

УДК 62-5

## ИЗМЕРЕНИЕ И НАХОЖДЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЖНЕГО ОТДЕЛА ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА С ЦЕЛЬЮ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ЭКЗОСКЕЛЕТА

И. В. ЛИСТВИН, К. А. КУНЧЕВСКИЙ, Р. В. ЛЕВАНОВСКАЯ

(Представлено: Е. В. БРИТИК)

*В целях рационального проектирования конструкции экзоскелета необходимо понимать средние физические характеристики человеческого тела, исследованы нижние конечности с целью установления их физических параметров.*

**Введение.** Для разработки и создания действующего экзоскелета человека необходимо в первую очередь определить характеристики, которым должен соответствовать конечный продукт. Это особенно важно при проектировании тяжелых активных экзоскелетов, которые должны не только полностью соответствовать характеристикам человеческого тела, но и превосходить их. В случае более простых вариантов экзоскелетов задачи становятся более тривиальными и сводятся к облегчению выполнения различных действий с целью экономии энергии. Данная отрасль активно развивается в настоящее время, что связано с постоянным техническим прогрессом в области электроники, особенно в сфере электродвигателей. С увеличением доступности микропроцессоров и бесщеточных электромоторов теоретически любой энтузиаст, обладающий необходимыми знаниями и средствами, может разработать экзоскелет. Это обусловлено относительной простотой конструкции экзоскелетов.

**Задача.** Главная задача состоит в создании носимого механизма, который будет обладать теми же степенями свободы, что и человеческое тело. На рисунке 1 представлена кинематическая схема экзоскелета. Для упрощения анализа экзоскелет можно разделить на три основных отдела: нижние конечности (ноги), спинной отдел и верхние конечности (лопатки и руки). При проектировании экзоскелета особое внимание необходимо уделить спинному и нижним отделам. Эти части должны не только выполнять все необходимые движения, но и обеспечивать поддержку веса тела, разгружать спину пользователя, а также выдерживать нагрузку от верхнего отдела экзоскелета. Верхний отдел экзоскелета должен быть достаточно мобильным, чтобы при движении рук пользователя охватывать весь диапазон движений и не вызывать ощущение скованности. Благодаря предложенной схеме можно описать тело человека с точки зрения кинематического механизма, что позволяет определить моменты, скорости и ускорения, развивающиеся каждым суставом. В дальнейшем эта информация будет необходима на этапе проектирования. Таким образом основной задачей данной статьи является рассмотрение нижнего отдела тела человека (рис.2) с целью измерения развиваемых скоростей, ускорений и предельных углов каждого из суставов.

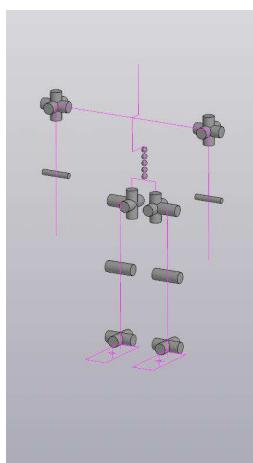


Рисунок 1. – Кинематическая схема экзоскелета

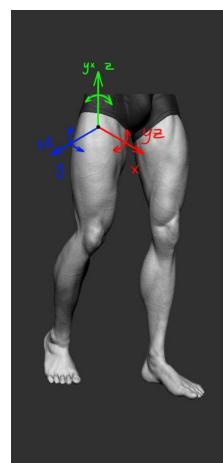


Рисунок 2. – Назначение осей вращения нижнего отдела тела

**Измерения.** Для нахождения всех указанных параметров было принято решение провести замеры различных типов движений, таких как: ходьба, легкий бег, быстрый бег, приседания, поднятие ноги вперед и назад, а также поднятие ноги в сторону и сгибание колена. Все действия, кроме бега и ходьбы, вы-

полнялись с максимальным усилием и инерцией, чтобы определить пределы, на которые способно тело человека, и получить максимальные значения физических характеристик, которым должен соответствовать экзоскелет. Выборка составляла 8 человек разной физической подготовки и телосложения. После у каждого типа движения, будь-то поднятие ноги или бег, выбиралось произвольно 5 полных циклов этого движения. Далее один цикл делится на 16 кадров и эти кадры переносятся в программу с возможностью простановки размеров и углов. В нашем варианте для такой задачи подходят программы, предназначенные для создания чертежей и 3д проектирования, например, Компас или Solidworks. Ввиду простоты задачи используется средство компьютерного проектирования "Компас-3D". С помощью базовых инструментов производиться замер углов отклонения от вертикальной оси каждого из сегментов конечности (рис.3).



