

УДК 62.83.52

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ

Чермалых В.М., д.т.н., проф., Алтухов Е.И., к.т.н., доц., Данилин А.В., к.т.н., доц.
Козаченко А.В., инж.

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"
03057, г. Киев, пр. Победы, 37

E-mail: ivanmaidansky@gmail.com

У статті на прикладі шахтної підйомної установки, як складної електромеханічної системи показано доцільність побудови структурних схем з використанням лінеаризованих передавальних функцій пружних ланок з параметрами, що розподіленні, та на їх основі досліджені перехідні процеси методом моделювання.

Ключові слова: пружні ланки, передавальні функції, частота коливань.

In the clause on an example of mine elevating installation as complex electromechanical system the expediency of construction of block diagrams is shown, using transfer functions of elastic parts with the distributed parameters, and on their basis transients by a method of modelling are investigated.

Key words: elastic parts, transfer function, frequency of fluctuations.

Введение. В работе на примере шахтной статически уравновешенной подъемной установки рассматривается сложная электромеханическая система с упругими механическими звеньями, параметры которых меняются в зависимости от заданного режима рабочего цикла и начального соотношения параметров. Главным параметром является частота свободных механических колебаний, от которых зависит формирование оптимальных задающих воздействий по критериям минимальных потерь энергии, максимального быстродействия или минимальных динамических нагрузок.

Анализ предыдущих исследований. Исследованию подъемных установок как сложных электромеханических систем посвящено большое количество работ, в которых рассмотрены вопросы, главным образом, относящиеся к определению динамических нагрузок в отдельных звеньях. Уделялось внимание также созданию систем управления, учитывающих динамику упругих систем [1]. Однако в этих работах не исследовано влияние начальных значений параметров, определяющих частоту колебаний в моменты приложения движущего или тормозного момента.

Цель работы – обоснование целесообразности использования задающей модели второго порядка (ЗМ2) в электромеханических системах с упругими звеньями путем непрерывного контроля частоты возможных свободных колебаний; выбор соответствующих ограничений в системе управления в моменты приложения движущего или тормозного усилия.

Материал и результат исследования. В качестве объекта управления принята статически уравновешенная подъемная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1 [2].

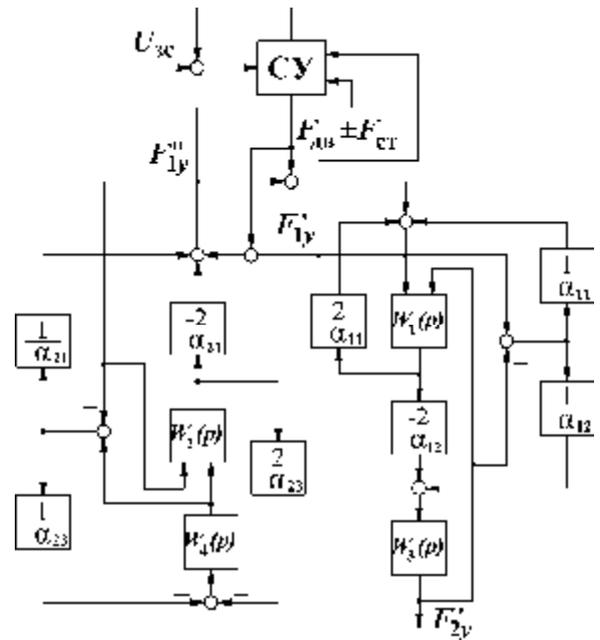


Рисунок 1 – Структурная схема статически уравновешенной подъемной установки

На рис. 1 коэффициенты α_{ij} являются отношениями распределенных масс поднимающихся и опускающихся ветвей головного и уравновешивающего канатов к сосредоточенным массам; F_{1y}' , F_{1y}'' , F_{2y}' , F_{2y}'' – динамические составляющие усилий, действующих на сосредоточенные массы со стороны упругих звеньев; W_1 , W_2 , W_3 , W_4 – линейризованные передаточные функции всех ветвей как упругих звеньев с распределенными параметрами.

