

УДК 62-5

**ПОСТРОЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ НИЖНЕГО ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ СГИБАНИЯ ГОЛЕНИ 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.*

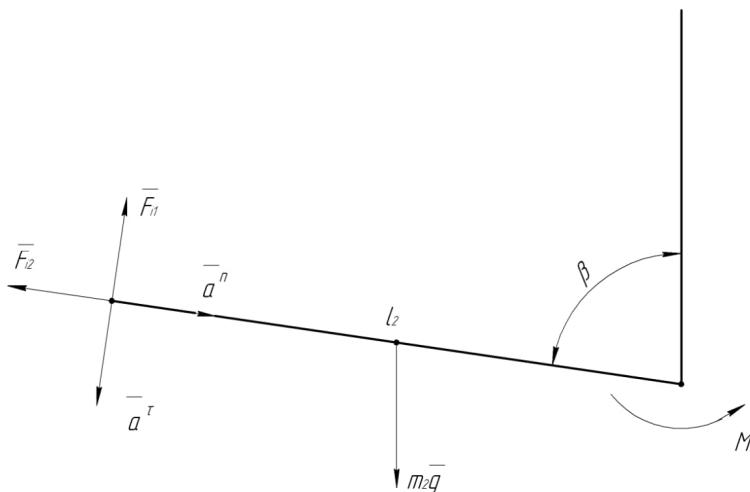
**Введение.** Сгибания и разгибания колена — это одно из самых частых и быстрых движений нижних конечностей, которое играет ключевую роль в беге, прыжках и даже в поддержании устойчивости при ходьбе. В отличие от приседаний, здесь нагрузка сосредоточена преимущественно на голени и коленном суставе, без вовлечения массы всего корпуса. Для экзоскелета такие движения важны с точки зрения скорости реакции и точности управления приводами. Определение моментов сил при сгибании позволяет задать требования к мотору, отвечающему за динамику и плавность работы коленного узла.

**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 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.



**Рисунок 1. – Кинематическая схема**

Где:

$M$  – искомый момент колена;  $l_2$  – длина голени;  $m_2g$  – сила тяжести всей ноги;

$a^t$  – тангенциальное ускорение голени и  $F_{i1}$  сила инерции соответствующая ему;

$a^n$  – нормальное ускорение голени и  $F_{i2}$  сила инерции соответствующая ему;

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 от переменной времени можно составить уравнение движения для нахождения  $M$ .

$$M(x) + m_2 g \cdot \sin(\beta(x)) \cdot l_2 - F_{il}(x) \cdot l_2 = 0 \quad (1)$$

При этом:

$$\begin{aligned} \beta(x) &= j \cdot x^8 + k \cdot x^7 + g \cdot x^6 + h \cdot x^5 + a \cdot x^4 + b \cdot x^3 + c \cdot x^2 + d \cdot x + f \\ j &= -398.42081; k = 1174.4038; \\ g &= -1011.88652; h = -79.00969; \\ a &= 477.65918; b = -151.34967; \\ c &= -12.81605; d = 1.897965; \\ f &= 2.952143 \end{aligned} \quad (2)$$

$$F_{il}(x) = a^t(x) \cdot m_2 = \frac{d^2}{dx^2} \beta(x) \cdot l_2 \cdot m_2 \quad (3)$$

Тогда формула имеет вид:

$$\begin{aligned} M(x) + m_2 g \cdot \sin(\beta(x)) \cdot l_2 - F_{il}(x) \cdot l_2 &= 0 \\ \downarrow \\ M &= -m_2 g \cdot \sin(\beta(x)) \cdot l_2 + F_{il}(x) \cdot l_2 \end{aligned} \quad (4)$$

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

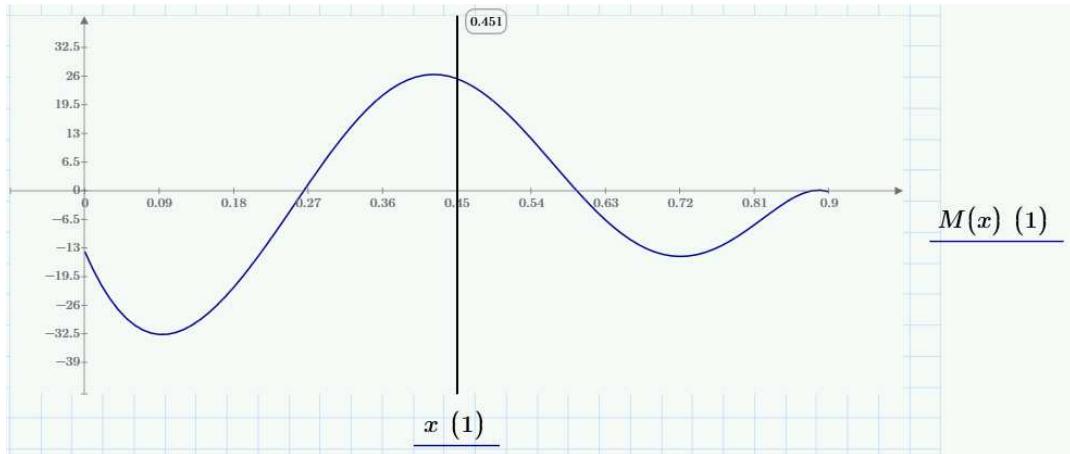


Рисунок 2. – График развивающихся моментов в коленном суставе при сгибаниях

Исходя из полученного графика можно сделать вывод что максимальные развивающиеся моменты довольно малы и равняются примерно 30 Нм. Это связано с малой массой голени и тем что в движении принимает участие лишь голень и сам коленный сустав не нагружен весом всего остального тела. В дальнейшем этот график можно использовать для расчета примерного потребления энергии мотором, зная его потребление Нм/А.