

УДК 621.86

# МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ УПРОЩЕННОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СХЕМЫ КАНАТОПРОВОДА БАРАБАННОГО ПОДЪЕМНИКА

*Розроблено методіку складання спрощеної динамічної схеми барабанного підйомника й визначені погрішності по амплітуді й частоті в результаті спрощень*

*Ключові слова: барабанний підйомник, еквівалентні схеми, динамічні навантаження, коливальні процеси*

*Разработана методика составления упрощенной динамической схемы барабанного подъемника и определены погрешности по амплитуде и частоте в результате упрощений*

*Ключевые слова: барабанный подъемник, эквивалентные схемы, динамические нагрузки, колебательные процессы*

*The Designed methods of the formation simplified dynamic scheme of the drum lift and is determined inaccuracy on amplitude and frequency as a result of simplifications*

*The Key words: drum lift, equivalent schemes, dynamic loads, oscillatory processes*

**А. П. Нестеров**

Профессор, доктор технических наук\*

**Т. Н. Осипова**

Аспирант\*

\*Кафедра «Металлорежущее оборудование и транспортные системы»

Украинская инженерно-педагогическая академия  
ул. Университетская, 16, г Харьков, Украина

Контактный тел.: (057)733-78-18

## 1. Постановка задачи

Шахтный подъемник состоит из многих дискретных масс (электродвигателей, редуктора, соединительных муфт, барабана, подъемных сосудов), соединенных упругими звеньями (валами, канатами) [1].

При исследовании динамики переходных процессов многомассовых систем приходится упрощать эквивалентные динамические схемы, уменьшая число дискретных масс и упругих звеньев [2].

## 2. Постановка проблемы

Для барабанного шахтного подъемника характерна высокая жесткость валопровода по сравнению с канатопроводом и значительные моменты инерции вра-

щающихся частей подъемной машины. Это указывает на то, что возможно объединить вращающиеся массы машины в одну и исследовать её влияние на колебания подъемных сосудов по упрощенной динамической схеме.

## 3. Основное содержание

Рассмотрим указанную задачу на примере клетевой одноконцевой барабанной двухдвигательной подъемной установки со следующими техническими параметрами: тип машины 1-6х2,4 Д; высота подъема  $H = 1020$  м; масса клетки  $Q_{кл} = 7300$  кг; масса груза в клетке  $Q_{гр} = 7260$  кг; диаметр каната  $d_k = 46,5$  мм.

Эквивалентная крутильная динамическая схема подъемника приведена на рис. 1.

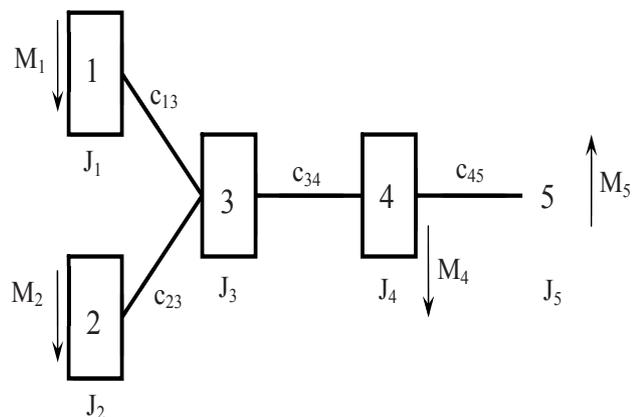


Рис. 1. Пятимассовая эквивалентная динамическая крутильная схема клетового подъемника типа 1–6х2,4 Д: 1, 2 – электродвигатели; 3 – редуктор; 4 – барабан; 5 – клеть;  $J_1, J_2, J_3, J_4, J_5$  – приведенные моменты инерции соответствующих дискретных масс;  $M_1, M_2, M_4, M_5$  – внешние моменты соответствующих масс;  $c_{13}, c_{23}, c_{34}, c_{45}$  – жесткости упругих звеньев

Приведенные моменты инерции дискретных масс и жесткости упругих звеньев даны в табл. 1.