В результаті послідовального переносу зв'язей і заміни участків схеми, охоплених обратними зв'язями, еквівалентними звеньями, получается структурная схема, в которой зависимости F_{1y}^i и F_{1y}^{ii} от движущего усилия $F_{дин} = F_{дв} - F_{ст}$ и параметров системы представляются двумя передаточными функциями $W_{кп}(p)$ и $W_{ко}(p)$ с перекрестными связями (рис. 2).

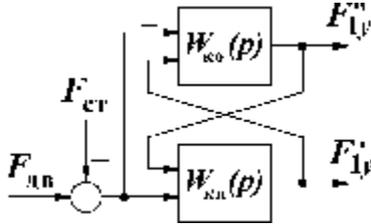


Рисунок 2 – Структурная схема упругой системы с перекрестными связями

$$W_{кп}(p) = \frac{\alpha_{11}(b_0'p^4 + b_1'p^3 + b_2'p^2 + b_3'p + b_4')}{a_0'p^4 + a_1'p^3 + a_2'p^2 + a_3'p + a_4'}; \quad (1)$$

$$W_{ко}(p) = \frac{\alpha_{21}(b_0''p^4 + b_1''p^3 + b_2''p^2 + b_3''p + b_4'')}{a_0''p^4 + a_1''p^3 + a_2''p^2 + a_3''p + a_4''}, \quad (2)$$

где:

$$b_0' = \left(1 + \frac{\pi^2}{4}\right) \left(1 + \alpha_{12} + \alpha_{32} + \frac{\pi^2}{4}\right);$$

$$b_1' = A' \mu_k + B' \mu_x;$$

$$b_2' = A' + B' + b_4' \mu_k \mu_x;$$

$$b_3' = b_4' (\mu_k + \mu_x);$$

$$b_4' = (1 + \alpha_{12} + \alpha_{32}) b_{k1}^2 b_{k3}^2;$$

$$A' = \left[\left(1 + \frac{\pi^2}{4}\right) (1 + \alpha_{12}) + \alpha_{32} \right] b_{k1}^2;$$

$$B' = \left[\left(1 + \frac{\pi^2}{4}\right) (1 + \alpha_{32}) + \alpha_{12} \right] b_{k3}^2;$$

$$b_0'' = \left(1 + \frac{\pi^2}{4}\right) \left(1 + \alpha_{23} + \alpha_{43} + \frac{\pi^2}{4}\right);$$

$$b_1'' = A'' \mu_k + B'' \mu_x;$$

$$b_2'' = A'' + B'' + b_4'' \mu_k \mu_x;$$

$$b_3'' = b_4'' (\mu_k + \mu_x);$$

$$b_4'' = (1 + \alpha_{23} + \alpha_{43}) b_{k2}^2 b_{k4}^2;$$

$$A'' = \left[\left(1 + \frac{\pi^2}{4}\right) (1 + \alpha_{23}) + \alpha_{43} \right] b_{k2}^2;$$

$$B'' = \left[\left(1 + \frac{\pi^2}{4}\right) (1 + \alpha_{43}) + \alpha_{23} \right] b_{k4}^2;$$

$$a_0' = \left[\alpha_{11} + (4 + \alpha_{11}) \frac{\pi^2}{4} \right] \left(1 + \alpha_{32} + \frac{\pi^2}{4}\right) +$$

$$+ \alpha_{12} \left[\left(1 + \alpha_{11} + \frac{\pi^2}{4}\right) \left(1 + \frac{\pi^2}{4}\right) \right];$$

$$a_1' = C' \mu_x + D' \mu_k;$$

$$a_2' = C' + D' + \alpha_{41} \mu_k \mu_x;$$

$$a_3' = \alpha_{41} (\mu_k + \mu_x);$$

$$a_4' = (\alpha_{11} + \alpha_{11} \alpha_{12} + \alpha_{12} + \alpha_{11} \alpha_{32}) b_{k1}^2 b_{k3}^2;$$

$$C' = \left[\left[\alpha_{11} + \alpha_{11} \frac{\pi^2}{4} + \pi^2 \right] (1 + \alpha_{32}) + \right. \\ \left. + \alpha_{12} \left[\left(1 + \alpha_{11} + \frac{\pi^2}{4}\right) \right] \right] b_{k3}^2;$$

