

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ РЕКУПЕРАТИВНЫХ СВОЙСТВ МЫШЕЧНО-СУХОЖИЛЬНЫХ СТРУКТУР ГОЛЕНОСТОПНОГО СУСТАВА - "ЭКВИВАЛЕНТНАЯ БИОМЕХАНИЧЕСКАЯ ДОБРОТНОСТЬ"

Повышение эффективности выполнения локомоций человека, начинающихся с быстрого растяжения предварительно напряженных мышечно-сухожильных структур нижних конечностей (прыжки, бег) зависит от способности этих структур рекуперировать энергию их упругой деформации. С помощью метода электромеханических аналогий можно вместо механической цепи рассматривать электрическую цепь и воспользоваться уже разработанными для электрических цепей характеристиками. Добротность электрической цепи позволяет количественно оценить степень использования или реализации запасенной в контуре энергии. Соответственно, новая биомеханическая характеристика, эквивалентная биомеханической добротности, дает возможность оценить степень использования или рекуперации энергии упругой деформации мышечно-сухожильных структур голеностопного сустава, определить высоту прыгивания, необходимую для совершенствования этой способности.

Ключевые слова: мышечно-сухожильные структуры голеностопного сустава, рекуперация энергии упругой деформации, эквивалентные биомеханические характеристики, электромеханические аналогии, эквивалентная биомеханическая добротность.

Постановка проблемы. Повышение эффективности выполнения локомоций человека, начинающихся с быстрого растяжения предварительно напряженных мышечно-сухожильных структур нижних конечностей (прыжки, бег) зависит от способности этих структур рекуперировать энергию их упругой деформации [2, 5, 6, 9 – 13].

Рекуперация (от лат. *Rescuperatio*) – обратное получение, возвращение энергии, расходуемой при выполнении того или иного технологического процесса, движения, для повторного использования в том же процессе, движении (slovari.yandex.ru).

Для оценки "упруго-вязких" характеристик биологических объектов может быть использован "метод затухающих колебаний" [5, 6, 10]. Суть этого метода заключается в измерении собственных затухающих колебаний биосистемы. Это дает возможность оценить некие "эквивалентные биомеханические" характеристики исследуемой биосистемы, например, жесткостные и демпфирующие характеристики.

При изучении эквивалентных биомеханических характеристик мышечно-сухожильных структур голеностопного сустава (МССГС) исследуемая биосистема моделировалась однозвенной колебательной системой с сосредоточенными параметрами (рис. 1).

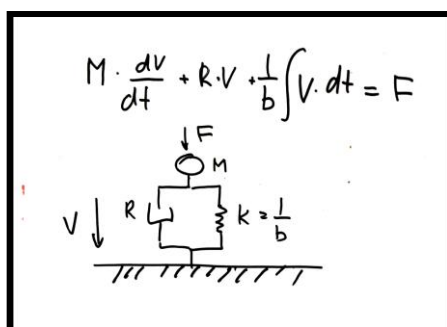


Рис. 1. Однозвенная колебательная система с сосредоточенными параметрами и уравнение, описывающее ее колебания (пояснения в тексте)

Характеристики данной системы (коэффициенты жесткости и демпфирования) определялись из анализа кривой вертикальной составляющей силы реакции опоры (рис. 2).

Однако знание только эквивалентных биомеханических коэффициентов жесткости и демпфирования МССГС не дает полную "картину" функционирования системы. В частности, остается неизвестной степень использования или рекуперации энергии упругой деформации в исследуемых структурах нижних конечностей.

Для однозвенной колебательной системы с сосредоточенными параметрами решить эту задачу можно с помощью "метода электромеханических аналогий" [1, 7, 8].