Таблица 1

Динамические параметры подъемника

Упругое звено	Приведенный момент инерции, т·м <sup>2</sup>					Приведенная жесткость, кНм/рад			
	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$c_{13}$	$c_{23}$	$c_{34}$	$c_{45}$
Валопровод	26,8	26,8	70	353,17	-	$1,52 \cdot 10^6$	$1,52 \cdot 10^6$	$5,74 \cdot 10^5$	-
Канатопровод	-	-	-	-	134,55	-	-	-	$8,51 \cdot 10^2$

Дифференциальные уравнения, описывающие собственные колебания дискретных масс рассматриваемого подъемника без учета диссипативных сил, получены в виде:

$$\left. \begin{aligned} J_1 \ddot{\varphi}_1 + c_{13} \varphi_1 - c_{13} \varphi_3 &= 0; \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 + c_{23} \varphi_2 - c_{23} \varphi_3 &= 0; \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 + (c_{13} + c_{23} + c_{34}) \varphi_3 - c_{13} \varphi_1 - c_{23} \varphi_2 - c_{34} \varphi_4 &= 0; \\ J_4 \ddot{\varphi}_4 + (c_{34} + c_{45}) \varphi_4 - c_{34} \varphi_3 - c_{45} \varphi_5 &= 0; \\ J_5 \ddot{\varphi}_5 + c_{45} \varphi_5 - c_{45} \varphi_4 &= 0. \end{aligned} \right\} (1)$$

Используя систему уравнений (1) при начальных условиях  $t = 0$ ;  $\varphi_1 = \varphi_1(0)$ ;  $\dot{\varphi}_1 = 0$ ;  $\varphi_2 = \varphi_2(0)$ ;  $\dot{\varphi}_2 = 0$ , рассмотрим колебания дискретных масс линии передач валопровода и канатопровода для исходных данных, представленных в табл. 1.

На рис. 2 представлены осциллограммы решения системы уравнений (1).

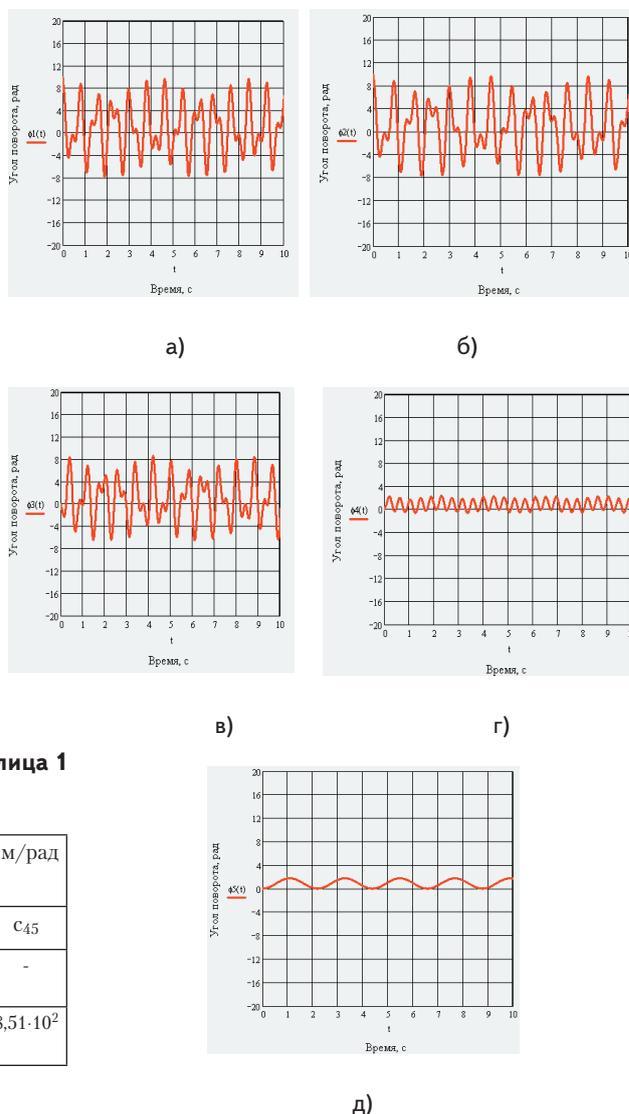


Рис. 2. Амплитуды колебаний дискретных масс: а) электродвигателя 1; б) электродвигателя 2; в) редуктора; г) барабана; д) клетки

Из осциллограмм на рис. 2 видно, что максимальная амплитуда колебаний у электродвигателей, которые возмущаются начальными условиями по углу поворота.

Амплитуды последующих дискретных масс (редуктора, барабана, клетки) уменьшаются, а их частотный спектр изменяется. Колебания последней массы (клетки) носит одночастотный характер низшей канатной частоты; высокие частоты валопровода отсутствуют.

Это указывает на то, что колебания электродвигателей, редуктора и барабана практически не влияют на колебания клетки и поглощаются в валопроводе.

Поэтому при исследовании динамики канатопровода пятимассовую схему можно заменить двухмассовой, присоединяя приведенные массы роторов электродвигателей и редуктора к барабану, считая валопровод абсолютно жестким (см. рис. 3).

