

УДК 62-5

**ПОСТРОЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ НИЖНЕГО ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ ПРИСЕДАНИЙ 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.** Приседания представляют собой одно из наиболее энергозатратных и нагружающих движений нижних конечностей. В отличие от ходьбы или бега, здесь ключевая нагрузка сосредоточена на коленном суставе, который должен выдерживать вес всего корпуса. Для экзоскелета это движение является критическим тестом на прочность и эффективность приводной системы. Определение моментов сил при приседании позволяет оценить, какие усилия должен развивать привод, чтобы поддерживать или облегчать движение человека, сохраняя при этом естественную биомеханику. **Построение схем.** 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 вращательные 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 в коленном суставе ( $M$ ), необходимый для совершения движения. Для этого составляется уравнение равновесия моментов относительно коленного 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 180 см и весом 75 кг:  $l_1=0.4 \text{ м}$ ,  $l_2=0.45 \text{ м}$ ,  $m_1=8.5 \text{ кг}$ ,  $m_2=4 \text{ кг}$ . Имея кинематическую схему и законы движения голени и бедра от переменной времени можно составить уравнение движения для нахождения  $M$ .

$$M(x) + M_0(x) + m_1 g \frac{l_1}{2} \sin(\alpha(x)) + m_2 g \frac{l_2}{2} \sin(\beta(x)) - N(x) \cdot l_2 \sin(\beta(x)) + F_{i1}(x) \cdot l_2 = 0 \quad (1)$$

При этом:

$$m_o = (m_m + m_l + m_s) \quad (2)$$

где  $m_t$  – масса всего тела не считая ног

$$\begin{aligned} a(x) &= j \cdot x^8 + k \cdot x^7 + g \cdot x^6 + h \cdot x^5 + a \cdot x^4 + b \cdot x^3 + c \cdot x^2 + d \cdot x + f \\ j &= 156.093; k = -744.36674; \\ g &= 1396.41101; h = -1296.16041; \\ a &= 622.87008; b = -162.79197; \\ c &= 28.66549; d = 0.2776239; \\ f &= 0.1868924 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \beta(x) &= j \cdot x^8 + k \cdot x^7 + g \cdot x^6 + h \cdot x^5 + a \cdot x^4 + b \cdot x^3 + c \cdot x^2 + d \cdot x + f \\ j &= -93.42785; k = 450.99569; \\ g &= -834.7232; h = 723.24563; \\ a &= -287.74457; b = 58.06729; \\ c &= -17.74346; d = 0.124766; \\ f &= 3.062 \end{aligned} \quad (4)$$

$$N(x) = m_2 g + m_0 g + m_1 g + F_{i2}(x) \cdot \cos(\beta(x)) - F_{il}(x) \cdot \sin(\beta(x)) \quad (5)$$

$$F_{il}(x) = a^t(x) \cdot m_2 = \frac{d^2}{dx^2} \beta(x) \cdot l_2 \cdot m_2 \quad (6)$$

$$F_{i2}(x) = a^n(x) \cdot m_2 = \left( \frac{d}{dx} \beta(x) \right)^2 \cdot l_2 \cdot m_2 \quad (7)$$

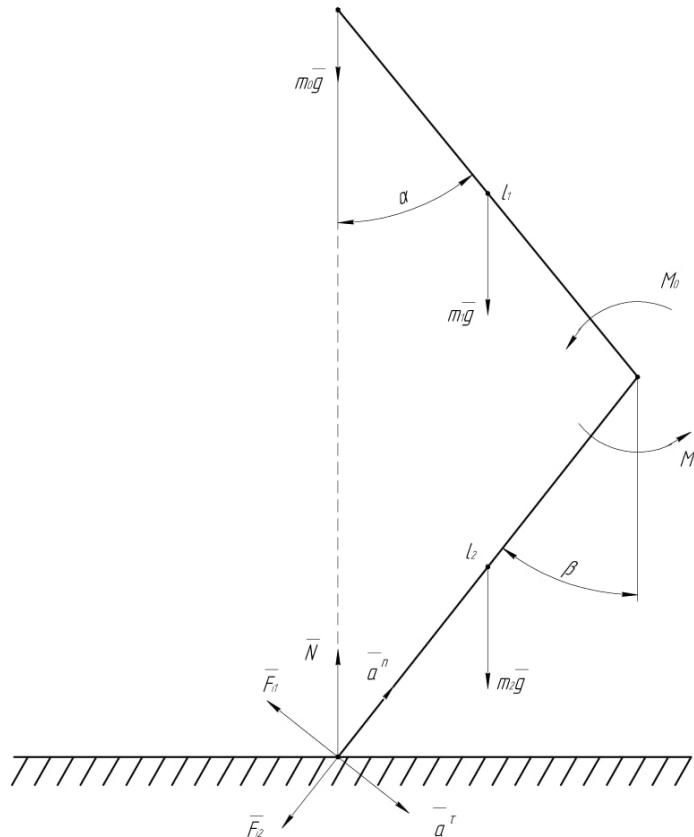


Рисунок 1. – Кинематическая схема

Где:

M – искомый момент колена;

l<sub>1</sub> – длина бедра;l<sub>2</sub> – длина голени;m<sub>0</sub>g – сила тяжести корпуса;m<sub>1</sub>g – сила тяжести бедра;m<sub>2</sub>g – сила тяжести голени;a<sup>t</sup> – тангенциальное ускорение голени и F<sub>il</sub> сила инерции соответствующая ему;a<sup>n</sup> – нормальное ускорение голени и F<sub>i2</sub> сила инерции соответствующая ему;M<sub>0</sub> – момент создаваемый в коленном суставе под действием силы тяжести корпуса;

N – сила реакции пола на ногу;

Принимая все выше указанные переменные общая формула имеет вид:

$$\begin{aligned} M(x) + M_0(x) + m_1 g \frac{l_1}{2} \sin(\alpha(x)) + m_2 g \frac{l_2}{2} \sin(\beta(x)) - N(x) \cdot l_2 \sin(\beta(x)) + F_{il}(x) \cdot l_2 &= 0 \\ \Downarrow \\ M = -M_0(x) - m_1 g \frac{l_1}{2} \sin(\alpha(x)) - m_2 g \frac{l_2}{2} \sin(\beta(x)) + N(x) \cdot l_2 \sin(\beta(x)) - F_{il}(x) \cdot l_2 \end{aligned} \quad (8)$$

**Результаты вычислений.** Проведя вычисления в программе Mathcad получаем график зависимости момента, развивающегося коленным суставом в каждый момент времени совершения движения (рис. 2).



Рисунок 2. – График развивающихся моментов в коленном суставе  
при приседаниях

Исходя из полученного графика можно сделать вывод что пиковое значение момента равняется примерно 115 Нм. Стоит так же отметить что моменты получаются с знаком минус, в сущности на ответ и на вывод это не оказывает влияние тк. в данном исследовании рассматриваются пиковые значения моментов для дальнейшего рассмотрения и подбора электромоторов и редукторов. В дальнейшем этот график можно использовать для расчета примерного потребления энергии мотором, зная его потребление Нм/А.