

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСВЯЗНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ УПРУГИХ ЗВЕНЬЕВ

*В. М. Чермалых, д.т.н., проф., Е. И. Алтухов, к.т.н., доц.,
А. В. Данилин, к.т.н., доц., А. В. Босак, инж.
Национальный технический университет Украины «КПИ»
пр. Победы, 37, 03057, г. Киев, Украина
E-mail: auek@ukr.net*

Рассматривается вопрос моделирования многосвязной электромеханической системы с упругими звеньями, управляемой с помощью регулятора, параметры которого определены по идентифицированной передаточной функции.

Ключевые слова: многосвязная электромеханическая система, упругие звенья, моделирование.

Введение. Электромеханические системы грузоподъемных и транспортных установок в большинстве требуют позиционного управления рабочим органом (шахтные подъемные установки, различные грузоподъемные краны, подвесные канатные дороги, промышленные манипуляторы). Значительный интерес представляет моделирование таких установок с учетом упругости звеньев с распределенными параметрами в линии передач. Наиболее общей системой такого типа установок является двухконцевая подъемная установка глубокого шахта, в которой упругие деформации подъемных каналов определяют сложность и многосвязность структуры системы.

Для реализации системы позиционного управления с точным остановом в заданном положении в таких установках должно быть компенсировано влияние упругих деформаций канатов на перемещение рабочих органов (концевых масс). Динамика электромеханических систем с канатными передачами достаточно изложена в монографиях [1, 2].

В данной работе рассматривается вопрос моделирования системы позиционного управления, которое, как правило, должно предшествовать реальному проектированию таких установок.

Анализ предыдущих исследований. Исследованию сложных промышленных установок с упругими звеньями, как многосвязных электромеханических систем посвящено большое количество работ, в которых рассматриваются, главным образом, вопросы, относящиеся к определению динамических нагрузок в отдельных звеньях без учета многосвязности их соединения и возможности упрощения динамических моделей для синтеза оптимальных режимов работы [3, 4]. Результаты выполненных исследований были ориентированы на использование строгих аналитических зависимостей при построении управляющих устройств, что не позволяет с достаточной точностью выбрать структуру системы управления из-за непостоянства значений параметров и сложности структуры отдельных звеньев.

Цель работы. Построение и моделирование позиционной многосвязной системы управления с идентифицированной передаточной функцией объекта управления.

Материал и результаты исследования. В качестве объекта управления принята электромеханическая силовая часть двухконцевой подъемной установки с электроприводом постоянного тока по системе ТП-Д, структурная схема которой показана на рис. 1.

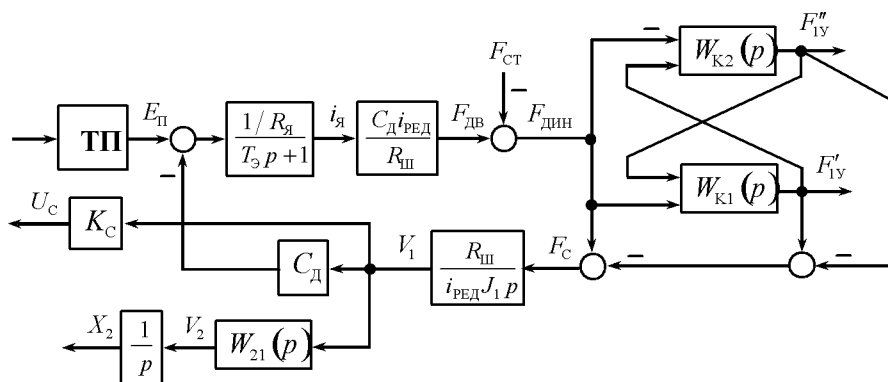


Рисунок 1 – Структурная схема силовой части электропривода с упругими звеньями

На рис. 1 приняты обозначения: ТП – управляемый тиристорный преобразователь; $R_я$, $T_э$, $C_д$, J_1 – соответственно активное сопротивление, электромагнитная постоянная времени, коэффициент пропорциональности момента двигателя, приведенный момент инерции звеньев с вращательным движени-