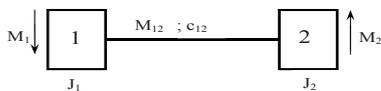


Рис. 3. Двухмассовая эквивалентная крутильная динамическая схема:  $J_1$  – суммарный момент инерции двух двигателей, редуктора и барабана;  $J_2$  – момент инерции клетки;  $M_{12}$  – момент сил упругости канатопровода;  $c_{12}$  – жесткость каната;  $M_1, M_2$  – внешние моменты

Рассмотрим влияние валопровода на силовой поток в линии передач подъемника. Введем моменты сил упругости в виде:

$$\begin{aligned} M_{13} &= c_{13}(\varphi_1 - \varphi_3); & M_{23} &= c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3); \\ M_{34} &= c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4); & M_{45} &= c_{45}(\varphi_4 - \varphi_5). \end{aligned} \quad (2)$$

Дифференциальные уравнения силовых переходных процессов в линии передач подъемника с пятью дискретными массами (см. рис. 1) без диссипативных сил получены в виде:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{M}_{13} + \left( \frac{c_{13}}{J_1} + \frac{c_{13}}{J_3} \right) M_{13} + \frac{c_{13}}{J_3} M_{23} - \frac{c_{13}}{J_3} M_{34} &= \frac{c_{13}}{J_1} M_1; \\ \ddot{M}_{23} + \left( \frac{c_{23}}{J_2} + \frac{c_{23}}{J_3} \right) M_{23} + \frac{c_{23}}{J_3} M_{13} - \frac{c_{23}}{J_3} M_{34} &= \frac{c_{23}}{J_2} M_2; \\ \ddot{M}_{34} + \left( \frac{c_{34}}{J_3} + \frac{c_{34}}{J_4} \right) M_{34} - \frac{c_{34}}{J_3} M_{13} - \frac{c_{34}}{J_3} M_{23} - \frac{c_{34}}{J_4} M_{45} &= -\frac{c_{34}}{J_4} M_4; \\ \ddot{M}_{45} + \left( \frac{c_{45}}{J_4} + \frac{c_{45}}{J_5} \right) M_{45} - \frac{c_{45}}{J_4} M_{34} &= \frac{c_{45}}{J_4} M_4 + \frac{c_{45}}{J_5} M_5. \end{aligned} \right\} (3)$$

На рис. 4 показаны осциллограммы моментов сил упругости в линии передач подъемника с пятью массами при приложении внешних моментов на электродвигатели и клеть.

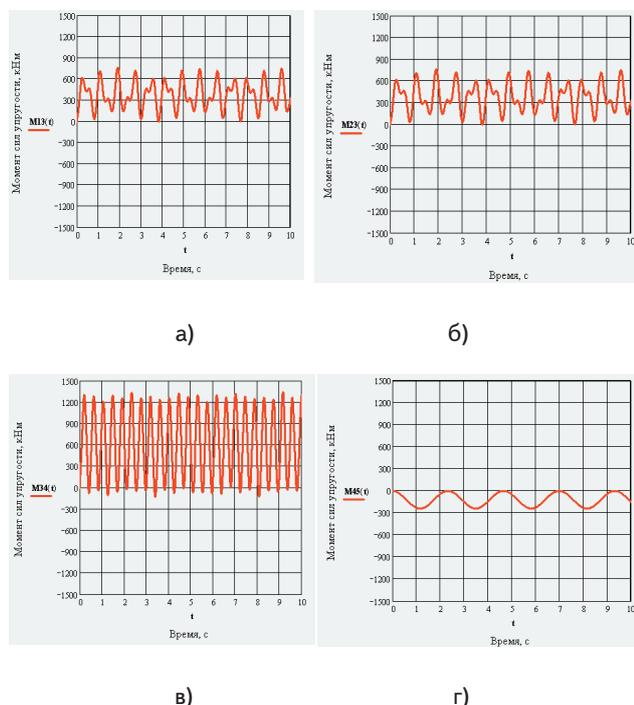


Рис. 4. Моменты сил упругости в упругих звеньях: а) электродвигатель 1 – редуктор; б) электродвигатель 2 – редуктор; в) редуктор – барабан; г) барабан – клеть

Из рис. 4 видно, что силовой поток расходуется на вращение электродвигателей, редуктора и барабана, а на клеть остается незначительное количество.

Момент  $M_{45}$  имеет одночастотное колебание без высоких частот валопровода. Это подтверждает вывод о том, что колебания валопровода практически не влияют на колебания канатопровода. Поэтому при исследовании динамических нагрузок в канате его можно рассматривать изолированно от валопровода по двухмассовой эквивалентной схеме (см. рис. 3), где масса клетки соединена канатом с приведенной массой барабана.