Рисунок 3. – Метод измерения углов

Где отклонение влево принимаем со знаком минус. Стоит учесть, что для получения угла отклонения колена требуются лишь отнять отклонение относительно главной оси от угла отклонения бедра после чего полученное число взять по модулю отнять от 3,142. После полученные значения в радианах заносятся в таблицу. В итоге для одного цикла можно построить график зависимости углов отклонений от времени.

Получив график зависимости углов от времени по точкам можем преобразовать его в функцию используя модель множественной линейной регрессии (формула 1). Первая и вторая производные полученной функции будут являться графиком угловых скоростей и угловых ускорений соответственно.

$$y = jx_1^6 + kx_1^5 + gx_1^6 + hx_1^5 + ax_1^4 + bx_1^3 + cx_1^2 + dx_1 + f \quad (1)$$

**Результат.** Выполнив все вышеописанные действия для каждого типа движения мы получим предельные углы, развиваемые скорости и ускорения для каждого из суставов.

Анализ ходьбы показывает сравнительно низкие угловые скорости и ускорения. Для бедра (XZ) максимальные значения составили  $\omega_{\max} = 0,4903$  рад,  $\omega_{\min} = -0,2766$  рад,  $\dot{\omega}_{\max} = 3.13$  рад/с и  $\ddot{\omega}_{\max} = 6.42$  рад/с<sup>2</sup>, а для колена (XZ) —  $\omega_{\max} = 5,8$  рад,  $\omega_{\min} = 2,0167$  рад  $\dot{\omega}_{\max} = 5.8$  рад/с и  $\ddot{\omega}_{\max} = 14.13$  рад/с<sup>2</sup>. Это указывает, что экзоскелет, предназначенный только для облегчения ходьбы, не предъявляет высоких требований к динамическим характеристикам приводов.

При медленном беге наблюдается значительный рост угловых скоростей и ускорений по сравнению с ходьбой. Угловая скорость колена (XZ) возросла до  $\omega_{\max} = 10.7$  рад/с,  $\omega_{\max} = 2,9573$  рад,  $\omega_{\min} = 1,5291$  рад,  $\dot{\omega}_{\max} = 55,6$  рад/с<sup>2</sup>. Угловое ускорение бедра (XZ) достигло  $\ddot{\omega}_{\max} = 43.2$  рад/с<sup>2</sup> так же  $\omega_{\max} = 0,5881$  рад,  $\omega_{\min} = -0,5277$  рад,  $\dot{\omega}_{\max} = 5,2$  рад/с. Это означает, что экзоскелет, поддерживающий бег, должен иметь приводы с более высоким быстродействием.

Быстрый бег предъявляет самые высокие динамические требования. Зафиксированы максимальные значения угловых скоростей для колена  $\omega_{\max} = 18.2$  рад/с,  $\omega_{\max} = 2,8885$  рад,  $\omega_{\min} = 0,9238$  рад,  $\dot{\omega}_{\max} = 64,13$  рад/с<sup>2</sup>. Ускорений для бедра  $\ddot{\omega}_{\max} = 92$  рад/с<sup>2</sup>,  $\dot{\omega}_{\max} = 10,4$  рад/с,  $\omega_{\max} = 0,6781$  рад,  $\omega_{\min} = -0,8559$  рад. Проектирование экзоскелета для этого режима является наиболее сложной задачей, так как механизм должен с запасом превосходить эти пиковые характеристики.