ем; $R_ш$ – радиус канатоведущего шкива; $i_ред$ – передаточное число редуктора; $W_{к1}(p)$, $W_{к2}(p)$, $W_{21}(p)$ – линеаризованные передаточные функции упругих звеньев с распределенными параметрами.

$$W_{K1}(p) = \frac{K_{m\pi} (T_{\pi 2}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1)}{T_{\pi 1}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1};$$

$$W_{K2}(p) = \frac{K_{m\sigma} (T_{02}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1)}{T_{01}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1};$$

$$W_{21}(p) = \frac{\omega_k^2}{p^2 + \mu_k \omega_k^2 + \omega_k^2};$$

где $K_{m\pi} = \frac{\alpha_{11}(1+\alpha_{12})}{\alpha_{11}+\alpha_{12}+\alpha_{11}\alpha_{12}}$; $K_{m\sigma} = \frac{\alpha_{21}(1+\alpha_{23})}{\alpha_{21}+\alpha_{23}+\alpha_{21}\alpha_{23}}$;

$$T_{\pi 1}^2 = \frac{1}{b_{k1}^2} \left(1 + \frac{4 + \alpha_{11} + \alpha_{12}}{\alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_{11}\alpha_{12}} \cdot \frac{\pi^2}{4} \right);$$

$$T_{01}^2 = \frac{1}{b_{k2}^2} \left(1 + \frac{4 + \alpha_{21} + \alpha_{23}}{\alpha_{21} + \alpha_{23} + \alpha_{21}\alpha_{23}} \cdot \frac{\pi^2}{4} \right);$$

$$T_{\pi 2}^2 = \frac{1}{b_{k1}^2} \left(1 + \frac{1}{1 + \alpha_{12}} \cdot \frac{\pi^2}{4} \right); \quad T_{02}^2 = \frac{1}{b_{k2}^2} \left(1 + \frac{1}{1 + \alpha_{23}} \cdot \frac{\pi^2}{4} \right);$$

$$\omega_{k1}^2 = b_{k1}^2 \left(1 + \frac{\pi^2}{4} + \frac{\pi^2}{\alpha_{12}} \right);$$

$$b_{k1} = \frac{\pi a_k}{l_1}; \quad b_{k2} = \frac{\pi a_k}{l_2}; \quad \alpha_{11} = \frac{m_{k1}}{m_1};$$

$$\alpha_{12} = \frac{m_{k1}}{m_2}; \quad \alpha_{21} = \frac{m_{k2}}{m_1}; \quad \alpha_{23} = \frac{m_{k2}}{m_3};$$

l_1, l_2 – длины ветвей подъемных канатов поднимающегося и опускающегося конечных грузов; m_{k1}, m_{k2} – массы ветвей l_1 и l_2 ; m_1 – приведенная масса вращающихся механических звеньев; m_2, m_3 – массы конечных грузов; a_k – скорость распространения упругой деформации вдоль канатов.

Реакцией упругой системы на электропривод является результирующее усилие F_C , определяемое подсистемой с перекрестными связями;

$$F_C(p) = F_{\text{ДИН}}(p)W_{\text{ПО}}(p) = \frac{(1-W_{K1}(p))(1-W_{K2}(p))}{1-W_{K1}(p)W_{K2}(p)}, \quad (1)$$

в установившемся режиме

$$F_{C, \text{УСТ}} = F_{\text{ДИН}} \frac{(1-K_{m\pi})(1-K_{m\sigma})}{1-K_{m\pi}K_{m\sigma}}. \quad (2)$$

Упрощенная структурная схема системы позиционного управления приведена на рис. 2.

