

БИОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЫШЦ КИСТЕЙ РУК ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНЫХ НАРУШЕНИЙ

Рецензент – Бых А.И., д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. БМИ

В статье рассмотрены основные физиологические особенности мышц кистей рук для разработки биомеханической модели функционирования в норме и при нарушениях. В работе отражен современный подход к изучению функции кисти с использованием методов биомеханики. Приведены данные о применении биомеханических методов при изучении функции кисти с учетом структуры двигательных нарушений кисти. Разработана упрощенная биомеханическая модель функционирования мышц кисти рук.

Ключевые слова: мышцы кисти руки, биомеханика, модель, функционирование, двигательные нарушения

Постановка проблемы. Функционально важнейшей частью верхней конечности для человека является кисть. Сложность и значительное разнообразие движений кисти обеспечиваются противопоставлением большого пальца, дифференцированностью движений каждого пальца, высокой подвижностью лучезапястного сустава, четкой координацией всех видов деятельности конечностью, что обусловлено функцией центральной нервной системы (ЦНС) [1, 2, 3].

Заболевания верхних конечностей, а кисти особенно, обычно включают в себя расстройство движений и координации рук, кистей и пальцев, что часто приводит к сложностям выполнения повседневных функций, что приводит к социальной изоляции человека в обществе. Поэтому, определение нарушений и восстановление функциональных возможностей кисти является важной проблемой для исследований. У пациентов с серьезными двигательными расстройствами кисти, обусловленными мышечной слабостью, спастичностью, нарушением реципрокного взаимодействия мышц достоверность большинства функциональных методик (электромиография, вызванные потенциалы) недостаточна, в связи с чем, особую актуальность приобретают методы биомеханики и моделирования [1, 6, 8].

Анализ последних достижений и публикаций. Существует достаточно большое количество работ по математическому и биомеханическому моделированию различных аспектов состояния функций нервно-мышечной системы в норме и при патологиях, которые в той или иной степени способствуют разработке диагностических и терапевтических методов определения и коррекции двигательных нарушений. В литературе [2-3; 7-8], посвященной анализу биомеханических характеристик при различных заболеваниях и повреждениях кисти, описывают динамику функциональных показателей в процессе лечения пациентов, при этом демонстрируют диагностическую ценность разработанных методов. Учитывая актуальность тематики исследований, возникает необходимость как более активное применение известных биомеханических методик, так и разработка новых высокочувствительных техник [2, 4, 5].

Цель исследования. Таким образом, целью данного исследования является разработка биомеханической модели, которая позволит получить точную картину о функциональном состоянии мышц кисти с учетом возможных отклонений.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи: изучить принципы функционирования мышц кисти в норме и при нарушениях; провести анализ существующих биомеханических моделей и рассмотреть этапы построения биомеханической модели и её составляющих.

Материалы и методы исследований. На основе методов теоретической и экспериментальной механики, а также общей теории моделирования можно описать функционирование мышц кистей рук. Создание биомеханических моделей основывается на двух типах информации: теоретических знаниях об изучаемом двигательном действии и экспериментальных данных, полученных методами визуального анализа, электромиографии, динамометрии, гониометрии, кинематики, акселерометрии и др.

Методики биомеханического исследования имеют в соответствии с системностью движений комплексный характер. Изучение движений проводится с синхронной регистрацией ряда существенных показателей с высокой точностью измерений. Они позволяют детально отразить специфику движений человека в ее современном теоретическом понимании. На рис. 1 показана последовательность этапов объективного исследования пациентов с двигательными расстройствами верхних конечностей.

Динаміка та міцність енергетичних і сільськогосподарських машин та біотехнічних систем: колективна монографія

