УДК 624.191.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАКОНА ПОДЪЕМА ЭЛЕМЕНТА ОБДЕЛКИ МАНИПУЛЯТОРОМ ТОННЕЛЬНОГО УКЛАДЧИКА

А.А. Сирченко, аспирант кафедры горных машин и инжиниринга
Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: kundul@rambler.ru

К.С. Заболотный, доктор технических наук, заведующий кафедрой горных машин и инжиниринга
Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: mmf@ua.fm

Аннотация. Получены новые закономерности подъема элементов обделки манипулятором тоннельного укладчика. Определен оптимальный закон перемещения элементов обделки на заданную высоту.

Ключевые слова: манипулятор тоннельного укладчика, закон управления перемещением золотника, закон движения элемента обделки.

DETERMINATION OF OPTIMUM LAW LIFT ELEMENT LINING THE MANIPULATOR OF TUNNEL STACKER

A. Sirchenko, Postgraduate Student Department of Mining Machines and Engineering
State Higher Educational Institution "National Mining University", Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: kundul@rambler.ru

K. Zabolotniy, Doctor of technical Sciences, Head of Department of Mining Machines and Engineering
State Higher Educational Institution "National Mining University", Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: mmf@ua.fm

Abstract. Obtain new regularities of lifting lining elements using the manipulator tunnel stacker. The optimal law of displacement elements lining a predetermined height was determined.

Keywords: tunnel erector manipulator, motion control spool law, the law of motion of an element lining.

Введение. В современных условиях возрастающей технологической конкуренции большое значение имеет сокращение сроков разработки новых конструкций машин, а также повышение их качества и надежности. В связи с этим оптимальное проектирование занимает одну из основных позиций при создании современных конкурентоспособных машин, в частности тоннельных укладчиков. Укладчики – специальные механические устройства, которые применяются для возведения сборной тоннельной обделки метрополитенов.

Главным узлом в укладчике является исполнительный орган – манипулятор, который представляет собой сложную телескопическую конструкцию, консольно вынесенную на поворотном валу и монтирующую железобетонные блоки и тюбинги массой до 2 тонн при помощи гидравлического привода.

Так как низкая производительность манипулятора приводит к увеличению всех связанных технологических процессов [1], то оптимальное проектирование манипулятора укладчика является актуальной технической проблемой.

Цель работы – определения оптимального закона подъема элемента обделки манипулятором тоннельного укладчика для увеличения производительности укладчика.

Для решения заданной цели были поставлены следующие задачи:

1. Определение класса функций при подъеме элемента обделки (блока).
2. Нахождение оптимального закона перемещения блока манипулятором укладчика на заданную высоту.

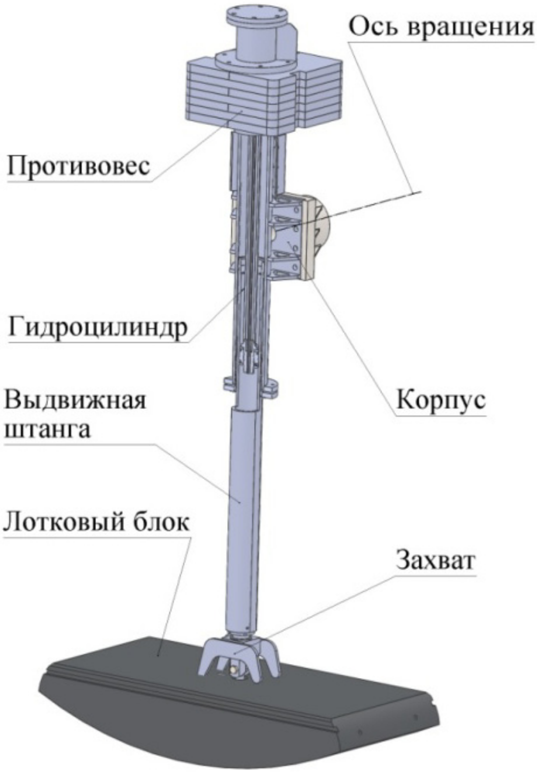
Материал и результаты исследований.

Конструкция манипулятора однорычажного тоннельного укладчика состоит из двух независимых гидравлических приводов: поступательного и вращательного движения. В данной статье будем рассматривать только привод поступательного перемещения блока.

