

УДК 62-5

ПОСТРОЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ НИЖНЕГО ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ ХОДЬБЫ И БЕГА, 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 приблизительные характеристики должен иметь конечный продукт, проведено кинематическое исследование с использованием ранее полученных данных.

Введение. Для рационального проектирования экзоскелета необходимо определить основные характеристики, обеспечивающие естественное движение человека. Одной из ключевых задач является расчет моментов сил, развивающихся при движениях нижних конечностей. Особое внимание уделяется действию поднятия ноги, так как оно является базовым элементом ходьбы и других повседневных движений. На основе имеющихся биомеханических данных выполняется построение кинематической схемы, позволяющей определить закономерности изменения моментов и использовать результаты при проектировании приводов 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 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, развивающийся 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 можно составить уравнение движения для нахождения M .

$$\begin{aligned}
 M - M_0 + m_1 g \frac{l_1}{2} \cdot \sin(\alpha) - F_{il} l_1 + m_2 g (l_1 \cdot \sin(\alpha) + \frac{l_2}{2} \cdot \sin(\beta)) + \\
 + N \cdot (l_2 \sin(\beta) + l_1 \sin(\alpha)) - F_{mp} \cdot |(l_2 \cos(\beta) + l_1 \cos(\alpha))| \\
 - F_{i2} \cdot \cos(\beta) \cdot |(l_2 \cos(\beta) + l_1 \cos(\alpha))| + F_{i2} \cdot |\sin(\beta)| \cdot (l_2 \sin(\beta) + l_1 \sin(\alpha)) \\
 - F_{i3} \cdot \cos(\beta) \cdot |(l_2 \sin(\beta) + l_1 \sin(\alpha))| + F_{i3} \cdot |\sin(\beta)| \cdot (l_2 \cos(\beta) + l_1 \cos(\alpha)) = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

При этом:

$$\begin{aligned}
 \alpha(x) = j \cdot x^8 + k \cdot x^7 + g \cdot x^6 + h \cdot x^5 + a \cdot x^4 + b \cdot x^3 + c \cdot x^2 + d \cdot x + f \\
 j = 7506.16861; k = -41836.4387; g = 76919.6647; h = -67807.1959; \\
 a = 32208.1159; b = -8388.23378; c = 1109.83955; d = -56.71974; f = 0.633388
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 \beta(x) = j \cdot x^8 + k \cdot x^7 + g \cdot x^6 + h \cdot x^5 + a \cdot x^4 + b \cdot x^3 + c \cdot x^2 + d \cdot x + f \\
 j = 118773.77; k = -266637.031; \\
 g = 228672.258; h = -91208.5872; \\
 a = 15572.0087; b = -461.65065; \\
 c = 59.34287; d = -6.519491; \\
 f = 1.7315
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$m_o = (m_m + m_l + m_2) \tag{5}$$

где m_t – масса всего тела не считая ног,

$$N(x) = m_2 g + m_0 g + m_1 g + F_{i3}(x) \cdot \cos(\beta(x)) + F_{i2}(x) \cdot \sin(\beta(x)) - F_{i1}(x) \cdot \sin(\alpha(x)) \quad (6)$$

