdot T_r$ мало и им можно пренебречь. Это тем более справедливо, когда данная величина стоит при производной в старшей степени полинома. После пренебрежения произведением $T_n \cdot T_r$, полином (1) преобразуется в полином вида:

$$\begin{aligned}
D(p) = & p^5 T_{pm} (T_n + T_r) T_{12}^2 \frac{T_m}{\lambda_1} + p^4 T_{pm} T_{12}^2 \frac{T_m}{\lambda_1} + \\
& + p^3 (T_{pm} (T_n + T_r) + \lambda_2 T_{12}^2) \frac{T_m}{\lambda_1} + \\
& + p^2 (T_{pm} \frac{T_m}{\lambda_1} + \gamma T_{12}^2) + p \lambda_2 \frac{T_m}{\lambda_1} + 1.
\end{aligned} \quad (3)$$

Как видно, полином (3) имеет ту же форму, что и (2). Отличие заключается в том, что в (2) малая некомпенсируемая постоянная времени $-T_n$, а полиноме (3) малая некомпенсируемая постоянная времени $-T_n + T_r$. То есть переходные процессы в системах, описываемых полиномами (1) и (2), должны протекать одинаково. Однако, есть основания утверждать, что в системах с ПИ – регулятором (Г–Д с ТВ) и И – регулятором (УВ–Д) тока (полином (1)) качество переходных процессов выше, чем в системах с ПИД и ПИ – регуляторами тока. Известно, что индуктивность не обладает диссипативными свойствами (это обусловлено параметром T_r) и ее обычно компенсируют в упругих системах. Качество переходных процессов определяется быстродействием контуров настроенных на “технический оптимум” и зависит от малой некомпенсируемой постоянной времени. В системах содержащих упругий элемент быстродействие уже зависит от постоянной времени колебаний двухмассовой электромеханической системы (ДЭМС). Увеличение малой некомпенсируемой постоянной времени (снижение быстродействия) контура тока благотворно сказывается на переходных процессах по току (моменту) [3, 6]. Кроме того, если не изменять быстродействие контура скорости, то можно получить удовлетворительные переходные процессы с достаточно большим коэффициентом затухания. Результаты моделирования на ЭВМ с применением пакета программ MatLab

(Simulink) подтверждают сделанные выводы [4, 5].

Рассмотренные выкладки сделаны с учетом того, что в существующей системе управления нежелательно или нет возможности введения дополнительной ГООСН, а также с учетом условия пренебрежения произведением $T_n \cdot T_r$. Однако, в настоящее время с развитием теории наблюдающих устройств и микропроцессорной техники, стало возможным введение дополнительной ГООСН. В то же время пренебрежение произведением $T_n \cdot T_r$ дает пусть и небольшую, но погрешность в исследованиях. Поэтому необходимо рассмотреть случай, когда в ЭМС введена дополнительная ГООСН и рассмотреть полином (1) без упрощения математического описания.

Случай 2 (введена ГООСН).

Собственные операторы передаточных функций обеих систем принимают вид:

$$\begin{aligned}
D(p) = & p^6 T_{pm} T_n T_r T_{12}^2 \frac{T_m}{\lambda_1} + p^5 T_{pm} (T_n + T_r) T_{12}^2 \frac{T_m}{\lambda_1} + \\
& + p^4 T_{pm} (T_n T_r + T_{12}^2) \frac{T_m}{\lambda_1} + p^3 (T_{pm} (T_n + T_r) + \lambda_2 T_{12}^2) \frac{T_m}{\lambda_1} + \\
& + p^2 (T_{pm} \frac{T_m}{\lambda_1} + T_n \frac{T_m}{\lambda_1} \frac{\gamma - 1}{\gamma} + \gamma T_{12}^2) + p \lambda_2 \frac{T_m}{\lambda_1} + 1.
\end{aligned} \quad (4)$$

Используя метод нормированных передаточных функций, получаем нормированный полином в виде:

$$\begin{aligned}
D_H(p) = & T^6 p^6 + T^5 \cdot 6\xi p^5 + \\
& + T^4 \cdot 3(1 + 4\xi^2) p^4 + T^3 \cdot 4\xi(3 + 2\xi^2) p^3 + \\
& + T^2 \cdot 3(1 + 4\xi^2) p^2 + T \cdot 6\xi p + 1.
\end{aligned} \quad (5)$$

Вводя обозначения, получаем:

$$\bullet \quad a = \frac{T_{PT}}{(T_r + T_n) \lambda_2}, \quad (6)$$

где a – коэффициент постоянной времени контура тока;

$$\bullet \quad \epsilon = \frac{T_M \lambda_2}{(T_r + T_n) \lambda_1}, \quad (7)$$

