

УДК 622.6

Бурков Д.В. студент, керівник Пермяков В.Н.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
Киев, Украина

**Цифровая модель регулируемого электропривода шахтной подъемной установки с упругим тяговым органом**

У цій роботі вирішується завдання урахування пружності підйомних канатів при дослідженні динаміки роботи статично врівноваженої шахтної підйомної установки. Побудована цифрова модель з урахуванням розподілених параметрів механічної системи.

В этой работе решается задача учета упругости подъемных канатов при исследовании динамики работы статически уравновешенной шахтной подъемной установки. Построена цифровая модель с учетом распределенных параметров механической системы.

In this paper we solve the problem taking into account the elastic ropes in the investigation of the dynamics of a statically balanced mine hoisting installation. Constructed a digital model taking into account the distributed parameter mechanical system.

Значительную часть транспортных средств, применяемых на горных предприятиях, составляют установки с упругими тяговыми органами в виде стальных канатов (подъемные установки, подвесные канатные дороги). Оптимизация управления в периоды пуска и останова таких систем наиболее просто осуществляется за счет комбинированного управления с использованием каскадного включения регуляторов контролируемых координат (перемещения, скорости, ускорения) в сочетании с разомкнутыми компенсирующими каналами управления [1]. При этом замкнутые контуры обеспечивают статическую точность и устойчивость системы регулирования, а разомкнутые каналы – оптимизацию переходных процессов по быстродействию и динамическим нагрузкам при ограничениях, накладываемых на определенные координаты. В основе комбинированных систем лежат задающие устройства высоких порядков.

Особенностью исследования подъемных установок шахт является наличие упругих звеньев с распределенными параметрами значительной податливости. Наличие данных упругих звеньев позволяет рассматривать механические передачи электропривода абсолютно жесткими.

Исследования динамики подъемных установок показали, что упругость уравновешивающих канатов (в статически уравновешенных системах) не оказывает существенного влияния на колебания конечных грузов и динамические нагрузки, возникающие в подъемных канатах и действующие на орган навивки [2, 3]. Поэтому расчетную и структурную схемы системы подъема необходимо составлять с учетом только основных частот колебаний, вызванных упругими деформациями подъемных канатов.

Передаточные функции звеньев механической части с учетом упругости канатов, могут быть представлены в виде:

$$W_1(p) = \frac{\frac{\pi^2}{8} p^2}{p^2 + \mu_k b_{k1}^2 p + b_{k1}^2}; W_2(p) = \frac{\frac{\pi^2}{8} p^2}{p^2 + \mu_k b_{k2}^2 p + b_{k2}^2},$$

где  $b_{k1} = \frac{\pi a_k}{l_{k1}}; b_{k2} = \frac{\pi a_k}{l_{k2}}$  - парциальные частоты ветвей канатов, рад/с;

$\mu_k$  – коефіцієнт затухання коливань, с;

$a_k$  – швидкість розповсюдження еластичних деформацій вздовж канатів, м/с;

коефіцієнти мас:

$$\alpha_{11} = \frac{m_{k1}}{m_1}; \alpha_{12} = \frac{m_{k1}}{m_2}; \alpha_{21} = \frac{m_{k2}}{m_1}; \alpha_{23} = \frac{m_{k2}}{m_3}.$$

Для сталевих канатів приймають  $\mu_k = 0,005 \div 0,01$  с;  $a_k = 4000$  м/с.

Залежності динамічних навантажень  $F'_{1y}, F''_{1y}$  в точках приєднання еластичного стержня (каната) до концентрованої маси органу навівки представляють найбільший інтерес при дослідженні динаміки електропривода з урахуванням механічних коливань, викликаних еластичними деформаціями канатів.

На рис. 1 представлена структурна схема статички зрівноваженої системи підйому з двохконтурною системою підчиненого регулювання, де залежності  $F'_{1y}$  і  $F''_{1y}$  від рухомого зусилля і параметрів системи представлені передаточними функціями  $W_{k1}(p), W_{k2}(p)$  з перехрестними зв'язями. Розгляд впливу системи управління з підчиненими контурами регулювання координат на перехідні процеси в механічній системі представляє інтерес з тієї точки зору, що в такій системі підтримується з певною точністю заданий закон змінення рухомого зусилля (момента).

