

УДК 62-5

**ПОСТРОЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ НИЖНЕГО ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ ПОДНЯТИЯ НОГИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗВИВАЕМЫХ МОМЕНТОВ СИЛ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭКЗОСКЕЛЕТА**

**И. В. ЛИСТВИН, К. А. КУНЧЕВСКИЙ, Р. В. ЛЕВАНОВСКАЯ**  
(Представлено: Е. В. БРИТИК)

*В целях рационального проектирования конструкции экзоскелета необходимо понимать, какие приближенные характеристики должен иметь конечный продукт, проведено кинематическое исследование с использованием ранее полученных данных.*

**Введение.** При проектировании экзоскелета важно учитывать не только глобальные движения, такие как ходьба или бег, но и элементарные, из которых они состоят. Одним из таких базовых движений является поднятие ноги. Несмотря на кажущуюся простоту, именно этот процесс определяет возможность шага, подъема по лестнице и сохранения равновесия. Для корректного выбора параметров привода необходимо рассмотреть биомеханику данного движения и определить характерные моменты сил, возникающие в тазобедренном суставе. Построение кинематической схемы позволяет выявить закономерности изменения нагрузок и оценить требования к исполнительным механизмам экзоскелета.

**Построение схемы.** Для анализа создается кинематическая схема нижнего опорно-двигательного аппарата, включающая бедро, голень. Каждое звено представляется в виде жесткого стержня с заданной длиной и массой, а суставы моделируются как врачательные шарниры. На схеме отображаются:

- силы тяжести звеньев ( $m_1g$  и  $m_2g$ );
- силы инерции, возникающие при ускорении движения ( $F_{i1}$ ,  $F_{i2}$ );
- реактивные силы в суставах;
- углы поворота бедра и голени относительно вертикали;
- направления осей координат для плоскостей (XZ) и (YZ).

С помощью схемы на рисунке 1 определяется момент, развиваемый бедренным суставом ( $M$ ), необходимый для совершения движения. Для этого составляется уравнение равновесия моментов относительно тазобедренного сустава, учитывающее как статические (сила тяжести), так и динамические (инерционные) составляющие. Полученная зависимость  $M(t)$  позволяет определить нагрузку на привод экзоскелета и выбрать оптимальные параметры двигателя.

Для мужчины ростом 180см и весом 75кг:  $l_1=0.4\text{м}$ ,  $l_2=0.45\text{м}$ ,  $m_1= 8.5\text{кг}$ ,  $m_2= 4\text{кг}$ . Имея кинематическую схему и законы движения голени и бедра от переменной времени  $x$  можно составить уравнение движения для нахождения  $M$ .

$$M(x) + m_1g \cdot \sin(\alpha(x)) \cdot \frac{l_1}{2} + m_2g \cdot \sin(\alpha(x)) \cdot (l_1 + \frac{l_2}{2}) - F_{i1}(x) \cdot (l_1 + l_2) = 0 \quad (1)$$

При этом для плоскости: (XZ):

$$\begin{aligned} a(x) &= j \cdot x^8 + k \cdot x^7 + g \cdot x^6 + h \cdot x^5 + a \cdot x^4 + b \cdot x^3 + c \cdot x^2 + d \cdot x + f \\ j &= 19.3834; k = -70.44241; \\ g &= 51.57097; h = 92.78267; \\ a &= -156.60816; b = 57.79217; \\ c &= 6.10877; d = 0.336934; \\ f &= -0.905949 \end{aligned} \quad (2)$$

$$F_{i1}(x) = a(x) \cdot (m_1 + m_2) = \frac{d^2}{dx^2} \alpha(x) \cdot (l_1 + l_2) \cdot (m_1 + m_2) \quad (3)$$

Тогда формула имеет вид:

$$\begin{aligned} M(x) + m_1g \cdot \sin(\alpha(x)) \cdot \frac{l_1}{2} + m_2g \cdot \sin(\alpha(x)) \cdot (l_1 + \frac{l_2}{2}) - \frac{d^2}{dx^2} \alpha(x) \cdot (l_1 + l_2)^2 \cdot (m_1 + m_2) &= 0 \\ \Downarrow \\ M(x) &= -m_1g \cdot \sin(\alpha(x)) \cdot \frac{l_1}{2} - m_2g \cdot \sin(\alpha(x)) \cdot (l_1 + \frac{l_2}{2}) + \frac{d^2}{dx^2} \alpha(x) \cdot (l_1 + l_2)^2 \cdot (m_1 + m_2) \end{aligned} \quad (4)$$

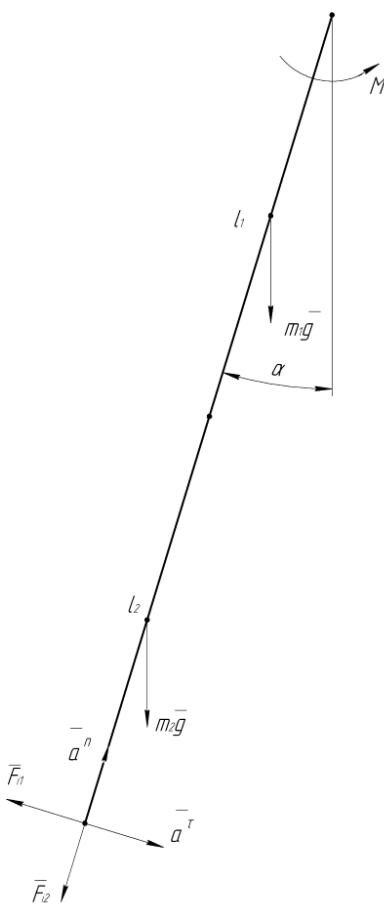


Рисунок 1. – Кинематическая схема

Где:

