

# КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА НОЖНИЧНОГО ПОДЪЕМНИКА

Довнар А. Д., Рогач А. Ю.  
Кафедра систем управления,

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

E-mail: dovnar@bsuir.by. aleksandra.rogacli256@gmail.com

*Разработка, ножничных подъемников является актуальной и сложной задачей. Одной из проблем управления, ножничным подъемником является, нелинейность кинематики и динамики механизма. В данной работе приведен вывод кинематических и динамических законов движения, на основании которых возможно разработать систему управления.*

## ВВЕДЕНИЕ

Ножничные подъемники активно используются при строительных работах, погрузках и разгрузках на производстве, автосервисе, а также в робототехнике. Их нелинейное движение может приводить к дискомфорту пассажиров, а также усложняет перемещение на небольшие дистанции. Для обеспечения линейности движения необходимо разработать систему управления, для чего нужно знать кинематику и динамику процесса.

## I. ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМА

Ножничный подъемник — это тип подъемного механизма, состоящий из двух наборов крестообразных секций [1] (рисунок 1). Два параллельных набора необходимо для обеспечения устойчивости. Каждая секция состоит из двух балок, соединенных между собой в центре. В зависимости от требуемой высоты может использоваться разное количество секций. Данная работа описывает тип подъемника, состоящий из одной секции. Секция сверху и снизу имеет по два крепления. Одно из креплений шарнирно закреплено: может вращаться вокруг оси крепления, но не может смещаться в других направлениях. Второе крепление может свободно перемещаться вдоль секции. В данной работе описывается подъемник, приводимый в движение благодаря линейному механизму, закрепленному внизу секции.

Два самых распространенных типов приводов: гидравлический и винтовая передача, гидравлические приводы применяются при высокой грузоподъемности, а винтовая передача для более точного управления и меньших габаритов механизма. В качестве линейного механизма в данной работе используется винтовая передача, приводимая в движение электрическим двигателем. Гайка передачи присоединена к подвижному концу балки. Движение гайки приводит в движение присоединенную балку, что в свою очередь изменяет высоту механизма.

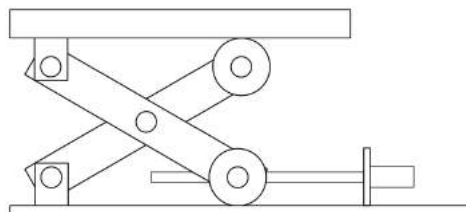


Рис. 1 – Схема ножничного подъемника

## II. КИНЕМАТИКА ПОДЪЕМНИКА

Для описания механизма введем обозначения, показанные на рисунке 2.

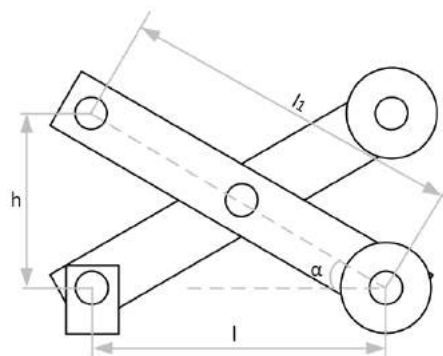


Рис. 2 – Введенные обозначения

Где  $l$  — расстояние между креплениями (управляемая величина),  $l_1$  — длина балки подъемника (постоянная величина),  $\alpha$  — угол между основанием подъемника и балкой (переменная величина),  $h$  — текущая высота одной секции подъемника (переменная величина).

Обе балки описывают окружности вокруг своих точек закрепления на основании. Соответственно, максимальное теоретически возможное значение  $l = l_1$ , а минимальное 0. Точно по этой же причине максимальная высота секции  $h = l_1$ , а минимальная 0. Следовательно, угол  $\alpha$  находится в интервале  $[0^\circ; 90^\circ]$ .

Для получения уравнений кинематики необходимо проанализировать треугольник, в котором основание и высота подъемника являются катетами, а одна из балок — гипотенузой (рисунок 2). Из треугольника можно получить следующие уравнения:

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{l_1^2 - l_2^2}}{l_1} \quad (1)$$

$$\cos \alpha = \frac{l}{l_1} \quad (2)$$

$$h(l) = n \cdot \sqrt{l_1^2 - l_2^2} = n \cdot l_1 \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

Скорость подъема можно найти, взяв производную (3) по  $l$  или  $\alpha$ . Формулы по  $l$  и  $\alpha$  взаимозаменяемы. По  $\alpha$  удобнее проводить анализ, а  $l$  используется для управления.

$$h'(l) = -n \cdot \frac{l}{\sqrt{l_1^2 - l_2^2}} \cdot l' \quad (4)$$

$$h'(\alpha) = n \cdot l_1 \cdot \cos \alpha \cdot \alpha' \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) видно, что скорость подъема зависит не только от скорости изменения управляющего параметра (угла или расстояния), но и от текущего значения параметра. Это поведение нелинейно.