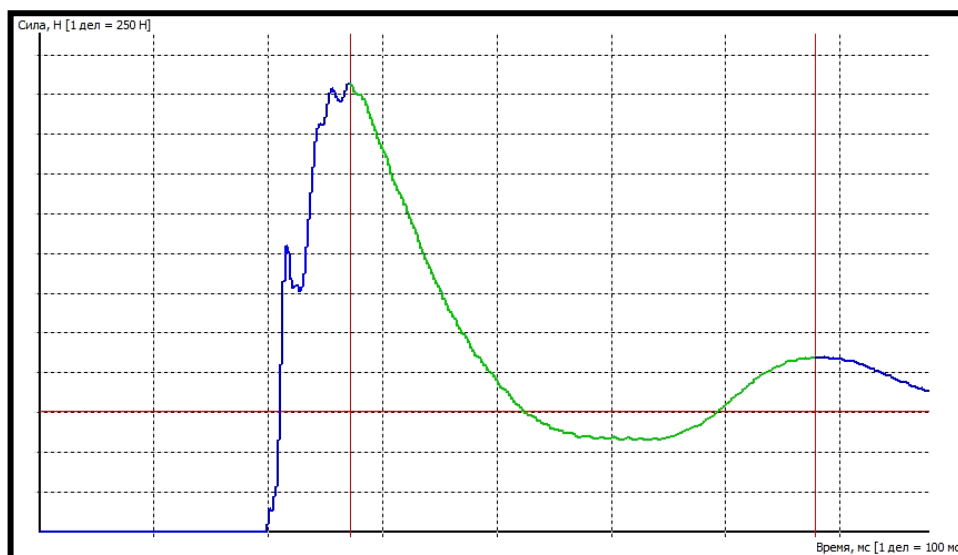


Рис. 2. Динамограмма вертикальной составляющей силы реакции опоры при выполнении тестового упражнения

Метод электромеханических аналогий базируется на "сходстве" математических уравнений, описывающих колебания массы в механической системе (рис. 1), и колебания тока в электрическом колебательном контуре (рис. 3). То есть, вместо механической цепи предлагается рассматривать электрический колебательный контур.

Колебания в механической цепи описываются следующим уравнением:

$$M \times \frac{dV}{dt} + r \times V + \frac{1}{b} \times \int i \times dt = f \quad (1)$$

где: f , н – сила, действующая на систему, r , кг/с – коэффициент демпфирования, b , м/н – коэффициент податливости, обратно пропорциональный коэффициенту жесткости системы K , н/м, V , м/с – скорость движения всех точек системы.

Колебания в последовательном электрическом контуре (рис. 3) описываются уравнением 2:

$$L \times \frac{di}{dt} + R \times i + \frac{1}{C} \times \int i \times dt = U \quad (2)$$

где: L , Гн – индуктивность контура, R , Ом – активное сопротивление контура, C , Ф – емкость контура, i , А – ток в контуре, U , В – напряжение на зажимах контура.

Отталкиваясь от математического тождества уравнений 1 и 2, лорд Рэлей (8) ввел "электромеханические аналогии", что позволяет вместо механической системы рассматривать электрическую цепь. Такая замена позволяет не только использовать разработанный для расчета характеристик электрических цепей метод комплексных амплитуд или операторное исчисление, но и воспользоваться уже разработанными для электрических цепей характеристиками.

Так, важнейшей характеристикой электрических колебательных контуров является "добротность" [1, 7].

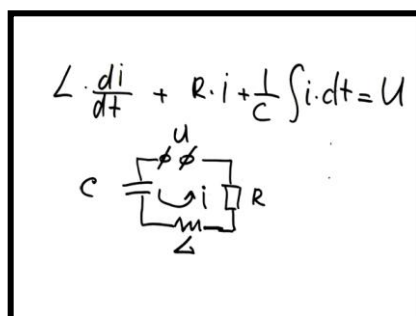


Рис. 3. Последовательный колебательный контур и уравнение, описывающее колебания в нем (пояснения в тексте)

По определению (для электрического контура) "добротность" численно равна отношению максимальной энергии, запасаемой в контуре, к энергии, рассеиваемой за период резонансных колебаний на активном сопротивлении (1, 7). Через значения элементов контура, добротность Q_k равна:

$$Q_k = \frac{1}{R} \times \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

Переходя к механической модели, получим добротность Q_M :

$$Q_M = \frac{\sqrt{K \times M}}{r} \quad (4)$$

Из формулы 4 видно, что добротность механической биосистемы Q_M функционально зависит от значений всех элементов биосистемы. По аналогии с другими "эквивалентными биомеханическими" характеристиками исследуемой биосистемы данную характеристику мы назвали "эквивалентной биомеханической добротностью" и обозначили ее Q_{BM} .