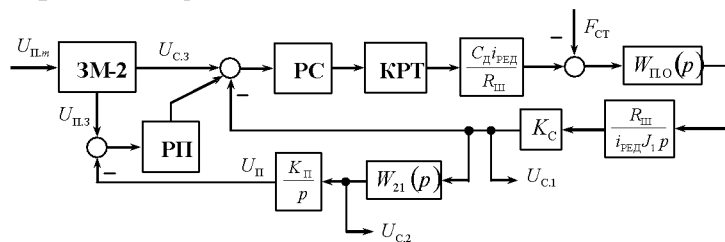


Рисунок 2 – Структурная схема системы позиционного управления

Задающая модель 3М-2 формирует сигналы заданной скорости $U_{ц3}$ и заданного перемещения $U_{п3}$. КРТ – контур регулятора тока с

ПИ-регулятором. Моделирование выполнялось в интерактивной среде MATLAB. Simulink-модель системы показана на рис. 3.

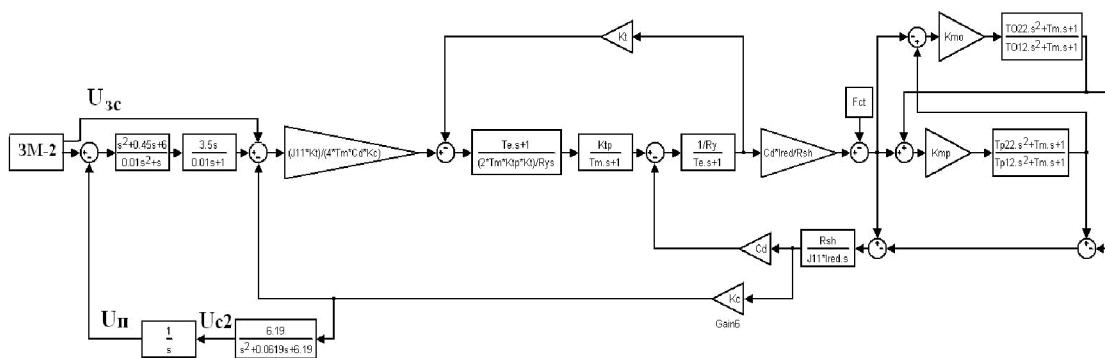


Рисунок 3 – Simulink-модель системы позиционного управления

При отсутствии регулятора перемещения ПИ и подачи на вход постоянного сигнала $U_{ц3} = 10$ выходной сигнал $U_{ц2}$ будет колебательным. При заданных значениях: $R_{ш} = 0,025$ Ом; $T_{ш} = 0,06$ с; $C_{д} = 8,5$ рад/с; $i_{ред} = 10,5$; $R_{ш} = 2,5$ м;

$J_1 = 2470$ кг·м²; $\alpha_{11} = 0,906$; $\alpha_{12} = 1,14$; $\alpha_{21} = 0,0272$; $\alpha_{23} = 0,018$; $T_{\mu} = \mu_k = 0,005 \dots 0,01$ с; $a_k = 4000$ м/с; $l_{k1} = 1450$ м; $l_{k2} = 45$ м изменение $U_{ц2}(t)$ представляется графиком рис. 4.

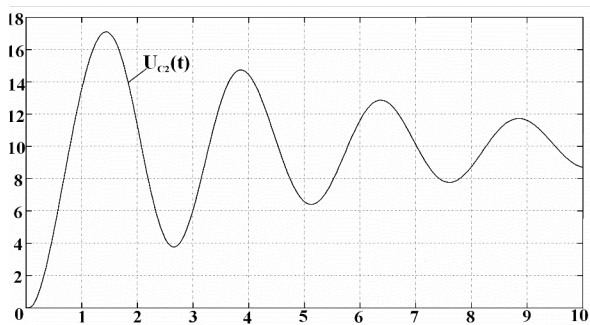


Рисунок 4 – Изменение сигнала U_{C2} при ступенчатом приложении сигнала U_{C3}

Согласно приведенному графику видно, что переходному процессу соответствует передаточная функция второго порядка вида

$$W(p) = \frac{K}{a_0 p^2 + a_1 p + 1}. \quad (3)$$

Поэтому для синтеза параметров регулятора положения необходимо определить идентифицированную передаточную функцию рассматриваемой системы управления. Для этого воспользуемся цифровой моделью желаемой передаточной функции (3).