$$D' = \left[\left[\left(1 + \frac{\pi^2}{4}\right) (\alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_{11} \alpha_{12}) + \alpha_{11} \alpha_{32} \right] b_{k1}^2 \right];$$

$$a_0'' = \left[\alpha_{21} + (4 + \alpha_{21}) \frac{\pi^2}{4} \right] \left(1 + \alpha_{43} + \frac{\pi^2}{4}\right) +$$

$$+ \alpha_{23} \left[\left(1 + \alpha_{21} + \frac{\pi^2}{4}\right) \left(1 + \frac{\pi^2}{4}\right) \right];$$

$$a_1'' = C'' \mu_x + D'' \mu_k;$$

$$a_2'' = C'' + D'' + \alpha_{42} \mu_k \mu_x;$$

$$a_3'' = \alpha_{42} (\mu_k + \mu_x);$$

$$a_4'' = (\alpha_{21} + \alpha_{21} \alpha_{23} + \alpha_{23} + \alpha_{21} \alpha_{43}) b_{k2}^2 b_{k4}^2;$$

$$C'' = \left[\left[\alpha_{21} + \alpha_{21} \frac{\pi^2}{4} + \pi^2 \right] (1 + \alpha_{43}) + \right. \\ \left. + \alpha_{23} \left[\left(1 + \alpha_{21} + \frac{\pi^2}{4}\right) \right] \right] b_{k4}^2;$$

$$D'' = \left[\left[\left(1 + \frac{\pi^2}{4}\right) (\alpha_{21} + \alpha_{23} + \alpha_{21} \alpha_{23}) + \alpha_{21} \alpha_{43} \right] b_{k2}^2 \right];$$

Главным в построении системы управления (СУ) является обеспечение с достаточной точностью передачи сигнала заданного тока до движущего момента для возможности формирования желаемого изменения момента в переходных режимах. Это может быть достигнуто применением ПИД-регулятора тока, синтезированного с учетом внутренней обратной связи по ЭДС двигателя, рассматривая систему как абсолютно жесткую.

Передаточная функция ПИД-регулятора тока по отношению к выходному напряжению $U_{п}$ тиристорного преобразователя

$$W_T(p) = \frac{i_a(p)}{U_{п}(p)} = \frac{T_M p}{R_{я} (T_{\gamma} T_M p^2 + T_M p + 1)}, \quad (3)$$

где T_3 – электромагнитная постоянная времени;
 T_M – электромеханическая постоянная времени по общему моменту инерции всей системы. Передаточная функция регулятора $W_p(p) = 1/W_T(p)$.

Моделирование рассматриваемой системы возможно по схемам рис. 1 или рис. 2 с учетом зависимостей (1), (2). Более просто это достигается при использовании схемы рис. 1.

SIMULINK-модель электромеханической уста-

новки с приводом постоянного тока и системой подчиненного регулирования с ПИД-регулятором тока и ПИ-регулятором скорости представлена на рис. 3. Управляющие сигналы скорости U_c и тока U_T формируются в ЗМ-2. Период заданного нарастания (снижения) ускорения принят равным периоду собственных колебаний системы, т.е. реализован близкий к оптимальному по динамическим нагрузкам режим.