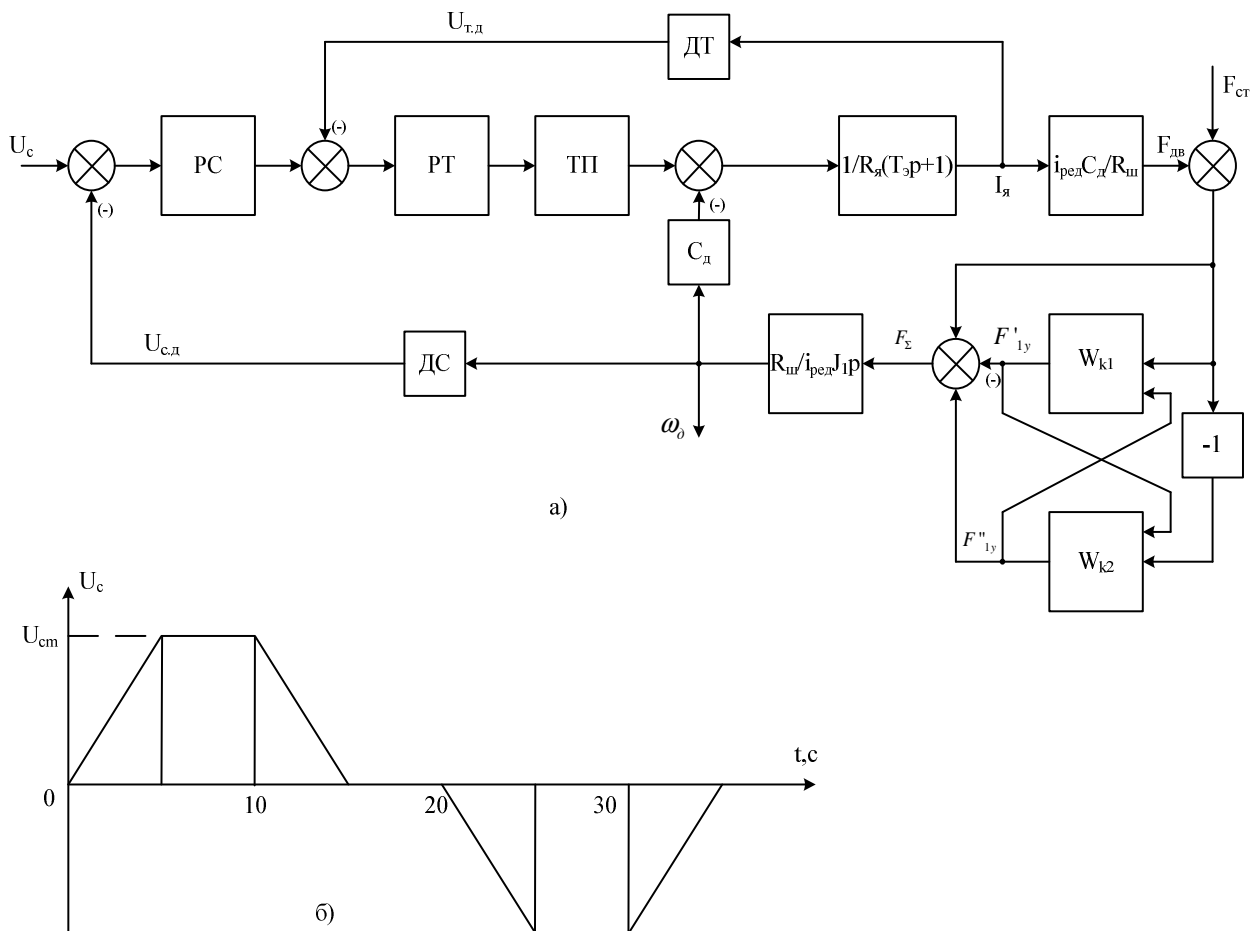


Рис. 1. Структурна схема системи підчиненого управління статички

уравновешенной подъемной установки (а) и график изменения входного воздействия (б).