Данное движение определяет предельные углы сгибания/разгибания и отведения/приведения бедра. В плоскости XZ диапазон углов бедра составил от  $\omega_{\min} = -0.9326$  рад до  $\omega_{\max} = 1.6518$  рад,  $\dot{\omega}_{\max} = 6,9$  рад/с,  $\ddot{\omega}_{\max} = 22,4$  рад/с<sup>2</sup>. В плоскости YZ — от  $\omega_{\min} = -0.9015$  рад до  $\omega_{\max} = 1.6677$  рад,  $\dot{\omega}_{\max} =$

**5,98** рад/с,  $\dot{\epsilon}_{\max} = 29$  рад/с<sup>2</sup>. Измерения выявили максимальный рабочий диапазон углов для коленного сустава — от  $\phi_{\min} = 0,7818$  рад (почти полное разгибание) до  $\phi_{\max} = 3,0980$  рад (глубокое сгибание),  $\omega_{\max} = 8,7$  рад/с,  $\dot{\epsilon}_{\max} = 29,6$  рад/с<sup>2</sup>. Эти значения задают необходимый диапазон движений для шарниров экзоскелета и определения конструкции и хода коленного шарнира экзоскелета.

Приседание характеризуется большими углами сгибания в суставах: для бедра (XZ) диапазон от  $\phi_{\min} = 0,2483$  рад до  $\phi_{\max} = 2,3726$  рад,  $\omega_{\max} = 5,3$  рад/с,  $\dot{\epsilon}_{\max} = 19,8$  рад/с<sup>2</sup>. Для колена (XZ) — от  $\phi_{\min} = 0,3135$  рад до  $\phi_{\max} = 3,0469$  рад,  $\omega_{\max} = 5,7$  рад/с,  $\dot{\epsilon}_{\max} = 25$  рад/с<sup>2</sup>. Основной фокус при проектировании для этого движения смещается с динамики на обеспечение высокого крутящего момента, особенно в коленном суставе для обеспечения поднятия тяжести и снижения нагрузки на коленный сустав.

Таблица 1. – Результаты, полученные из всех проведенных измерений

Сустав, ось	Параметр						
	Предельные углы, рад	Предельное угловое ускорение, рад/с	Предельная угловая скорость, рад/с	Среднее максимальное угловое ускорение при ходьбе, рад/с	Средняя максимальная угловая скорость при ходьбе, рад/с	Среднее максимальное угловое ускорение при быстром беге, рад/с	Средняя максимальная угловая скорость при быстром беге, рад/с
Бедро XZ	1,6518 -0,9326	96,3	10,4	5,05	1,8	42,3	7,43
Бедро YZ	1,6677 -0,9015	29	5,98		-		
Колено XZ	3,0980 0,3135	70,2	18,2	11,3	2,99	39,5	9,68

**Вывод.** В результате проведенных измерений можно сделать вывод о кинематических характеристиках нижнего двигательного аппарата тела человека. В таблице 1 представлены все данные необходимые для принятия общих выводов о развиваемых характеристиках которые можно использовать для построения кинематических схем. Можно заметить, что не проводились исследования касательно вращения бедра в оси YX. Это связано с малым вкладом данного вращения в движения. По большей мере все действия совершаются в осях XZ и YZ, что является ключевым фактором направлений измерений. Следует также отметить, что, учитывая разнообразие действий, выполняемых нижними конечностями человека, можно выделить три основных направления разработки экзоскелета: бег, ходьба и приседания.

Во время бега развиваются максимальные угловые скорости и ускорения для каждого сегмента ноги. Поэтому при проектировании экзоскелета, ориентированного на бег, необходимо не только соответствовать этим экстремальным значениям, но и превосходить их, что является более сложной инженерной задачей. В случае ходьбы бедро и голень развивают относительно малые скорости и ускорения, поэтому создание экзоскелета, облегчающего ходьбу, представляется менее сложным по сравнению с экзоскелетом для бега.

Исследование приседаний проводилось для определения характеристик коленного сустава, поскольку именно он в значительной степени ответственен за разгибание ноги из положения сидя. Кроме того, в ситуациях, когда человек поднимает или перемещает большой вес, именно коленный сустав принимает на себя основную нагрузку. Следовательно, для облегчения работы с тяжелыми грузами необходимо уделить особое внимание проектированию и усилию именно этого узла экзоскелета. Объединяя все три направления исследований, можно предложить концепцию универсального экзоскелета, который будет эффективно разгружать коленный сустав при подъеме тяжестей, помогать человеку при длительной ходьбе, а также при необходимости облегчать и ускорять бег.

Полученные данные могут быть использованы для построения кинематических схем нижних конечностей человека и проведения их кинематического анализа. Это позволит получить всю недостающую информацию, необходимую для непосредственного начала проектирования экзоскелета для ног.