### III. ДИНАМИКА ПОДЪЕМНИКА

В формулах ниже выведена подъемная сила механизма, направленная вертикально вверх. Учитывая, что система полностью симметричная, можно предположить, что любой силе будет соответствовать сила такая же по величине, но обратная по направлению. Если ввести это предположение, сделать проекцию создаваемой винтом силы на балку и проекцию полученной силы на груз, а также учесть формулы (1) и (2), можно получить следующие выражения.

$$F(\alpha) = \frac{F_{acrew}}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \quad (6)$$

$$F(l) = F_{acrew} \cdot \frac{l \cdot \sqrt{l_1^2 - l_2^2}}{l_1^2} \quad (7)$$

где  $F_{acrew}$  – сила, создаваемая винтом.

Из формул (6) и (7) видно, что подъемная сила равна 0, когда  $l = l_1$  (то есть  $h = 0$ ) и  $l = 0$  (то есть  $h = l_1$ ). Для движения в этих точках необходима бесконечная сила на винте.

Преобразование силы в подъемнике нелинейное. Это означает, что добиться линейного подъема будет сложно, так как надо будет добиться линейного ускорения.

Для получения уравнения динамики механизма воспользуемся вторым законом Ньютона. Для этого введем несколько упрощений:

- трение отсутствует;
- масса балок очень мала по сравнению с массой груза.

Соответственно, получаем следующее выражение:

$$m \cdot \alpha = F - m \cdot g,$$

где  $m$  – масса груза на подъемнике,  $\alpha$  – ускорение массы, находящейся на подъемнике,  $F$  –

сила, действующая на массу от подъемного механизма.

Если вместо  $F$  подставить выражение (7), получим:

$$m \cdot \alpha = F_{acrew} \cdot \frac{l \cdot \sqrt{l_1^2 - l_2^2}}{l_1^2} - m \cdot g$$

Соответственно, чтобы добиться линейности необходимо управлять силой по следующему закону [2]:

$$F_{acrew} = \frac{K \cdot l_1^2}{l \cdot \sqrt{l_1^2 - l_2^2}} \quad (8)$$

где  $K$  необходимая для конкретного случая сила (для достижения определенной скорости и/или ускорения).

На рисунке 3 приведен график функции (8):

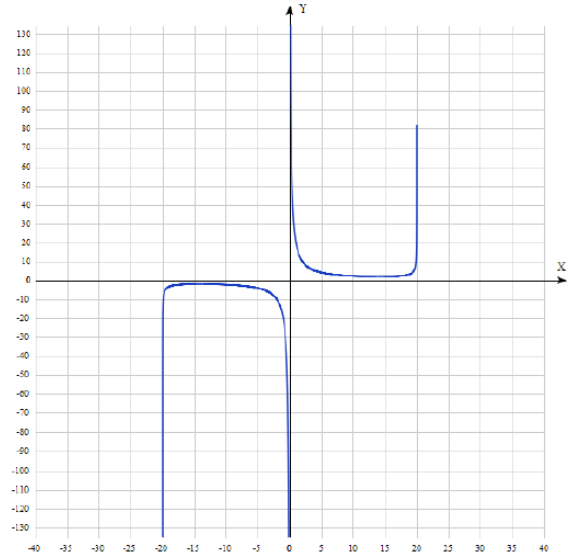


Рис. 3 – График функции  $F_{acrew}$

На графике видно, что на двух краях диапазона положений есть места, где для движения необходима бесконечная сила. Также видно, что есть относительно линейный участок, на котором можно работать с «адекватным» КПД, то есть не затрачивая слишком много силы.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описаны вывод законов кинематики и динамики, которые можно использовать для разработки системы управления ножничным подъемником.

### V. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saxona A. Deriving a Generalized, Actuator Position-Independent Expression for the Force Output of a Scissor Lift C. 18.
2. Zhang W. и др. A Study on the Static Stability of Scissor Lift // TOME.I. 2015. – Т. 9. – No 1. – С. 954-960.