На этом рисунке приняты обозначения: РС, РТ – регуляторы скорости и тока; ДС, ДТ – датчики скорости и тока; ТП – тиристорный преобразователь;  $I_я$ ,  $R_я$  – ток и сопротивление якорной цепи двигателя;  $C_d$  – коэффициент пропорциональности двигателя;  $T_3$  – электромагнитная постоянная времени;  $\omega_0$  – частота вращения двигателя;  $R_{ш}$  – радиус канатоведущего шкива;  $i_{ред}$  – передаточное число редуктора;  $J_1$  – момент инерции всех вращающихся элементов, приведенный к валу канатоведущего шкива;  $W_{к1}(p), W_{к2}(p)$  – передаточные функции упругой системы,

$$W_{к1}(p) = \frac{k_{mn}(T_{n2}^2 p^2 + T_\mu p + 1)}{T_{n1}^2 p^2 + T_\mu p + 1}; W_{к2}(p) = \frac{k_{mo}(T_{o2}^2 p^2 + T_\mu p + 1)}{T_{o1}^2 p^2 + T_\mu p + 1},$$

где  $T_\mu = \mu_k$ .

Здесь коэффициенты динамических нагрузок:

$$k_{mn} = \frac{\alpha_{11}(1 + \alpha_{12})}{\alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_{11}\alpha_{12}} = \frac{m_{k1} + m_2}{m_{k1} + m_2 + m_1};$$

$$k_{mo} = \frac{\alpha_{21}(1 + \alpha_{23})}{\alpha_{21} + \alpha_{23} + \alpha_{21}\alpha_{23}} = \frac{m_{k2} + m_3}{m_{k2} + m_3 + m_1},$$

а постоянные времени упругих колебаний:

$$T_{n1}^2 = \frac{1}{b_{k1}^2} \left( 1 + \frac{4 + \alpha_{11} + \alpha_{12}}{\alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_{11}\alpha_{12}} \frac{\pi^2}{4} \right); T_{n2}^2 = \frac{1}{b_{k1}^2} \left( 1 + \frac{1}{1 + \alpha_{12}} \frac{\pi^2}{4} \right);$$

$$T_{o1}^2 = \frac{1}{b_{k2}^2} \left( 1 + \frac{4 + \alpha_{21} + \alpha_{23}}{\alpha_{21} + \alpha_{23} + \alpha_{21}\alpha_{23}} \frac{\pi^2}{4} \right); T_{o2}^2 = \frac{1}{b_{k2}^2} \left( 1 + \frac{1}{1 + \alpha_{23}} \frac{\pi^2}{4} \right).$$

Оценка влияния упругих свойств системы на динамику электропривода произведена с использованием специализированных программных средств системы интерактивно-имитационного моделирования MATLAB [5].

Цифровая модель системы подчиненного управления статически уравновешенной подъемной установкой представлена на рис. 2.

Определим переходные процессы в системе при трапецеидальном входном воздействии  $U_c$  (рис. 1, б) и  $F_c=0$ .

Значения параметров силовой части исследуемого электропривода постоянного тока по схеме ТП-Д приведены в таблице 1.