Эта передаточная функция, используя соотношение $p^{-1} = 0,5T(z+1)/(z-1)$, имеет вид:

$$W(z) = \frac{B(1 + 2z^{-1} + z^{-2})}{1 - A_1 z^{-1} - A_2 z^{-2}}. \quad (4)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} B &= KT^2 / (4a_0 + 2a_1 T + T^2); \\ A_1 &= B(8a_0 + 2T^2) / KT^2; \\ A_2 &= B(2Ta_1 - 4a_0 - T^2) / KT^2, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где T – период дискретности, с. K – коэффициент усиления, определяемый отношением установившегося значения U_{C2}/U_{C3} .

Представив выражение (4) схемой в переменных состояния и составив систему уравнения для пяти смежных ординат кривой (рис. 4), определяем коэффициенты A_1 и A_2 [5]:

$$A_1 = \frac{(y_{n+2} - y_{n+1})(y_{n-1} - y_{n-2}) - (y_{n+1} - y_n)(y_n - y_{n-1})}{(y_{n+1} - y_n)(y_{n-1} - y_{n-2}) - (y_n - y_{n-1})^2}; \quad (8)$$

$$A_2 = \frac{(y_{n+1} - y_n)^2 - (y_{n+2} - y_{n+1})(y_n - y_{n-1})}{(y_{n+1} - y_n)(y_{n-1} - y_{n-2}) - (y_n - y_{n-1})^2}; \quad (7)$$

В (6), (7) приняты обозначения $y = U_{C2}$. Используя коэффициенты A_1 и A_2 , определяют параметры a_0 и a_1 непрерывной передаточной функции по уравнениям (5): $a_0 = 0,166$; $a_1 = 0,0747$; $K = 1,0$.

Тогда идентифицированная передаточная функция системы по отношению к скорости поднимаемого концевого груза будет равна:

$$W_2^*(p) = \frac{6,02}{p^2 + 0,45p + 6,02} = \frac{U_{C2}^*(p)}{U_{C3}(p)}. \quad (8)$$

По данной передаточной функции выбираются параметры ПИД-регулятора положения:

$$W_{PI}(p) = \frac{(T_D K_{II} + K_D) p^2 + (T_D K_{II} + K_{II}) p + K_{II}}{p(T_D p + 1)},$$

где K_{II} , K_{II} , K_D – коэффициенты соответственно пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-регулятора; T_D – постоянная времени дифференцирующего звена.

Для доказательства достоверности идентифицированной передаточной функции сравним выходной сигнал U_{C2} системы управления по скорости и выходной сигнал U_{C2}^* на выходе идентифицированного звена при подаче на оба входа постоянного сигнала $U_{C3} = 10$. Графики $U_{C2}(t)$ и $U_{C2}^*(t)$ приведены на рис. 5.

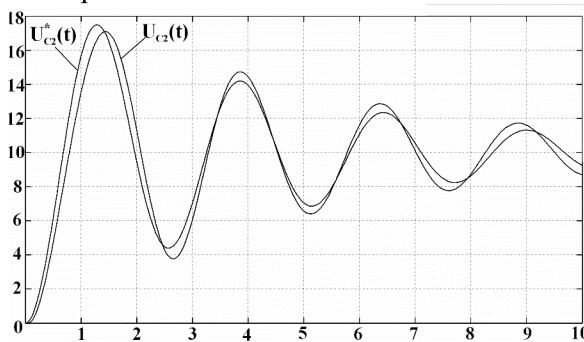


Рисунок 5 – Сравнение сигналов U_{C2} и U_{C2}^* в переходном режиме

Сравнение приведенных графиков свидетельствует о достаточно точном их совпадении. Поэтому параметры ПИД-регулятора соответствуют требуемому режиму позиционного управления.