где \mathbf{e} – коэффициент постоянной времени контура скорости;

$$\bullet \quad \mathbf{a} \cdot \mathbf{e} = \frac{T_{PT} T_M}{(T_{\text{я}} + T_n)^2 \lambda_1}. \quad (8)$$

Представим собственный оператор передаточных функций (4) с учетом (6), (7), (8) в следующем виде:

$$\begin{aligned} D(p) = & p^6 \mathbf{a} \mathbf{e} T_n T_{\text{я}} T_{12}^2 (T_n + T_{\text{я}})^2 + \\ & + p^5 \mathbf{a} \mathbf{e} (T_n + T_{\text{я}})^3 T_{12}^2 + p^4 \mathbf{a} \mathbf{e} (T_n + T_{\text{я}})^2 \times \\ & \times (T_n T_{\text{я}} + T_{12}^2) + p^3 \mathbf{e} (T_n + T_{\text{я}}) (\mathbf{a} (T_n + T_{\text{я}})^2 + T_{12}^2) + \\ & + p^2 (\mathbf{a} \mathbf{e} (T_n + T_{\text{я}})^2 + T_n \frac{T_M \gamma - 1}{\lambda_1 \gamma} + \gamma T_{12}^2) + \\ & + p \mathbf{e} (T_n + T_{\text{я}}) + 1. \end{aligned} \quad (9)$$

Приравнявая коэффициенты нормированного полинома и собственного оператора передаточных функций при одинаковых степенях p и приводя систему к нормированному виду [1], получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \mathbf{a} \mathbf{e} \varepsilon_{12}^2 (1 + \varepsilon_{\text{я}})^2 = \varepsilon^6; \\ \mathbf{a} \mathbf{e} (1 + \varepsilon_{\text{я}})^3 \varepsilon_{12}^2 = \varepsilon^5 \cdot 6 \xi; \\ \mathbf{a} \mathbf{e} (1 + \varepsilon_{\text{я}})^2 (\varepsilon_{\text{я}} + \varepsilon_{12}^2) = \varepsilon^4 \cdot 3(1 + 4 \xi^2); \\ \mathbf{e} (1 + \varepsilon_{\text{я}}) (\mathbf{a} (1 + \varepsilon_{\text{я}})^2 + \varepsilon_{12}^2) = \varepsilon^3 \cdot 4 \xi (3 + 2 \xi^2); \\ (\mathbf{a} \mathbf{e} (1 + \varepsilon_{\text{я}})^2 + \varepsilon_{\text{я}} \frac{\varepsilon_M \gamma - 1}{\lambda_1 \gamma} + \gamma \varepsilon_{12}^2) = \varepsilon^2 \cdot 3(1 + 4 \xi^2); \\ \mathbf{e} (1 + \varepsilon_{\text{я}}) = \varepsilon \cdot 6 \xi, \end{cases} \quad (10)$$

В полученной системе уравнений неизвестными являются \mathbf{a} , \mathbf{e} , ξ , ε , $\varepsilon_{\text{я}}$, λ_1 .

Решение системы уравнений (10) приводит к следующему условию:

$$\xi^2 = \frac{\varepsilon_{12}^2 (\varepsilon_{\text{я}} + 1)^2}{12 \varepsilon_{\text{я}} (\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{\text{я}}) - 4 \varepsilon_{12}^2 (\varepsilon_{\text{я}} + 1)^2}. \quad (11)$$

Для того чтобы обеспечить выполнение условия $\xi \geq \frac{\sqrt{2}}{2}$ необходимо, чтобы:

$$\frac{\varepsilon_{12}^2 (\varepsilon_{\text{я}} + 1)^2}{12 \varepsilon_{\text{я}} (\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{\text{я}}) - 4 \varepsilon_{12}^2 (\varepsilon_{\text{я}} + 1)^2} \geq \frac{1}{2}. \quad (12)$$

Решение неравенства (12) приводит к следующей системе неравенств:

$$\begin{cases} \varepsilon_{12}^2 \geq \frac{2 \varepsilon_{\text{я}}^2}{\varepsilon_{\text{я}}^2 + 1}; \\ \varepsilon_{12}^2 \leq \frac{3 \varepsilon_{\text{я}}^2}{\varepsilon_{\text{я}}^2 - \varepsilon_{\text{я}} + 1}. \end{cases} \quad (13)$$

На ЭМС накладывается дополнительное условие по соотношению между постоянной времени консервативного звена и постоянной времени якорной цепи электродвигателя (при переходе от $\varepsilon \rightarrow T$) по сравнению с использованием полинома (3). Графическое решение системы неравенств (13) представлено на рисунке.

