

Моделирование динамических нагрузок и демпфирования шахтных подъемных установок

Дмитриева О.А.

Кафедра ПМиИ ДонНТУ

E-mail: dmitriv@r5.dgtu.donetsk.ua

Abstract

Dmitriewa O. Simulation of the dynamic loading and damping mine winder. This work is devoted to the problem of present lifting options on the large depths effective usage. Simulation of mine lifting dynamic loading is described. Multistep block methods for decision of large-sized usual differential equations systems are used. The simulation results are showed.

Введение

Большинство перспективных угольных пластов в Украине залегает на больших глубинах (1400-1600 метров и более), и разработка таких пластов требует создания высокопроизводительных подъемных установок нового типа. Это обусловлено тем, что использование имеющихся машин на больших глубинах связано со значительным увеличением массы и размеров их органов навивки, с необходимостью освоения производства канатов больших диаметров, с ростом затрат на изготовление машин и на строительство помещений для них.

Проблема подъема грузов с больших глубин может быть решена за счет применения многоканатных подъемных установок. Однако здесь встречаются свои трудности, например, специфика такого шахтного подъема не позволяет прямо применить результаты, полученные в общей теории машин. Действительно, среди грузоподъемных механизмов только у шахтных подъемных машин встречается такая большая длина канатов, внезапное стопорение сосуда препятствием, податливость. Все эти факторы не могут быть определены статическими методами, а, тем более, аналитически. Пуск машины при застопоренном сосуде, очень большие нагрузки, скорости и приведенные массы вращающихся и движущихся частей требуют использования численных методов расчета.

Постановка задачи исследования

Каждая многоканатная подъемная установка представляет собой сложную электромеханическую систему взаимосвязанных масс, перемещение и остановка которых сопровождается затухающим колебательным процессом. Математическая модель, описывающая работу

установки, представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x(t)), \quad x(t_0) = x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)^T, \quad (1)$$

где

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_m \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \text{вектор} \\ \text{неизвестных} \end{matrix}, \quad f = \begin{pmatrix} f_1(t, x_1, x_2, \dots, x_m) \\ f_2(t, x_1, x_2, \dots, x_m) \\ \dots \\ f_m(t, x_1, x_2, \dots, x_m) \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \text{заданный} \\ \text{вектор} \end{matrix}$$

2-го порядка размерностью

$$N = 3 + 2n_{\text{головн.}}(m-1) + 2n_{\text{уравн.}}m, \quad (2)$$

с параметрами $n_{\text{головн.}}$ - количество головных канатов, $n_{\text{уравн.}}$ - количество уравновешивающих канатов,

Для подъемной установки ($m=2$) с четырьмя головными $n_{\text{головн.}}=4$ и двумя уравновешивающими $n_{\text{уравн.}}=2$ канатами приходится решать систему из 19 дифференциальных уравнений 2-го порядка (38 уравнений первого порядка), и с увеличением числа канатов размерность такой системы резко возрастает. Поэтому для решения ряда задач, в которых необходимо определить нагрузки на головные канаты или подъемные машины, уравновешивающие канаты учитываются приложением их веса к центру тяжести подъемных сосудов (рис. 1 а, б). Это обстоятельство значительно упрощает систему уравнений. Кроме того, при определении общей нагрузки на подъемную машину, подъемная установка может быть рассчитана как одноканатная с канатом эквивалентного веса, сечения и прочности [1].

Математическая модель динамики подъемных установок

В простейшем случае подъемную машину можно описать системой из 3-х уравнений 2-го порядка (3) или из 6-и уравнений 1-го порядка (4). Схема, соответствующая этому случаю, приведена на рис. 1 а).

$$\begin{aligned} & (m_1 + \frac{m_{k2} + m_{k3}}{3}) \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{m_{k2}}{6} \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{m_{k3}}{6} \frac{d^2 x_3}{dt^2} + C_2(x_1 - x_2) + C_3(x_1 - x_3) = \\ & = -F_m - (Q_2 - Q_1) \\ & (m_2 + \frac{m_{k2}}{3}) \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{m_{k2}}{6} \frac{d^2 x_1}{dt^2} + C_2(x_2 - x_1) = 0 \\ & (m_3 + \frac{m_{k3}}{3}) \frac{d^2 x_3}{dt^2} + \frac{m_{k3}}{6} \frac{d^2 x_1}{dt^2} + C_3(x_3 - x_1) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Если в подъемную установку ввести гасители колебаний [2], как это показано на рис. 1 б), то система дифференциальных уравнений примет вид