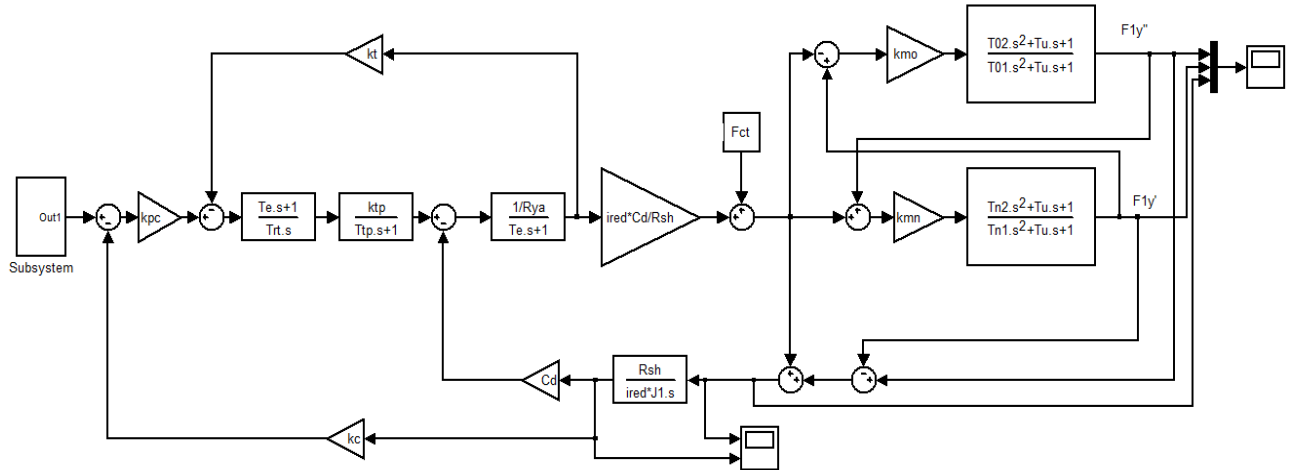
**Таблица 1**

**Значение параметров силовой части электропривода**

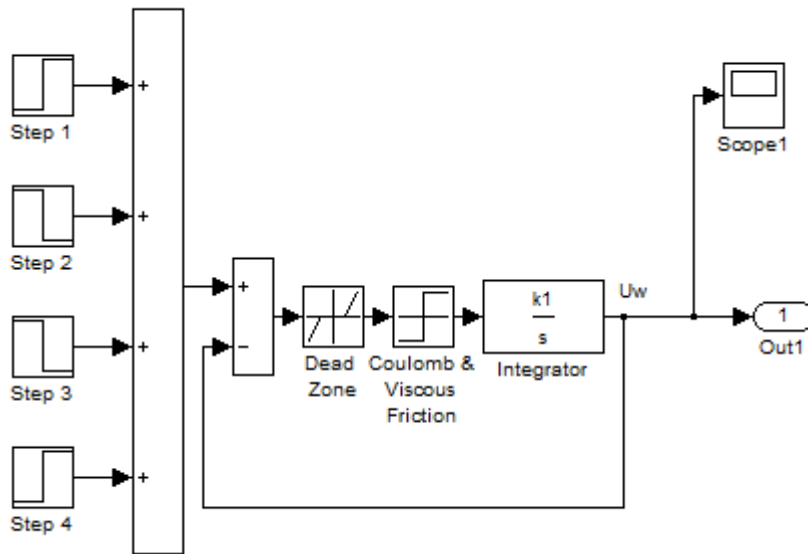
$R_я$ , Ом	$J_1$ , кг·м <sup>2</sup>	$C_d$	$T_3$ , с	$R_{ш}$ , Ом	$i_{ред}$
0,022	2470	16,26	0,06	2,5	10,5
$l_1$ , м	$l_2$ , м	$\alpha_{11}$	$\alpha_{12}$	$\alpha_{21}$	$\alpha_{23}$
1445	45	0,906	1,14	0,028	0,018
$\mu_k$ , с	$a_k$ , м/с	$b_{k1}$ , с <sup>-1</sup>	$b_{k2}$ , с <sup>-1</sup>	$U_c$ , В	-

0,01	4000	8,7	279	10	-
------	------	-----	-----	----	---

Приведенные к окружности навивки массы движущихся элементов: суммарная –  $m_0 = 188154$  кг; звеньев совершающих вращательное движение –  $m_1 = 43600$  кг. Коэффициенты обратных связей по току и скорости:  $k_T = 0,00242$ ;  $k_C = 1,626$ . Коэффициент передачи и постоянная времени тиристорного преобразователя ТП:  $k_{TP} = 10$ ,  $T_{TP} = T_\mu = 0,01$  с.