При поступательном перемещении манипулятора, блок кроме поступательного перемещения совершает незначительные колебательные движения, величина которых будет оценена в последующих работах. Поэтому в данной статье будем считать блок и поступательно перемещающиеся с ним части манипулятора одной материальной точкой массой *M* (рис. 1, *а*).

При разработке закона перемещения блока на высоту *L* (рис. 1, *б*) можно исходить из требования минимальной подъемной силы $F_п$ – тогда время подъема *T* будет бесконечным, либо из минимального времени подъема – с бесконечной величиной силы. Поскольку подъемная сила изменяется во времени (а вместе с ней изменяется ускорение $\frac{d^2x}{dt^2}$, где *x* – вертикальное перемещение материальной точки), целесообразно в качестве минимального значения функции цели оптимизационной задачи принять время подъема *T* с ограничением на величину допустимого ускорения a^*.

а) *б)*



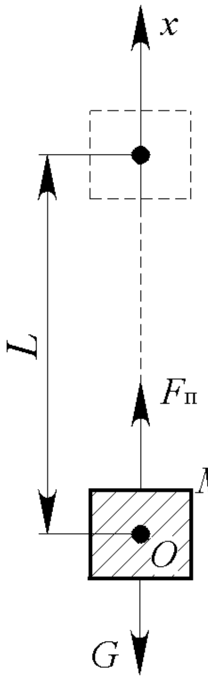


Рис. 1. Манипулятор с блоком (а) и его расчетная схема (б)

При разработке закона перемещения блока на высоту L (рис. 1, *б*) можно исходить из требования минимальной подъемной силы $F_{п}$ – тогда время подъема T будет бесконечным, либо из минимального времени подъема – с бесконечной величиной силы. Поскольку подъемная сила изменяется во времени (а вместе с ней изменяется ускорение $\frac{d^2x}{dt^2}$, где x – вертикальное перемещение материальной точки), целесообразно в качестве минимального значения функции цели оптимизационной задачи принять время подъема T с ограничением на величину допустимого ускорения $a*$.

При поступательном перемещении материальной точки массой M на высоту L предполагается, что разгон и торможение будет осуществляться за одинаковое количество времени $\frac{T}{2}$. Поскольку минимальным значением функции цели оптимизационной задачи является минимально возможное время подъема, то необходимо для определения времени t достижения заданной точки x ввести функцию $t(x)$, являющуюся обратной для функции $x(t)$. Тогда для времени подъема T на высоту L справедливо выражение $T = t(L)$.

Предполагается, что вначале и в конце подъема отсутствует удар, т.е. скорость $\frac{dx}{dt}$ равна нулю.

С математической точки зрения вышеописанная оптимизационная задача примет следующий вид

Найти $x^*: \|x^*\| = \min_{x \in \mathbf{X}} \|x\|,$ (1)

где $\|x\| = x^{\text{inv}}(L)$, $x^{\text{inv}} = t(x)$ – обратная функция для $x(t)$, $\mathbf{X}$ – допустимое множество функций, вторая производная которых нечетна относительно $\frac{T}{2}$, удовлетворяющих условиям

$$\left|\frac{d^2x}{dt^2}\right| \le a^*;\ x(0) = 0;\ x(T) = L;\ \frac{dx}{dt}(0) = \frac{dx}{dt}(T) = 0.$$

Для упрощения анализа оптимизационной задачи и сокращения количества входящих в нее величин введем безразмерные переменные

$$\xi = \frac{x}{L}, \tau = \frac{t}{T}.$$

Так как с переходом к безразмерным величинам время подъема перестает быть переменной величиной, то минимальным значением функции цели оптимизационной задачи будет минимальное ускорение за безразмерное единичное время при подъеме на единичную высоту.

Оптимизационная задача (1) принимает вид:

Найти $\xi^*: \|\xi^*\| = \min_{\xi \in \mathrm{Y}} \|\xi\|,$

где $\|\xi\| = \sup\left\{|\xi''(\tau)| : \tau \in [0,1]\right\}$, Y – допустимое множество функций удовлетворяющих условиям

$$\xi(0) = 0;\ \xi(1) = 1;\ \xi'(0) = \xi'(1) = 0. \tag{2}$$

Здесь $\xi'(\tau) = \frac{d\xi(\tau)}{d\tau}$.