$$\begin{aligned}
 & \left(m_1 + \frac{m_{k2} + m_{k3}}{3}\right) \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{m_{k2}}{6} \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{m_{k3}}{6} \frac{d^2 x_3}{dt^2} + C_2(x_1 - x_2) + C_3(x_1 - x_3) = \\
 & = -F_m - (Q_2 - Q_1) \\
 & \left(m_2 + \frac{m_{k2}}{3}\right) \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{m_{k2}}{6} \frac{d^2 x_1}{dt^2} - k_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_2}{dt}\right) + C_2(x_2 - x_1) - C_4(x_4 - x_2) = 0 \\
 & \left(m_3 + \frac{m_{k3}}{3}\right) \frac{d^2 x_3}{dt^2} + \frac{m_{k3}}{6} \frac{d^2 x_1}{dt^2} - k_5 \left(\frac{dx_5}{dt} - \frac{dx_3}{dt}\right) + C_3(x_3 - x_1) - C_5(x_5 - x_3) = 0 \\
 & m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} + k_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_2}{dt}\right) + C_4(x_4 - x_2) = 0 \\
 & m_5 \frac{d^2 x_5}{dt^2} + k_5 \left(\frac{dx_5}{dt} - \frac{dx_3}{dt}\right) + C_5(x_5 - x_3) = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

Для того, чтобы привести ее к виду $\frac{dx}{dt} = f(t, x(t))$ с начальными условиями $x(t_0) = x_0$, необходимо понизить порядок входящих в нее производных. После введения соответствующих обозначений (5), приведем исходную систему обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка к системе уравнений первого порядка, вдвое увеличив при этом размерность системы

$$\frac{dx_1}{dt} = x_6 ; \quad \frac{dx_2}{dt} = x_7 ; \quad \frac{dx_3}{dt} = x_8 ; \quad \frac{dx_4}{dt} = x_9 ; \quad \frac{dx_5}{dt} = x_{10} \tag{5}$$

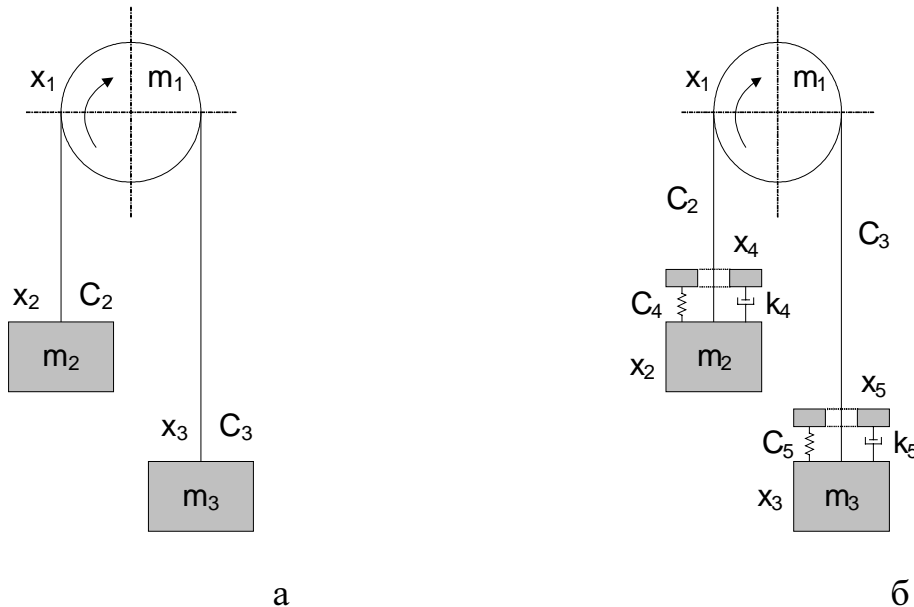


Рисунок 1 – Схема шахтной многоканатной подъемной установки
 а) без гасителей колебаний б) с гасителями колебаний

После введения дополнительных обозначений (5) в векторном виде система (4) может быть представлена как

$$A \frac{d\bar{x}}{dt} = F \text{ или } \frac{d\bar{x}}{dt} = A^{-1} F ,$$

где $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{10})^T$ - вектор неизвестных