а)



б)

**Рис. 2. Цифровая модель системы подчиненного управления статически уравновешенной подъемной установкой (а) и подсистема задатчика управляющего сигнала (б).**

Структуру и параметры регуляторов тока (РТ) и скорости (РС) выберем согласно модульному оптимуму:

$$W_{p.m}(p) = \frac{T_p p + 1}{p^2 T_\mu k_{TP} k_T / R_\alpha} = \frac{0.06 p + 1}{0.022 p};$$

$$W_{p.c}(p) = \frac{k_T C_\delta T_M}{4 T_\mu R_\alpha k_C} = k_{p.c},$$

где  $T_M$  - электромеханическая постоянная времени привода,  $T_M = 0,887c$ ;  $k_{p.c} = 24,4$ .  
 Результаты моделирования приведены на рис. 3.

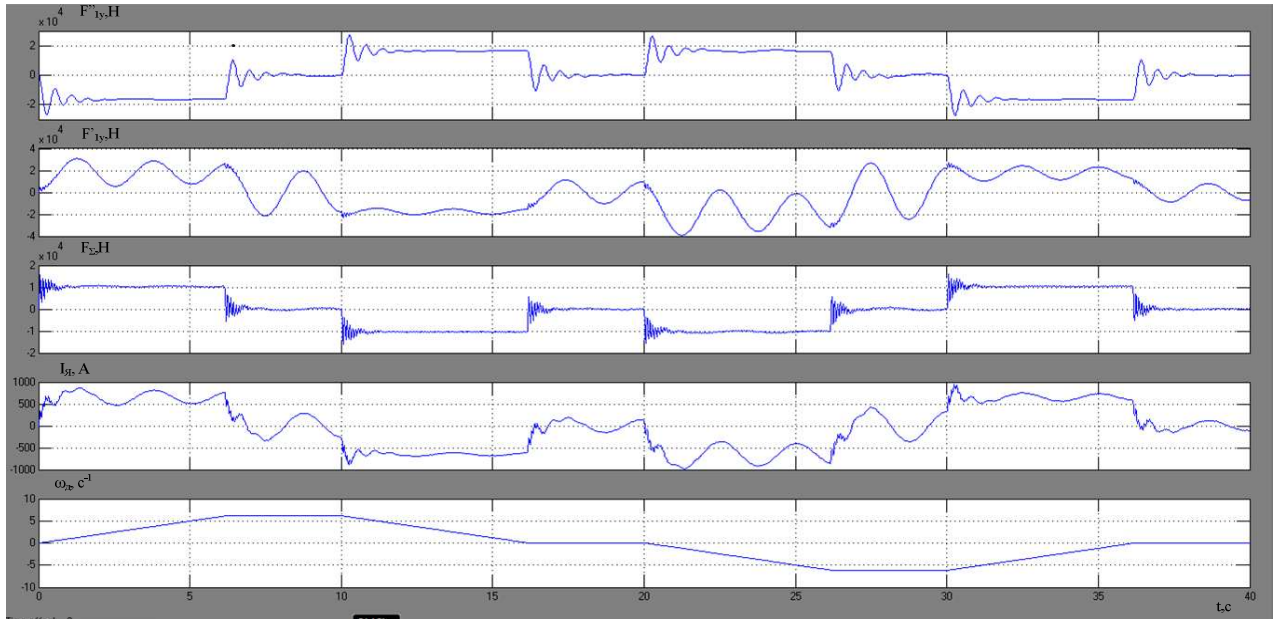


Рис. 3. График изменения во времени динамического усилия  $F''_{ly}$ ,  $F'_{ly}$ , суммарного  $F_{\Sigma}$ , тока якоря двигателя  $I_{я}$  и частоты вращения  $\omega_0$  в упругой системе.