Определим класс функций путем введения пяти элементарных функций [2] перемещения $\xi(\tau)$ с максимальной величиной ускорения A_i $(i = 1..5)$, удовлетворяющих условиям (2)

$$\xi(\tau)_1 = \frac{A_1}{\pi^2}(1 - \cos \pi\tau);\ \xi(\tau)_2 = A_2 \begin{cases} \frac{\tau^2}{2}, & \tau < 0{,}5 \\ -\frac{\tau^2}{2} + \tau - \frac{1}{4}, & \tau \ge 0{,}5 \end{cases};$$

$$\xi(\tau)_3 = A_3\left(\frac{\tau^2}{2} - \frac{\tau^3}{3}\right);\ \xi(\tau)_4 = \frac{A_4}{2\pi}\left(\tau - \frac{\sin 2\pi\tau}{2\pi}\right);$$

$$\xi(\tau)_5 = \frac{A_5}{6\pi^2}\left(2\pi\tau - \sin 2\pi\tau - \frac{1}{6}\sin^3 2\pi\tau\right).$$

Тогда для безразмерных скоростей ω и ускорений α справедливы выражения

$$\omega(\tau)_1 = \frac{A_1}{\pi}\sin\pi\tau,\ \omega(\tau)_2 = A_2\begin{cases}\tau, & \tau < 0{,}5\\ -\tau+1, & \tau \ge 0{,}5\end{cases},$$

$$\omega(\tau)_3 = A_3\left(\tau - \tau^2\right),\ \omega(\tau)_4 = \frac{A_4}{2\pi}\left(1 - \cos 2\pi\tau\right),$$

$$\omega(\tau)_5 = \frac{A_5}{6\pi}\left(2 - 3\cos 2\pi\tau + \cos^3 2\pi\tau\right);$$

$$\alpha(\tau)_1 = A_1\cos\pi\tau,\ \alpha(\tau)_2 = A_2\begin{cases}1, & \tau < 0{,}5\\ -1, & \tau \ge 0{,}5\end{cases},$$

$$\alpha(\tau)_3 = A_3\left(1 - 2\tau\right),\ \alpha(\tau)_4 = A_4\sin 2\pi\tau,$$

$$\alpha(\tau)_5 = A_5\sin^3 2\pi\tau,$$

где максимальные значения ускорений находятся из условия $\xi(1)=1$

$$A = \begin{pmatrix}\frac{\pi^2}{2}\\ 4\\ 6\\ 2\pi\\ 3\pi\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}4{,}93\\ 4\\ 6\\ 6{,}28\\ 9{,}42\end{pmatrix}.$$

На рисунках 2-4 изображены графики функций перемещений, скоростей и ускорений соответственно для пяти рассмотренных законов движения блока.

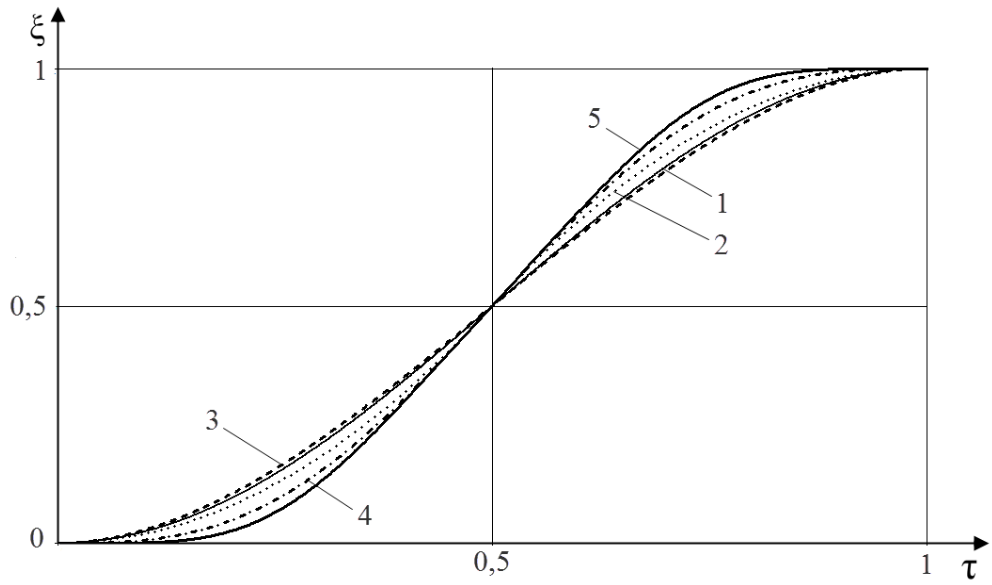


Рис. 2. Графики функций перемещений:
1 $-\xi(\tau)_1$, *2* $-\xi(\tau)_2$, *3* $-\xi(\tau)_3$, *4* $-\xi(\tau)_4$, *5* $-\xi(\tau)_5$

Из рисунка 2 видно, что выбранные законы перемещения незначительно отличаются друг от друга.