На рис. 6 показано, что действительное положение концевого груза достигает заданного с высокой точностью при отсутствии упругих колебаний.

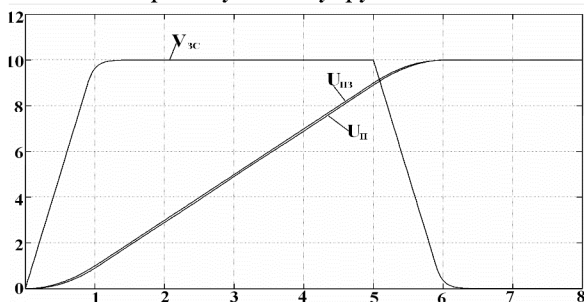


Рисунок 6 – Графики изменения сигналов заданного $U_{PI.3}$ и действительного U_{PI} перемещений

Выводы. В заключение отметим, что использование идентифицированной передаточной функции системы с упругими связями для синтеза параметров ПИД-регулятора обеспечивает стабильное вос-

произведение заданного перемещения и точную остановку в заданном положении рабочего органа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чермалых В.М., Родькин Д.И., Каневский В.В. Системы электропривода и автоматики рудничных стационарных машин и установок. – М.: Недра, 1976. – 398 с.

2. Киричок Ю.Г., Чермалых В.М. Привод шахтных подъемных установок большой мощности. – М.: Недра, 1972. – 336 с.

3. Чермалых А.В., Данилин А.В., Майданский И.Я. Моделирование системы оптимального по динамическим нагрузкам управления электроприводом // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал – Вип. 1/2007 (1). – Кременчук: КДПУ, 2007. – С. 61 – 65.

4. Чермалых В.М., Алтухов Е.И., Данилин А.В., Козаченко А.В. Моделирование сложных электро-

механических систем с переменной частотой упругих колебаний // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 3/2008 (50), част. 1. – С. 168 – 171.

5. Чермалых В.М., Чермалых А.В., Майданский И.Я., Прядко С.Л. Идентификация параметров на основе Z-преобразования и оптимизация управления электромеханическими системами с упругими звеньями // Журнал «Промелектро». – Киев, ТОВ «ДІА». – 2007. – № 5/2007. – С. 6 – 11.

6. Дьяконов В. Simulink-4. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002. – 228 с.

Стаття надійшла 13.09.2011 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Чорним О.П.

МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОЗВ'ЯЗКОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРУЖНИХ ЛАНОК

В. М. Чермалых, д.т.н., проф., Є. І. Алтухов, к.т.н., доц.,

О. В. Данілін, к.т.н., доц., А. В. Босак, інж.

Національний технічний університет України «КПІ»

пр. Перемоги, 37, 03057, м. Київ, Україна

E-mail: auek@ukr.net

Розглядається питання моделювання багатозв'язкової електромеханічної системи з пружними ланками, що керується за допомогою регулятора, параметри якого визначені за ідентифікованою передавальною функцією.

Ключові слова: багатозв'язкова електромеханічна система, пружні ланки, моделювання.

MODELING OF THE MULTIPLY ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH DISTRIBUTED PARAMETERS OF DAMPER LINKS

V. Chermalykh, Doc. Sc. (Tech.), Prof., E. Altukhov, Cand. of Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

A. Danilin, Cand. of Sc. (Tech.), Assoc. Prof., A. Bosak, eng.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

Peremogy Av., 37, 03057, Kyiv, Ukraine

E-mail: auek@ukr.net

Under consideration is the modelling of the multiply electromechanical system with damper links controlled by means of the regulator, which parameters are defined by the identified transfer function.

Key words: multiply electromechanical system, damper links, modeling.