Анализ результатов цифрового моделирования динамики шахтной подъемной установки позволил сделать вывод о необходимости снижения пиков динамических нагрузок с целью улучшения качества переходного процесса.

Учитывая, что для ограничения динамических нагрузок необходимо ограничить не только первую, но и высшие производные управляемой переменной по времени, целесообразно в общем случае иметь многоканальное задающее устройство [4], цифровая модель которого может быть представлена в виде, показанном на рис. 4.

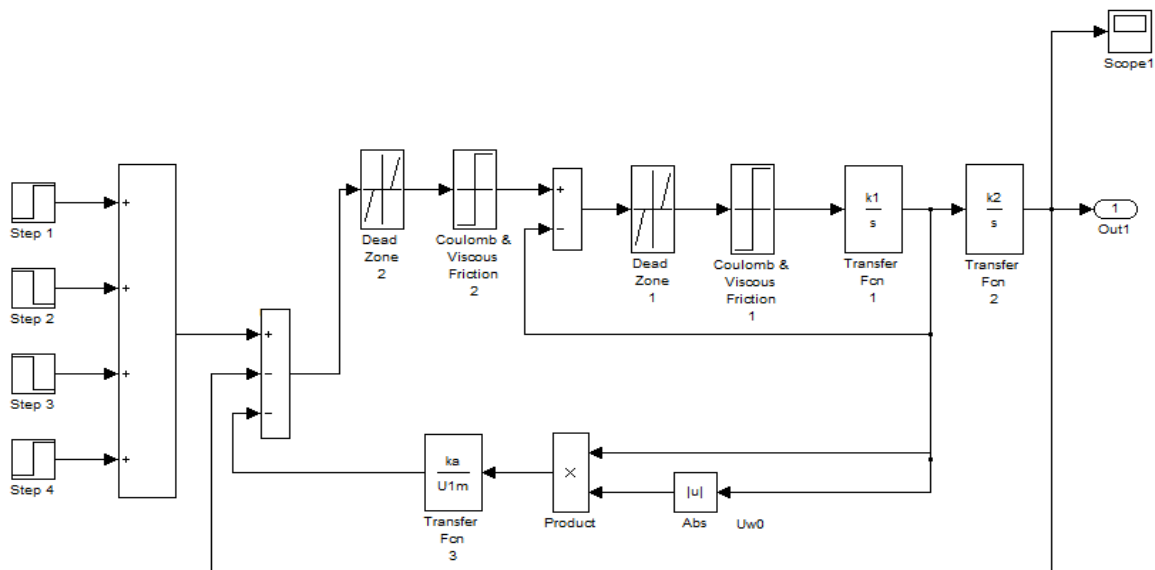
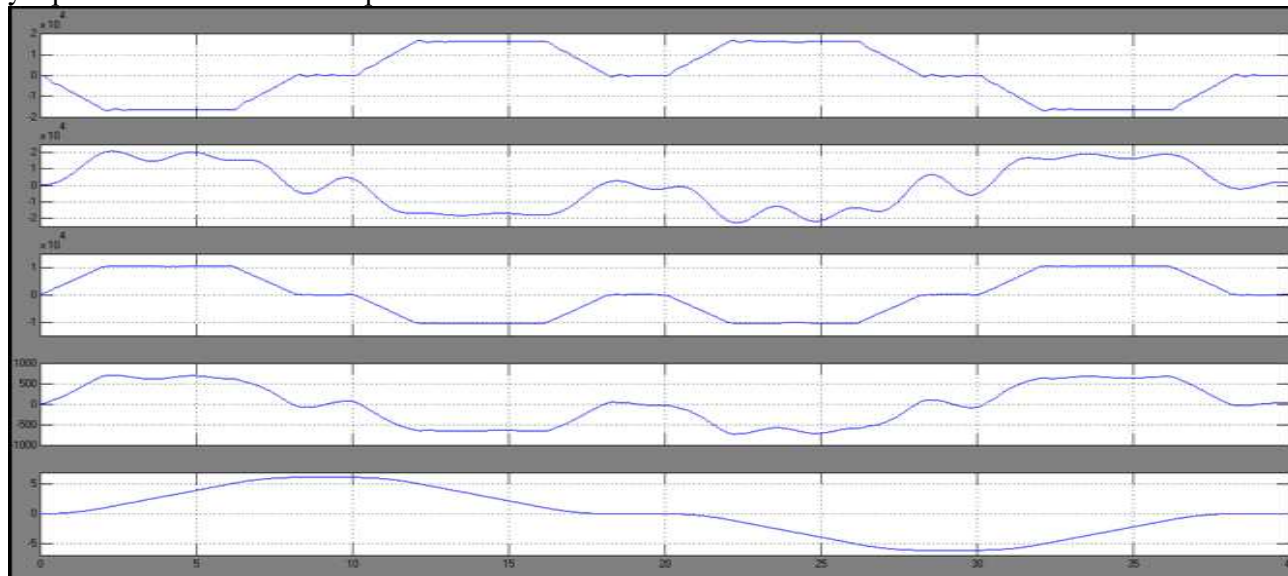