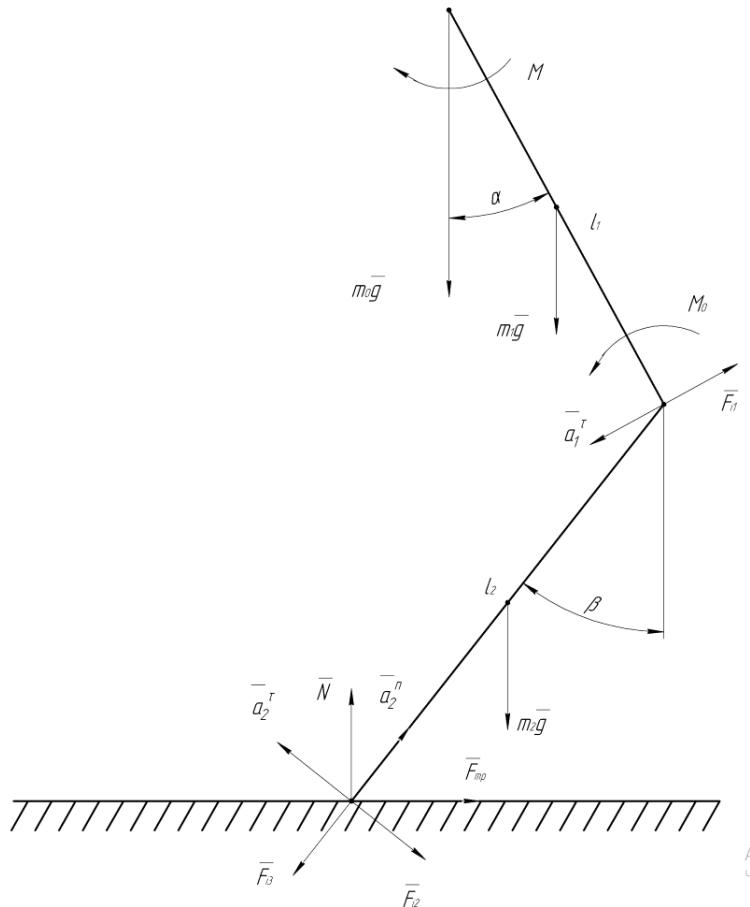


Рисунок 1. – Кинематическая схема

Где:

M – искомый момент бедра;

l_1 – длина бедра;

l_2 – длина голени;

m_0g – сила тяжести всего остального тела;

m_1g – сила тяжести бедра;

m_2g – сила тяжести голени;

a_1^t – тангенциальное ускорение бедра и F_{i1} сила инерции соответствующая ему;

M_0 – момент создаваемый в коленном суставе под действием силы тяжести всего тела что выше ноги;

N – сила реакции пола на ногу;

F_{tp} – сила трения пола с поверхностью ноги;

a_2^t – тангенциальное ускорение голени и F_{i2} сила инерции соответствующая ему;

a_2^n – нормальное ускорение голени и F_{i3} сила инерции этого ускорения соответственно;

N не существует постоянно и будет не равно 0 только на отрезке t_1-t_2 когда исследуемая нога касается пола;

$$F_{mp}(x) = N(x) \cdot \mu \quad (7)$$

$\mu=0.8$

Как и в случае с N , сила трения скольжения существует только на отрезке t_1-t_2 когда исследуемая нога касается пола;

$$F_{i1}(x) = a_1^r(x) \cdot m_1 = \frac{d^2}{dx^2} \alpha(x) \cdot l_1 \cdot m_1; \quad (8)$$

$$F_{i2}(x) = a_2^r(x) \cdot m_2 = \frac{d^2}{dx^2} \beta(x) \cdot l_2 \cdot m_2; \quad (9)$$

$$F_{i3}(x) = a_2^n(x) \cdot m_2 = \left(\frac{d}{dx} \beta(x) \right)^2 \cdot l_2 \cdot m_2; \quad (10)$$

Вынеся M за знак равенства и переписав формулу для использования в программе Mathcad итоговая формула принимает вид:

$$\begin{aligned} M(x) = M_0(x) - m_1 g \frac{l_1}{2} \cdot \sin(\alpha(x)) + F_{i1}(x) \cdot l_1 - m_2 g (l_1 \cdot \sin(\alpha(x)) + \frac{l_2}{2} \cdot \sin(\beta(x))) - \\ - N(x) \cdot (l_2 \sin(\beta(x)) + l_1 \sin(\alpha(x))) + F_{mp}(x) \cdot \left| (l_2 \cos(\beta(x)) + l_1 \cos(\alpha(x))) \right| \\ + F_{i2}(x) \cdot \cos(\beta) \cdot \left| (l_2 \cos(\beta(x)) + l_1 \cos(\alpha(x))) \right| - F_{i2}(x) \cdot \left| \sin(\beta(x)) \right| \cdot (l_2 \sin(\beta(x)) + l_1 \sin(\alpha(x))) \\ + F_{i3}(x) \cdot \cos(\beta(x)) \cdot \left| (l_2 \sin(\beta(x)) + l_1 \sin(\alpha(x))) \right| - F_{i3}(x) \cdot \left| \sin(\beta(x)) \right| \cdot (l_2 \cos(\beta(x)) + l_1 \cos(\alpha(x))) \end{aligned} \quad (11)$$

Результаты вычислений. Проведя вычисления в программе Mathcad получаем график зависимости момента, развивающегося бедром в каждый момент времени совершения движения.