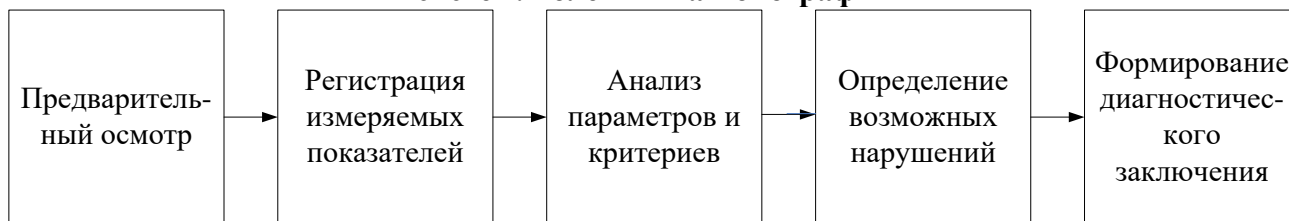


Рис. 1 – Последовательность этапов исследования функционирования мышц кистей рук

Первым этапом для выявления двигательных нарушений является наблюдение за выполнением ряда отдельных движений – отведение, сгибание, наружную и внутреннюю ротации, а затем выполнить более сложные движения – манипуляции с мелкими предметами, рисование, письмо и т.д. Одними из часто применяемых методов предварительного осмотра являются гониометрические и кинематические исследования, которые позволяют оценить углы движений в кистевом суставе и пальцах, а также перемещение, скорость и дифференцированность работы. На рис. 2 изображена методика обследования кистей рук.

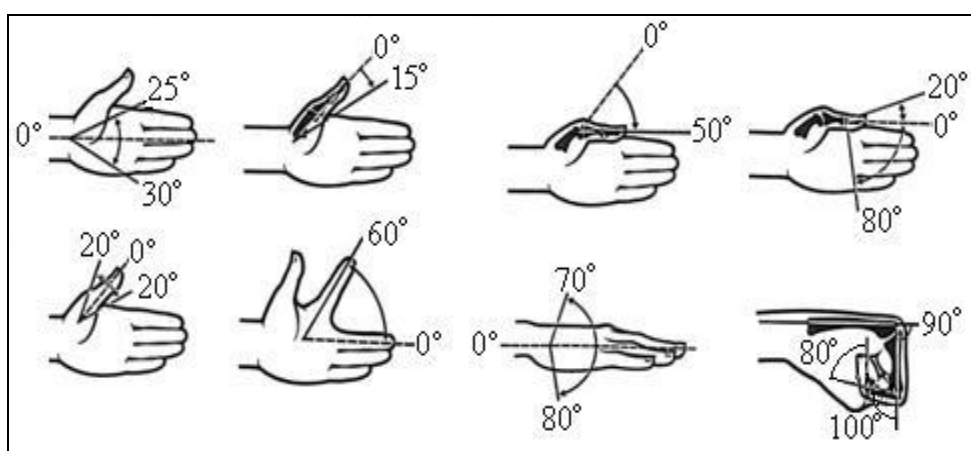


Рис. 2 – Гониометрические и кинематические исследования кисти рук для тестирования точности и дифференцированности движений [7]

Регистрация измеряемых показателей представляет собой применение поверхностной и стимуляционной электромиографии для оценки общей биоэлектрической активности мышц и вызванных потенциалов. Здоровая мышца подвержена микровибрации даже в расслабленном состоянии, называемым тремором активности. Его можно заметить по мелкой дрожи кончиков пальцев, когда ладонь руки слегка расставлена. При заболеваниях мышц верхних конечностей дрожание характеризуется определенной частотой следований ритмических колебаний, что дает возможность определить тип нарушений. На рис. 3 схематически проиллюстрирован физиологический тремор при минимальной и максимальной активности мышц. Амплитуда, форма, размах колебаний, длительность, площадь под кривой и время появления ответов – все это компоненты единой функциональной диагностической системы [9].

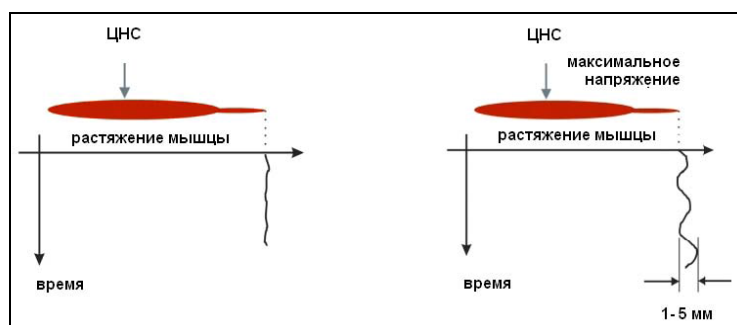


Рис. 3 – Тремор активности в расслабленной (а) и максимально напряженной (б) мышце

Динаміка та міцність енергетичних і сільськогосподарських машин та біотехнічних систем: колективна монографія

Изучение функции верхних конечностей, а именно кисти, чаще заключается в оценке мышечной силы (по Ловетту) и чувствительности с помощью динамометрических показателей при осуществлении кистевого захвата, а определение механического напряжения и деформации возможно с применением тензометрии [2].