Рис. 4. Цифровая модель многоканального задающего устройства.

Сигнал на выходе задающего устройства второго порядка отличается от трапецеидального сигнала задающего устройства первого порядка наличием участков плавного перехода сигнала заданной скорости от одного значения к другому.

Результаты исследования кинематики шахтного подъема по системе электропривода тиристорный преобразователь-двигатель (рис. 2, а) с многоканальным задающим устройством показаны на рис. 5.



**Рис. 5. График изменения во времени динамического усилия  $F''_{1y}$ ,  $F'_{1y}$ , суммарного  $F_{\Sigma}$ , тока якоря двигателя  $I_{\alpha}$  и частоты вращения  $\omega_0$  в упругой системе с многоканальным задающим устройством.**

На основе полученных результатов можно сделать выводы:

1. Цифровое моделирование шахтной подъемной установки как единой электромеханической системы позволяет с высокой точностью учитывать упругие свойства канатов.

2. Исследования динамических процессов в системах управления сложными электромеханическими установками наиболее целесообразно выполнять методом цифрового моделирования с использованием специализированных программных средств системы интерактивно-имитационного моделирования MATLAB.

3. Использование структурного моделирования в системах управления подъемными установками шахт с трапецеидальным входным сигналом заданной скорости и контурами подчиненного регулирования координат не дает возможности стабилизировать ток двигателя и скорость перемещения подъемных сосудов в периоды неустановившихся режимов работы.

4. Для реализации программного управления подъемными установками должны применяться специальные задающие устройства, выходные сигналы которых изменяются в функции времени по требуемому закону, независимо от значения регулируемой переменной.

5. Использование многоканальных задающих устройств позволяет с помощью дополнительных каналов комбинированного управления компенсировать инерционность динамических звеньев, в результате чего управляемые переменные с высокой точностью воспроизводят оптимальные задающие воздействия.

6. Управление с многоканальными задающими устройствами существенно уменьшает амплитуды колебания концевых грузов, что позволяет реализовать позиционное управление многорежимными подъемными установками.

Литература:

1. Пермяков В. М., Дубовик В.Г., Песвианидзе Д.А. Комбинированная система управления транспортными установками с упругими тяговыми органами. Вестн. Киев. политехн. ин-та. Горн. электромеханика и автоматика, 1987, вып. 18.
2. Чермалых В. М., Родькин Д. И., Каневский В. В. Системы электропривода и автоматики рудничных стационарных установок и машин. М., 1976.
3. Чермалых В. М., Алтухов Е. И., Козьякова Л. А., Цокол Е. Л. Структурное моделирование электропривода статически уравновешенных подъемных установок глубоких шахт. Вестн. Киев. политехн. ин-та. Горн. электромеханика и автоматика, 1980, вып. 11.
4. Чермалых В.М. Многоканальные системы оптимального управления электроприводом промышленных установок. Изв. вузов. Горн. журн. 1982. №7.
5. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. - М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. - 288 с.: ил.