$M$  – искомый момент бедра;

$l_1$  – длина бедра;

$l_2$  – длина голени;

$m_1g$  – сила тяжести бедра;

$m_2g$  – сила тяжести голени;

$a^t$  – тангенциальное ускорение ноги и  $F_{11}$  сила инерции соответствующая ему;

$a^n$  – нормальное ускорение ноги и  $F_{12}$  сила инерции соответствующая ему;;

Для плоскости (YZ): кинематическая схема остается неизменной, изменяется лишь закон зависимости движения изменения угла бедра от времени.

$$\begin{aligned}
 a(x) &= j \cdot x^8 + k \cdot x^7 + g \cdot x^6 + h \cdot x^5 + a \cdot x^4 + b \cdot x^3 + c \cdot x^2 + d \cdot x + f \\
 j_1 &= 18.27182; k_1 = -93.17803; \\
 g_1 &= 188.14435; h_1 = -191.83228; \\
 a_1 &= 94.78326; b_1 = -2.16079; \\
 c_1 &= -15.20762; d_1 = -0.449985; \\
 f_1 &= 1.59198
 \end{aligned} \tag{5}$$

**Результаты вычислений.** Проведя вычисления в программе Mathcad получаем график зависимости момента, развиваемого бедром в каждый момент времени совершения движения (рис.2-3).

На графике можно заметить, что пиковые развиваются моменты  $\sim 60$  Нм. Так же стоит отметить, что в формуле выше и на кинематической схеме рассматривается только одно состояние в один момент времени, а движение в обратную сторону не учитывается. Это связано с тем, что при обратном движении в формуле лишь меняются знаки слагаемых, в результате чего график показывает противоположные по

знаку значения, а поскольку в данной статье нас интересует лишь пиковые развиваемые моменты данный аспект можно опустить. В дальнейшем этот график можно использовать для расчета примерного потребления энергии мотором, зная его потребление Нм/А.

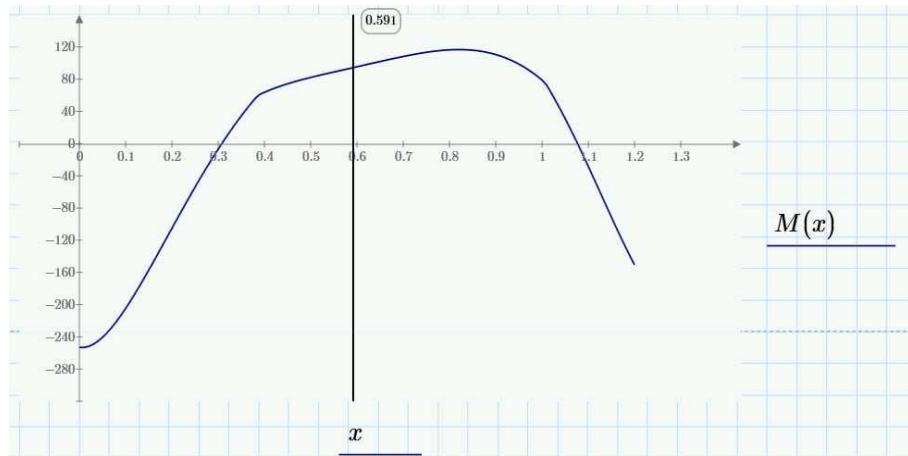


Рисунок 2. – График развиваемых моментов в бедренном суставе при поднятии ноги в плоскости YZ

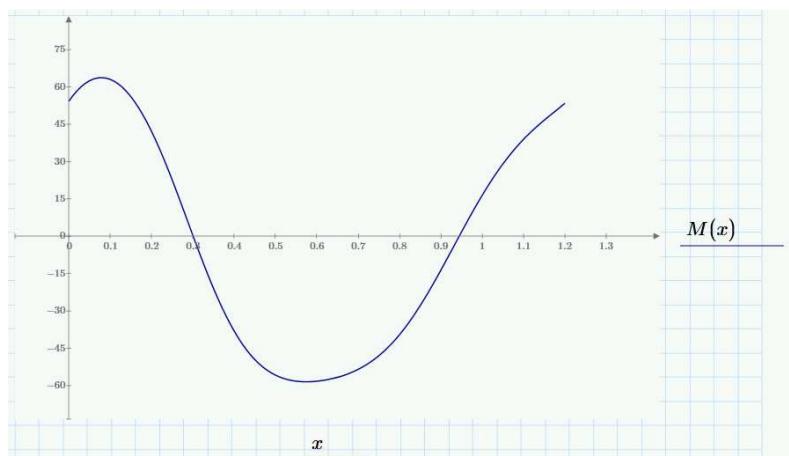


Рисунок 3. – График развиваемых моментов в бедренном суставе при поднятии ноги в плоскости XZ

В результате построения кинематической схемы движения поднятия ноги определены основные силы и моменты, действующие на звенья нижней конечности. Расчет показал, что максимальные моменты в тазобедренном суставе достигают около 60 Нм, что соответствует реальной нагрузке при естественном движении человека. Полученные данные могут служить основой для проектирования исполнительных механизмов экзоскелета, обеспечивающих поддержку и повторение биомеханики движения. Таким образом, построенная схема является важным этапом в создании функциональной модели экзоскелета и позволяет оценить требования к его приводной системе.