A и A^{-1} - матрица, составленная из коэффициентов системы и обратная

F - вектор тормозных усилий при предохранительном торможении подъемной машины

Используемые при этом обозначения можно определить следующим образом

m_1 - приведенная к окружности навивки каната на шкивы трения масса вращающихся элементов подъемной установки;

m_2, m_3 - масса груженого и порожнего сосудов;

m_4, m_5 - массы гасителей колебаний

C_2, C_3, C_4, C_5 - жесткости набегавшей, сбегавшей ветвей и пружин гасителей колебаний

x_1 - перемещение точки по окружности шкива;

x_2, x_3, x_4, x_5 - перемещение соответствующих масс

k_4, k_5 - коэффициенты вязкости сопротивления гасителей колебаний

$F_m(t)$ - тормозное усилие при предохранительном торможении

Q_1, Q_2 - концевые нагрузки на ветви канатов.

Для максимального приближения фактических усилий в канатах к желаемым, заданный тормозной момент (рис. 2) прикладывается двумя равными ступенями [2]. На первой ступени торможения возникают колебания тормозного усилия с амплитудой, вдвое меньшей, чем в обычном случае. Тормозной момент второй ступени прикладывается через время, равное полупериоду колебаний усилий в канате.

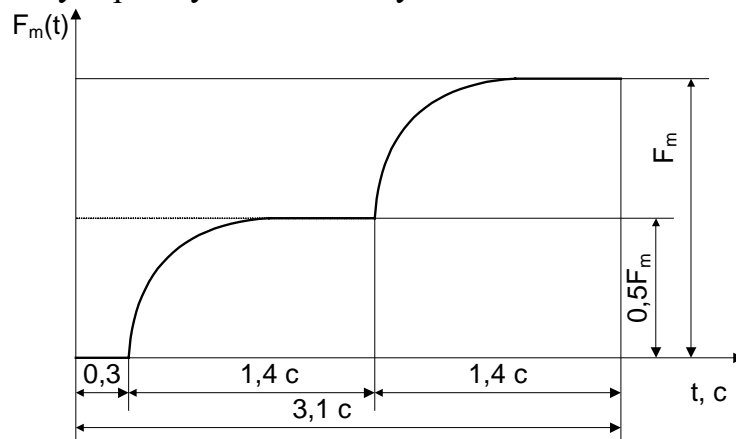


Рисунок 2 – График нарастания тормозного усилия при предохранительном торможении подъемной машины

Параметры для расчета системы уравнений (4), снижающих динамику работы подъема можно представлены в виде таблицы 1

Методы численного решение задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений многошаговыми блочными методами

Решение задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений (2) и (3) получим с помощью многошагового блочного метода. Блочным будем называть метод [3], при котором для блока из k точек новые k значений функции вычисляются одновременно. Эта особенность методов позволяет успешно решать жесткие задачи, хорошо согласуется с архитектурой параллельных вычислительных систем, при этом коэффициенты разностных формул не пересчитываются в процессе интегрирования, определяются на этапе разработки метода, что значительно увеличивает эффективность счета. Для этого множество точек равномерной сетки M , такое, что $t_M=T$ с шагом τ разбивается на блоки, содержащие по k точек, $kN=M$. В каждом блоке вводится номер точки $i=0,1,\dots,k$ и обозначают через $t_{n,i}$ точку n -го блока с номером i . Точку $t_{n,0}$ называют началом блока n , а $t_{n,k}$ – концом блока. Очевидно, что имеет место $t_{n,k} = t_{n+1,0}$. Начальную точку в блок не включают.

В общем случае уравнения многошаговых разностных методов для блока из n точек с учетом введенных обозначений можно записывают в виде

$$\frac{u_{n,q,i} - u_{n,q,0}}{i\tau} = \sum_{j=1}^k b_{i,j} F_{n-1,q,j} + \sum_{j=1}^k a_{i,j} F_{n,q,j}, \quad i = \overline{1,k}, \quad q = \overline{1,m}, \quad n = 1,2,\dots \quad (6)$$

где $F_{n,q,j} = f_q(t_n + j\tau, u_1(t_n + j\tau), u_2(t_n + j\tau), \dots, u_q(t_n + j\tau))$.

Результаты моделирования были получены с помощью среды *Matematica*® путем использования программной реализации многошаговых многоточечных блочных методов [3-5]. Построенные программные модели исследуемых процессов позволяют изменять возможные физические и механические характеристики (массы гасителей колебаний, жесткости пружин, коэффициенты вязкости сопротивления гасителей колебаний) таким образом, чтобы обеспечивать требуемое время установления равновесия в системе. В результате численного решения СОДУ (3-4) установлено, что амплитуды и скорости колебаний в подъемных системах с использованием гасителей значительно ниже, чем в таких же системах без использования гасителей.