Исходя из выше изложенного материала, регистрируемые параметры, полученных различными методами исследований можно представить в виде вектора X с набором исходных значений:

$$X = \{F_i, P_i, S_i, H_i\}, \quad (1)$$

где $i \in [1, 2, \dots, n]$; F_i - сила i -й мышцы; P_i - выполняемая функция i -й мышцы (например, сгибание или разгибание пальца); S_i - изометрическое сокращение i -й мышцы; H_i - мощность i -й мышцы.

Мышечная сила F_i зависит от ряда анатомических, физиологических и морфологических характеристик и определяется по формуле [8]:

$$F_i = k \cdot A_i, \quad (2)$$

где k - удельное мышечное сопротивление; A_i - поперечное сечение i мышцы, которое в зависимости от анатомических параметров имеет значения от 16 до 40 Н/см².

Под действием нервного возбуждения при изометрическом сокращении мышцы усилие в ней возрастает, но длина не всегда меняется, поэтому полностью законам механики не подчиняется. Так как мышцы крепятся к костям с помощью сухожилий и связок, а их функционирование не зависит от возбуждения нервной системы, то их механическое поведение подчиняется известному закону Гука $\sigma = E \cdot \varepsilon$.

Зависимость мышечной силы от скорости сокращения описывается кривой Хилла [3]. Скоростные и силовые свойства мышцы характеризуют механическую мощность для выполнения движений:

$$H_i = F_i \cdot v, \quad (3)$$

где v - скорость сокращения мышцы.

С биомеханической точки зрения изучение влияния различных факторов на изменение функционирования мышц позволит лучше понять их свойства и уточнить элементный состав существующих механических моделей. Мышцы обладают рядом механических свойств – упругостью, вязкостью, ползучестью, релаксацией. Как биологические объекты мышцы проявляют свойства возбудимости и сократимости. Все названные свойства тесно взаимосвязаны, что важно учитывать при биомеханическом исследовании движений. Упругость проявляется в возникновении напряжения в мышце при ее деформации под действием нагрузки. Вязкость – в замедлении деформации внутренними силами (жидким трением, молекулярными силами). По мере увеличения нагрузки на мышцу может происходить ее удлинение на Δl , при этом растет напряжение на ΔF , которое прямо пропорционально прилагаемой силе F_i [1, 6].

Результаты исследований. Кисть руки состоит из 16-и костей и трех типов мышц: группа мышц большого пальца, группа мизинца, группа самой кисти и имеет 108 степеней свободы [7]. Для объяснения процесса двигательного действия была разработана упрощенная 15-звенная биомеханическая модель, которая с высокой точностью позволяет описать движение кисти руки в норме и при нарушениях. Простота модели уменьшает вероятность возникновения ошибок при написании формализованной части. Для моделирования функционирования мышц учитывались такие важные биомеханические характеристики как: «сила-скорость», «сила-длина», «сила-время».

В основу разработки модели положен описательный подход анатомических и физиологических свойств объекта. На рис. 4 изображена упрощенная биомеханическая модель кисти руки в декартовой системе координат, которая наглядно демонстрирует амплитуду движений, углы перемещений α_n , применяемую силу F_i для определенной функции сгибания P_2 и разгибания P_1 отдельно кисти и пальца (пальцев). Определение координаторных параметров при использовании модели дает возможность выявить нарушение работоспособности мышц, которая возникает при статическом или динамическом треморах.

Динаміка та міцність енергетичних і сільськогосподарських машин та біотехнічних систем: колективна монографія

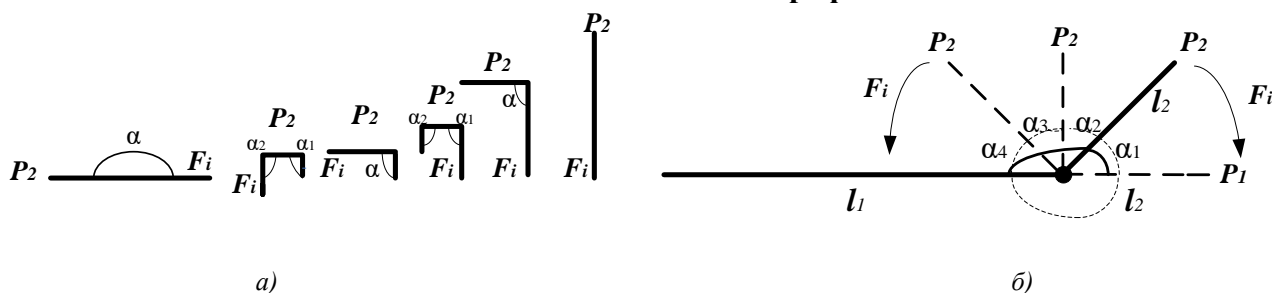


Рис. 4 – Графическое представление собственных движений упрощенной биомеханической модели пальца (а) и кисти (б)