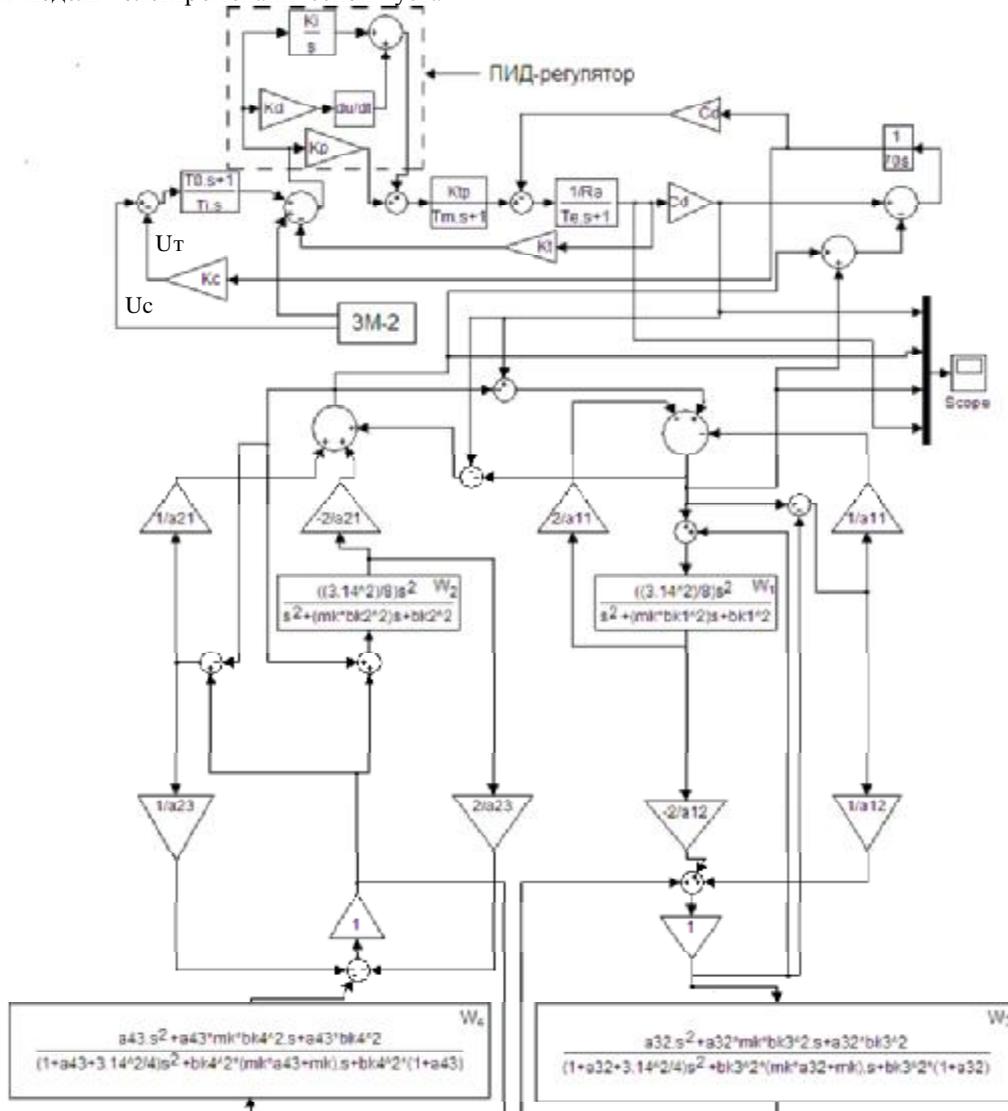


Рисунок 3 – SIMULINK-модель статически уравновешенной системы подъема с электроприводом

Графики, полученные в результате компьютерного моделирования, приведены на рис. 4. Их анализ показывает, что на скорость канатопроводящего шкива V_1 практически не оказывают влияния механические колебания. Поэтому целесообразно для построения системы управления, учитывающей колебательные процессы, рассматривать колебания скорости подъемного сосуда V_2 по отношению к скорости V_1 .

Частота колебаний подъемных сосудов относи-

тельно канатопроводящего шкива при условии малого влияния колебательных процессов на его скорость V_1 определяется по упрощенному выражению [3].

$$\omega_{ko} = \frac{\pi \cdot a_k}{l_k} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{4\alpha_{12}}}}, \quad (4)$$

где a_k - скорость распространения упругих деформаций вдоль каната; l_k - длина ветви каната между ведущим шкивом и подъемным сосудом;

$\alpha_{12} = m_k / m_2$ - отношение массы ветви каната к массе подъемного сосуда. Согласно выражению (4) l_k и α_{12} зависят от длины l_k , т.е. от перемещения подъемного сосуда. Так для статически уравновешенной подъемной установки $l_k = l_{k0} - x$; $m_k = m_{k0} + (l_{k0} - x)q$; $m_2 = m_{20} + qx$, где l_{k0} , m_{20} - начальные значения данных параметров, q - масса 1 м головного и уравновешивающего канатов; x - пройденный путь с начала рабочего цикла. Для неуравновешенной системы подъема - $m_2 = m_{20} = \text{const}$.