Таблица 1

Параметры, описывающие динамику работы подъема
(машины ЦШ 4×4, МК 4×4)

Параметр и размерность	Номер расчета			
	1	2	3	4
m_1 (кг)	$45 \cdot 10^3$	$40 \cdot 10^3$	$42 \cdot 10^3$	$45 \cdot 10^3$
m_2 (кг)	$46.4 \cdot 10^3$	$52 \cdot 10^3$	$39 \cdot 10^3$	$26 \cdot 10^3$
m_3 (кг)	$21.6 \cdot 10^3$	$32 \cdot 10^3$	$49 \cdot 10^3$	$26 \cdot 10^3$
m_4 (кг)	$0.9 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^3$	$41 \cdot 10^3$
m_5 (кг)	$0.9 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^3$	$21 \cdot 10^3$
m_{K2} (кг)	$0.55 \cdot 10^3$	$25 \cdot 10^3$	$9.6 \cdot 10^3$	$25 \cdot 10^3$
m_{K3} (кг)	$9.6 \cdot 10^3$	$25 \cdot 10^3$	$0.55 \cdot 10^3$	$25 \cdot 10^3$
C_2 (Н/м)	$27 \cdot 10^6$	$2.7 \cdot 10^6$	$1.42 \cdot 10^6$	$2.7 \cdot 10^6$
C_3 (Н/м)	$1.42 \cdot 10^6$	$2.7 \cdot 10^6$	$27 \cdot 10^6$	$2.7 \cdot 10^6$
$C_4=C_5$ (Н/м)	$5 \cdot 10^6$ $2 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$ $2 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$ $2 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$
$K_4=K_5$ (Н*с/м ²)	$5 \cdot 10^3$ $2.5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$ $2.5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$ $2.5 \cdot 10^3$	$9.3 \cdot 10^5$
Q_1 (Н)	$770 \cdot 10^3$	$800 \cdot 10^3$	$700 \cdot 10^3$	$750 \cdot 10^3$
Q_2 (Н)	$520 \cdot 10^3$	$550 \cdot 10^3$	$500 \cdot 10^3$	$500 \cdot 10^3$
F_m (Н)	$750 \cdot 10^3$	$250 \cdot 10^3$	$750 \cdot 10^3$	$750 \cdot 10^3$

Заключение

В работе проведено сравнительное моделирование динамических нагрузок шахтных подъемных установок с гасителями и без гасителей. Используемые при этом многошаговые многоточечные блочные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений большой размерности позволили обойти проблему жесткости, которая характерна для задач этого класса, т.е. шаг интегрирования оставался постоянным и при этом достаточно большим, что обеспечило приемлемое время моделирования. Построенные модели дают возможность выбора физических и механических характеристик, обеспечивающих требуемые отклонения канатов и скорости колебаний. Результаты моделирования показали, что использование гасителей колебаний повышает долговечность канатов за счет снижения динамических нагрузок и демпфирования продольных колебаний канатов и сосудов шахтных подъемных установок. Подтверждена эффективность применения

разработанных алгоритмов и программ решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений и смешанных алгебро – дифференциальных систем при реализации моделей большой размерности.

Литература

1. Савин Г.Н., Горошко О.А. Динамика нити переменной длины. – Киев, Изд. АН УССР, 1962. - 332 с.
2. А.с. 1729989 СССР, В 66 В 15/00. Шахтная многоканатная подъемная установка/ Н.Я. Жлобич, И.И. Коваленко, С.Н. Ампольский (СССР). - №4806706/11; Заявлено 26.03.90; Опубл. 30.04.92, Бюл. №16. – 4с.
3. Фельдман Л.П., Дмитриева О.А. Эффективные методы распараллеливания численного решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений.// Математическое моделирование, том 13, № 7, 2001. – С.66-72.
4. Дмитриева О.А. Параллельные блочные многошаговые алгоритмы численного решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений большой размерности. //Научные труды Донецкого государственного технического университета. Серия: Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем, выпуск 15: - Донецк:, 2000, с. 53-58.
5. Дмитриева О.А. Особенности параллельной реализации динамических моделей.// Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля №5(87) 2005. С. 61-68