Двухмассовую эквивалентную динамическую схему (см. рис. 3) будем использовать для приведения массы каната к дискретным массам [1].

Алгоритм учета массы каната следующий:

1. Из характеристического уравнения определяем корни (главные частоты) без учета массы каната.
  2. Строим низшую (главную) форму колебаний системы, вычисляя отношение амплитуд дискретных масс.
  3. Устанавливаем узловое сечение линии передач, то есть узел колебаний или сечение, которое остается неподвижным.
  4. Узел колебаний лежит между дискретными массами (в двухмассовой системе), то к ним необходимо прибавить 1/3 участка каната, расположенного между узлом колебаний и дискретной массой.
- В табл. 2 приведены параметры форм колебаний и приведенные моменты инерции рассматриваемой двухмассовой крутильной системы при различных длинах каната.

Таблица 2

Параметры форм колебаний подъемника

Высота подъема Н, м	300		600		1020	
	2-х мас.	5-ти мас.	2-х мас.	5-ти мас.	2-х мас.	5-ти мас.
Длина каната до барабана, м	387,98		687,98		1109,55	
Момент инерции барабана, т·м <sup>2</sup>	476,79	353,17	476,79	353,17	476,79	353,17
Момент инерции клетки, т·м <sup>2</sup>	134,558					
Момент инерции каната до барабана, т·м <sup>2</sup>	2,225		3,96		6,288	
Момент инерции каната до клетки, т·м <sup>2</sup>	6,34		12,37		20,908	
Момент инерции барабана с учетом веса каната, т·м <sup>2</sup>	479	355,4	480,757	357,134	483,08	359,46
Момент инерции клетки с учетом массы каната, т·м <sup>2</sup>	140,897		146,928		155,466	
Максимальный момент сил упругости каната, кНм	272,1	282,31	247	264,8	214,66	240,585
Частота колебаний β, 1/с	4,81		3,615		2,85	
Период колебаний T, с	1,305	1,32	1,74	1,77	2,2	2,3
Погрешность по амплитуде, %	3,617		7,767		10,776	
Погрешность по частоте, %	1,136		1,695		4,348	

Из табл. 2 видно, что моменты инерции каната незначительно увеличивают моменты инерции дискретных масс барабана и клетки. При учете массы каната на динамику подъемника пятимассовой системы необходимо найти узел формы колебаний двухмассовой системы и определить моменты инерции каната, прибавляемого к клетке и барабану. Эти же моменты инерции прибавить соответственно к дискретным массам пятимассовой системы (см. табл. 2).

На рис. 5 дана осциллограмма колебания момента сил упругости  $M_{12}$  в канате по двухмассовой крутильной схеме для высоты подъема 1020 мм приложении внешних моментов  $M_1$  и  $M_2$  с учетом моментов инерции каната, присоединенного к барабану и клетки.

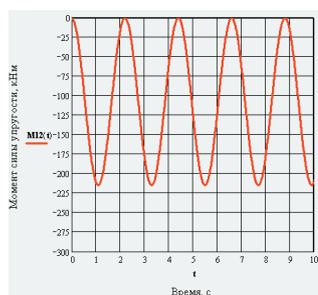


Рис. 5. Момент сил упругости канатопровода двухмассовой крутильной системы  $M_{12}(t)$

Колебания момента  $M_{12}$  на рис. 5 носит гармонический характер, а погрешность по амплитуде колебаний отличается от пятимассовой (см. рис. 2) до 11 %, по частоте – до 4,5 %. Причем с увеличением высоты подъема погрешность возрастает (см. табл. 2).

### Вывод

1. На динамику канатов одноконцевого барабанного подъемника колебательные процессы в валопроводе практически не влияют.

2. При составлении эквивалентной динамической схемы канатопровода подъемника с пятью массами валопровод можно считать абсолютно жестким, а приведенные к барабану моменты инерции роторов электродвигателей и редуктора сложить с моментом инерции барабана, то есть от многомассовой системы перейти к двухмассовой.

3. Погрешность в моментах сил упругости лежит в пределах по амплитуде колебаний 0,225...10,776 %, по частоте – 0,48..4,348 % в зависимости от длины каната.

### Литература

1. Федорова З.М., Лукин И.Ф., Нестеров А.П. Подъемники. – Киев: Вища школа, 1976. – 296 с.
2. Кожевников С.Н. Динамика машин с упругими звеньями. – К.: Наук. Думка, 1961. – 160 с.