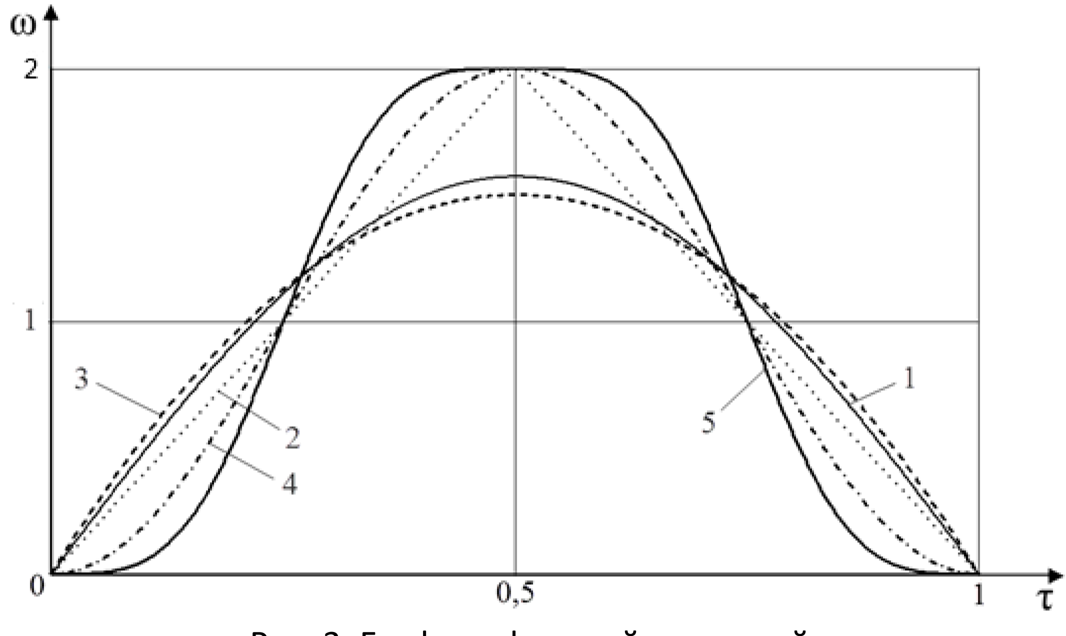


Рис. 3. Графики функций скоростей:
1 $-\ \omega(\tau)_1$, *2* $-\ \omega(\tau)_2$, *3* $-\ \omega(\tau)_3$, *4* $-\ \omega(\tau)_4$, *5* $-\omega(\tau)_5$

Из условия достижения единичного безразмерного перемещения за единичное время следует, что площади криволинейных трапеций, образованных каждой кривой, должны быть одинаковы (рис.3).