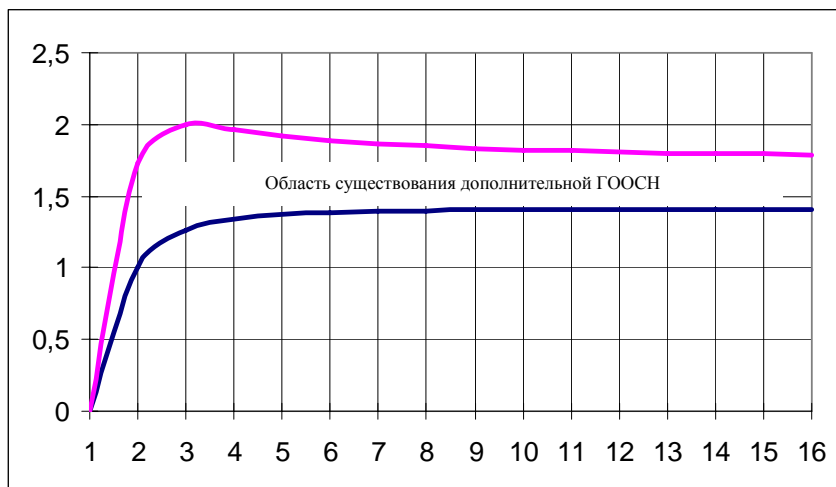
Из графической зависимости видно, что область соотношения между параметрами $\varepsilon_{\text{я}}$ и ε_{12} , при которых обеспечивается значение коэффициента затухания не менее $\frac{\sqrt{2}}{2}$, очень мала. То есть

условие (13) накладывает серьезное ограничение на параметры ЭМС. Кроме того, согласно условиям, принятым выше, а именно: $T_{\text{я}} < 0,1$ с, $T_n = 0,005 \div 0,01$ с, величина $\varepsilon_{\text{я}} = \frac{T_{\text{я}}}{T_n} < 10$, а согласно расчетов

величина относительной постоянной времени колебаний двухмассовой ЭМС экскаваторных электроприводов лежит в пределах $\varepsilon_{12} = 2,8 \div 8,3$.

Поэтому, из графической зависимости на рисунке видно, что ЭМС одноконтактных экскаваторов – мехлопат своими параметрами “не попадают” в область существования ГООСН, где обеспечивается

коэффициент затухания $\xi \geq \frac{\sqrt{2}}{2}$ при использовании соответственно ПИ и И – регуляторов тока для систем Г–Д с ТВ и УВ–Д. Очевидно, что дальнейшее решение (10) не имеет смысла, поскольку определенные в результате решения системы уравнений параметры не будут обеспе-



Область соотношения значений $\varepsilon_{я}$ и ε_{12} , при которых обеспечивается выполнение условия

$$\xi \geq \frac{\sqrt{2}}{2}$$

печивать необходимые демпфирующие свойства ЭМС одноковшовых экскаваторов – мехлопат. Из полученных соотношений можно сделать вывод, что учет большого количества факторов влияющих на демпфирующую способность электропривода, существенно сужает область применения дополнительных обратных связей, в данном случае ГООСН. Поэтому

необходимо предварительно установить какими факторами можно пренебречь (с наименьшей погрешностью) для исследования динамики упругих систем экскаваторов.

Необходимо отметить, что все выше полученные выкладки справедливы и для режима стопорения рабочего органа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ляхомский А.В., Фацциленко В.Н. Управление электромеханическими системами горных машин: Монография. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 296 с.
2. Справочник по автоматизированному электроприводу/ Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 606 с.
3. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
4. Валиев Р.М., Попельнюхов В.И., Фацциленко В.Н. Принципы построения структур управления экскаваторными электроприводами в стопорных режимах, ГИАБ, – М.: Изд-во МГГУ, 2006 г., с. 322-325.
5. Валиев Р.М., Попельнюхов В.И., Фацциленко В.Н. Анализ демпфирующих свойств экскаваторных электроприводов при управляющем воздействии, ГИАБ, – М.: Изд-во МГГУ, 2006 г., с. 334-338.
6. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. – Л.: Энергия, 1979. – 160 с.

Коротко об авторах

Валиев Р.М. – аспирант кафедры “Электрификация и энергоэффективность горных предприятий”, Московский государственный горный университет.