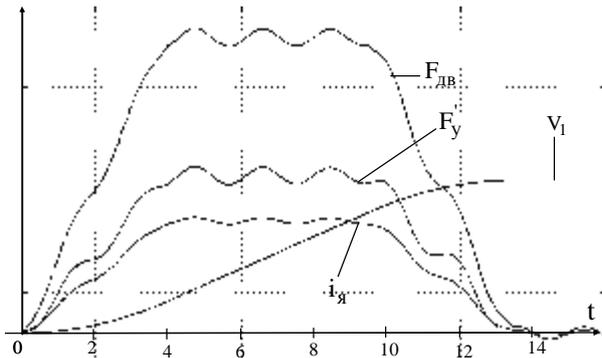


Рисунок 4 – Графики изменения скорости (V_1), движущего усилия ($F_{дв}$), тока ($i_{я}$) и динамического усилия в упругом звене (F'_{1y})

На рис. 5 приведены графики изменения частоты относительных колебаний с параметрами реальной подъемной установки при оптимальном по динамическим нагрузкам режиме.

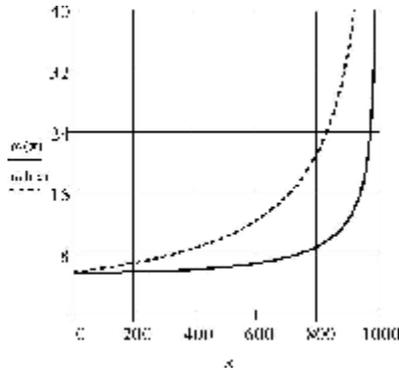


Рисунок 5 – Изменение частоты колебаний в уравновешенной (ω) и неуравновешенной (ω_1) системах

Как следует из графиков, в статически уравновешенной системе, благодаря уравновешивающей ветви каната, частота в рабочем диапазоне l_k мало изменяется. Поэтому для выбора оптимальных

настроечных параметров ЗМ-2 можно считать частоту $\omega(x)$ постоянной в диапазоне $x = 0 \dots 800$ м, а на остальном участке учитывать непрерывное изменение частоты. В неуравновешенной системе необходимо осуществить непрерывный контроль $\omega_1(x)$ во всем диапазоне. Изменение параметров ЗМ-2 должно происходить в момент пуска системы по соответствующей при данном значении x частоте. После чего параметры ЗМ-2 не меняются до следующего пуска. Корректировка момента производится и в момент начала торможения при остановке. Пройденный путь должен измеряться цифровым датчиком положения.

Предлагаемая система управления ориентирована на применение микроконтроллера, осуществляющего контроль частоты по реальному перемещению подъемных сосудов, а также определение периода колебаний, по которому осуществляется изменение настроечных параметров ЗМ по сигналу пуска или торможения.

Выводы. 1. Поскольку реализация оптимальных по динамическим режимам электромеханических систем обеспечивается соответствующим формированием движущего момента [4], при переменной частоте упругих колебаний требуется по перемещению рабочего органа машины определять частоту возможных колебаний в момент пуска (торможения).

2. Ввиду того, что в замкнутой системе управления на скорость ведущего звена практически не влияют упругие колебания, целесообразно построение системы управления производить по относительным колебаниям ведомого упругой связью звена.

3. При практической реализации системы управления с учетом переменной частоты упругих колебаний по зависимости (4) целесообразно этот параметр уточнять методом идентификации переходной характеристики, полученной экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чермалых В.М., Родькин Д.И., Каневский В.В. Системы электропривода и автоматики рудничных стационарных машин и установок. – М.: Недра, 1976. – 400 с.
2. Чермалых В.М. Исследование сложных электромеханических систем. – К.: КПИ, 1979. – 64 с.
3. Киричок Ю.Г., Чермалых В.М. Привод шахтных подъемных установок большой мощности. – М.: Недра, 1972. – 336 с.
4. Чермалых А.В., Данилин А.В., Майданский И.Я. Моделирование систем оптимального по динамическим нагрузкам управления электроприводом // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук, 2007. – С. 61-65.

Стаття надійшла 17.04.2008 р.