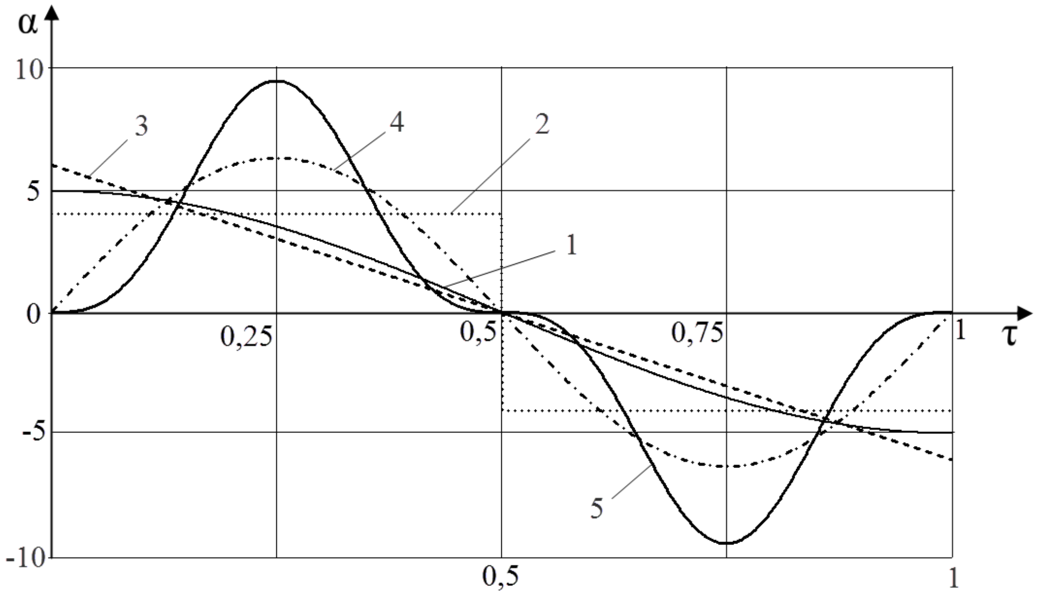


Рис. 4. Графики функций ускорений:
1 $-\alpha(\tau)_1$, *2* $-\alpha(\tau)_2$, *3* $-\alpha(\tau)_3$, *4* $-\alpha(\tau)_4$, *5* $-\alpha(\tau)_5$

На рисунке 4 видно, что функции ускорений, нечетные относительно безразмерного времени $\tau = 0{,}5$ и различаются углом наклона в этой точке. Поскольку наиболее явственно различаются виды движения блока по его ускорению, условимся называть эти законы движения по виду их ускорений:

1 – косинусоидальный; 2 – П-образная функция; 3 – линейный; 4 – синусоидальный; 5 – синусоидальный кубический.

Из постановки оптимизационной задачи вытекает, что искомая функция $\omega(\tau)$ должна иметь минимальный наклон на всем периоде.

В качестве базовой функции выберем функцию скорости при П-образном движении. Назовем пробной функцией производную $\omega(\tau)$ произвольной функции $\xi(\tau)$ из допустимого множества Υ. Возможны два случая. Пробная функция в нуле имеет наклон (а значит и ускорение) больше, чем базовой. Поэтому выбранная функция $\xi(\tau)$ не может являться решением оптимизационной задачи. Рассмотрим второй случай, в котором угол наклона в нуле меньше базового. В начале движения площадь криволинейной трапеции, образованной пробной функцией, меньше площади, образованной базовой функцией. Поэтому обязательно должна быть точка пересечения пробной функции с базовой, где наклон пробной должен быть больше базовой, для уравновешивания площадей. Отсюда следует, что произвольная функция $\xi(\tau)$, не может быть решением, так как найдется время τ, в котором ее вторая производная $\alpha(\tau)$ будет больше, чем при П-образном движении.

Поэтому в дальнейшем можно считать П-образную функцию движения единственной, обладающей минимальным ускорением.

Перейдем к размерным переменным и приведем выражения для времени подъема T, ускорения $a(t)$, скорости $v(t)$, перемещения блока $x(t)$ и растягивающего усилия в штоке гидроцилиндра $F(t)$ для всех пяти рассмотренных законов движения $(i=1..5)$

$$T_i = \sqrt{\frac{A_i L}{a*}}$$

$$x_i = L\xi\left(\frac{t}{T_i}\right),\ v_i(t) = \frac{L}{T_i}\omega_i\left(\frac{t}{T_i}\right),$$

$$a_i(t) = \frac{L}{T_i^2}\alpha_i\left(\frac{t}{T_i}\right),\ F_i(t) = M(g + a_i(t)),$$

где g – ускорение земного притяжения, $\text{м}/c^2$.

Выводы.

1. Получены выражения для времени подъема, осуществляемого по каждому из пяти рассмотренных законов движения блока.

2. Доказано, что при заданных ограничениях на величину ускорения подъем блока на высоту L быстрее всего осуществляется при П-образном законе движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серегин, Д. В. Схема нагружения рабочего органа тоннельного укладчика [Текст] / Д.В. Серегин // Научная сессия, посвященная Дню радио г. Тула: НТО РЭС им. А.С. Попова, 2008. – С. 50-53.

2. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: [Текст]: справ. / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев; – М.: Наука, 1986. – 544 с.

УДК 656.213

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТА РАЗГРУЗОЧНОГО КОМПЛЕКСА В УГОЛЬНОМ ТЕРМИНАЛЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SOLIDWORKS

К.С. Заболотный, доктор технических наук, заведующий кафедрой горных машин и инжиниринга
Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: mmf@ua.fm

А.А. Сирченко, аспирант кафедры горных машин и инжиниринга
Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: kundul@rambler.ru