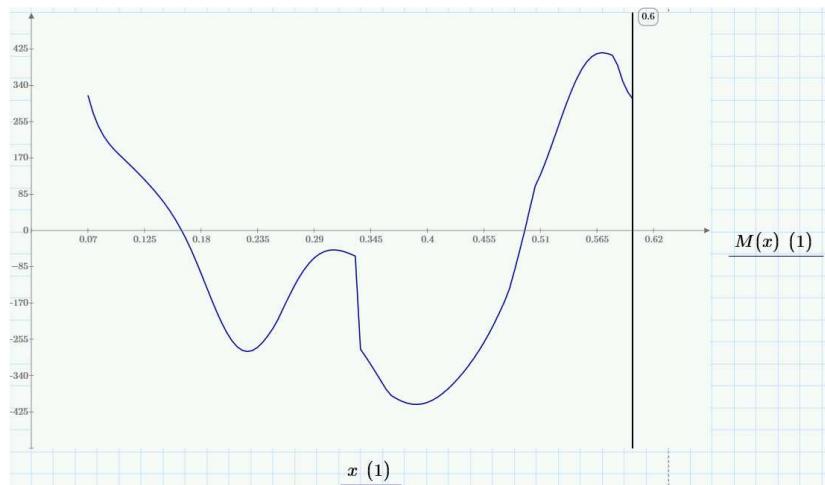


Рисунок 2. – График развивающихся моментов в бедре при беге

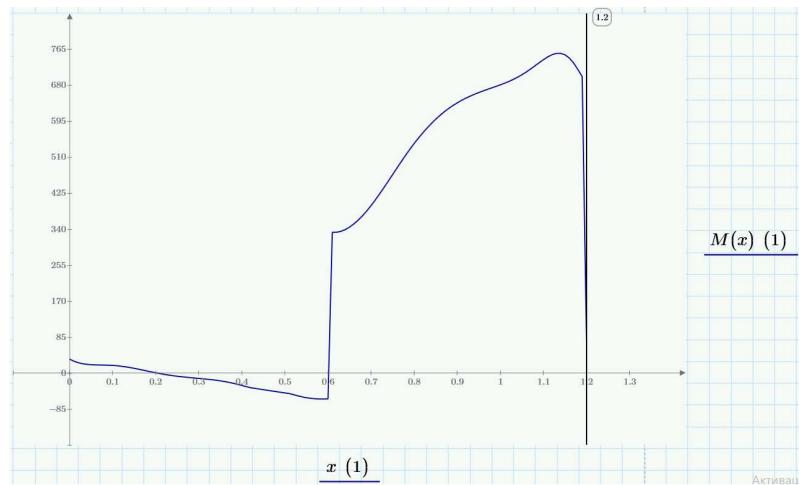


Рисунок 3. – График развивающихся моментов в бедре при ходьбе

При беге график демонстрирует значительный развивающий момент порядка 200-400 Нм, что связано с фазами активного отталкивания и приземления ноги. Так резкие изменения в графике связаны с тем что нога на участке 0.33-0.51с касается пола. Эти пики существенно превышают значения, характерные для ходьбы, и требуют от конструкции экзоскелета повышенной мощности приводов, а также запаса прочности в узлах крепления и сочленениях. Поддерживать настолько большие моменты с сохранением угловой скорости для одного небольшого мотора с редуктором будет невозможно. Ввиду этого следует предусмотреть помочь ноге лишь при поднятии ноги или при отталкивании. Так же может потребоваться интеграция элементов пассивного экзоскелета таких как пружины, газлифты и тд.

При ходьбе развивающие моменты имеют относительно плавный характер. Резкий скачок графика на участке 0.6-1.2с связан с тем что в этот промежуток времени нога касается пола. Не принимая во внимание этот пик максимальные развивающие моменты равные примерно 60 Нм. Это отражает более равномерное распределение нагрузок и меньшую динамичность по сравнению с бегом.