При моделировании структуры двигательных расстройств кисти определяется ряд параметров: пространственные, силовые, скоростные, частотно-временные, характер которых описывает степень нарушения. Разработанная модель позволяет оценить схваты и амплитуды движений, чувствительность и точность мелких манипуляций, так как существует прямая связь между силовыми и амплитудными характеристиками мышц. Двигательные нарушения и травмы приводят к перераспределению нагрузки на различные зоны кисти, в том числе меняется и сама биомеханика пальцев и руки в целом при перемещении и сжатии [9, 10].

Выводы и перспективы работы. Обобщая результаты исследований, можно отметить, что разработанная модель способна отражать исследуемый биомеханический процесс мышечного функционирования. Данная модель отличается от существующих тем, что позволяет описать собственные формы колебаний кисти руки с учетом подвижности сухожилий и связок в горизонтальном и вертикальном положениях. Также модель позволяет учесть изменение углов при перемещении суставов пальцев и кистевого сустава, а также различается степень участия различных мышц при изменении вида действия. Разработанная модель применима для исследования медленных и мелких движений для выявления возможных двигательных нарушений. С практической точки зрения, полученные результаты могут служить основой для разработки различных методов тестирования состояния нервно-мышечного аппарата [7, 8].

Перспективой работы является расширение и совершенствование компонентов модели для детального описания физиологических процессов функционирования мышц при различных двигательных нарушениях.

Библиографія

1. Масленников В.А. Биомеханика: курс лекций / В.А. Масленников - Великий Новгород, 2008 -189 с.
2. Морозов И.Н. Биомеханическая оценка двигательных нарушений кисти у пациентов с травмой шейного отдела спинного мозга / И.Н. Морозов, А.В. Новиков, Н.Н. Рукина, О.В. Воробьева // Российский журнал биомеханики. 2011. - Т. 15, № 2 (52). – С.77–83
3. Носко М.О. Біомеханічна характеристика рухових якостей людини (Теоретичний Аналіз) / М.О. Носко, О.А. Архипов // 2014. Т.118 (1), №52– С. 1-13.
4. Попов Г. И. Биомеханика: учеб. для студ. учреждений высш. проф. образования / Г.И. Попов. - 5-е изд.,: «Академия», М: 2013. - 256 с.
5. Платонов А.К. Методы биомехатроники тренажёра руки человека / А.К.Платонов [и др.] // препринты ипм им. М.В.Келдыша. 2012. - № 82. -40 с.
6. Тверье В.М. Биомеханическая модель определения усилий мышц и связок в зубочелюстной системе человека / В.М. Тверье, Ю.И. Няшин, В.Н. Никитин // Российский журнал биомеханики. 2013. - Т. 17, № 2 (60). С. 8–20.
7. Аврунин О. Г. Автоматизированный анализ электрической активности мышц при диагностике экстрапирамидных гиперкинезов / О. Г. Аврунин, К. Г. Половенко // Технічна електродинаміка. Тем. Випуск, 2012. – С. 188–193.
8. Селиванова К.Г. Биотехническая система диагностики состояния мелкого моторного развития / К.Г. Селиванова, Ж.Б.Иванченко, О.Г. Аврунин // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. – № 39 (1148). – С. 78-82.
9. Селиванова К. Г. Математическое моделирование электромиографического сигнала / К.Г. Селиванова, О.Г. Аврунин, А.А. Гелетка // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Нові рішення в сучасних технологіях», 2014р. – № 36 (1079). – С. 31-39.
10. Аврунин О.Г. Моделирование процессов формирования интерференционного электромиографического сигнала / О.Г. Аврунин, А.А. Гелетка, К.Г. Селиванова // Общегосударственный научно-производственный и информационный журнал «Энергосбережение, энергетика, энергоаудит». Специальный выпуск, 2013. – Том 2, № 8(14). – С. 128-133.