Анализ формулы (4) показывает, что Q_{BM} функционально зависит от значений элементов биосистемы. То есть, эквивалентная биомеханическая добротность Q_{BM} может быть использована как интегральная характеристика, отражающая функциональное состояние МССГС и их способность рекуперировать энергию упругой деформации.

Известно [2, 6, 10, 11, 13], что биомеханические характеристики мышечно-сухожильных структур человека не являются постоянными величинами. В то же время практический интерес представляет оценка влияния скорости приземления спортсмена на опору на рекуперативные свойства МССГС. С этой целью был проведен эксперимент.

Методика. В исследовании приняли участие двое мужчин (первый – 1.84м, 90 кг, 40 лет, занимается оздоровительным бегом 13 лет, второй – 1.79м, 78 кг, занимается теннисом 12 лет, КМС).

Испытуемые выполняли прыгивание с возвышения босиком на динамометрическую платформу без покрытия босиком, приземляясь на носки напряженных ног, стараясь сохранить позу приземления. Скорость приземления варьировалась изменением высоты прыгивания с 9 до 30 см через 3 см (скорость приземления менялась от 1.34 до 2.45 м/с). На каждой высоте выполнялось по две попытки. Динамика контролируемых характеристик (средние значения) представлена в табл. 1.

В эксперименте использовалась динамометрическая платформа производства ООО "Медикал сервис", Россия. Относительная погрешность измерения вертикальной составляющей силы реакции опоры (ВССРО) не более 2.5%, собственная частота платформы – не менее 300 Гц. Эквивалентные биомеханические характеристики МССГС определялись из анализа кривой ВССРО (рис. 2), возникающей при приземлении испытуемого на динамометрическую платформу. На высоте более 30 см исследование не проводилось, так как у 1-го испытуемого было зафиксировано чрезмерное сгибание ног в коленном суставе.

Результаты и их обсуждение. Анализ динамики эквивалентных коэффициентов жесткости и демпфирования МССГС выявил, что у 1-го испытуемого максимумы этих характеристик получены на высоте прыгивания 12 см и 15см (табл.1), у 2-го – на одной и той же высоте 21 см. Выявлена также тесная статистическая взаимосвязь между этими характеристиками, отдельно для каждого испытуемого ($r=0.819$, $p<0.01$, $r=0.864$, $p<0.01$).

Таблица 1

Динамика эквивалентных биомеханических характеристик МССГС при различных скоростях приземления на опору

Высота прыгивания, см	$K \times 10^4$, н/м	r , кг/с	Q_{BM}
9	3.33	997	1.73
	2.79	897	1.76
12	3.58	1257	1.43
	2.67	807	1.83

15	3.33	1273	1.36
	2.53	934	1.54
18	3.02	1200	1.48
	2.73	952	1.57
21	3.07	1065	1.54
	4.25	1520	1.23
24	2.67	967	1.61
	3.53	1378	1.24
27	2.74	1046	1.50
	2.59	991	1.47
30	2.56	957	1.59
	2.15	870	1.53

Примечание: верхняя строчка в каждой графе – данные 1-го испытуемого, нижняя – 2-го испытуемого.

Данный феномен подтверждает сделанные ранее предположения о том, что накопление и рассеивание энергии упругой энергии в МССГС определяется одними и теми же механизмами функционирования [2, 3, 4].

Анализ динамики эквивалентной биомеханической добротности показал, что у 1-го испытуемого минимальное значение этой характеристики получено на высоте 15 см, а у 2-го испытуемого – четко выраженная область минимумов на высотах 21 и 24 см.

Обобщая вышесказанное, можно предположить, что для 1-го испытуемого для совершенствования рекуперативной способности МССГС следует использовать упражнение "Спрыгивания в глубину с последующим выпрыгиванием вверх" на высотах 21 – 24 см, для 2-го спортсмена – на высотах 27-30 см.

Выводы. 1. Способность мышечно-сухожильных структур голеностопного сустава человека рекуперировать энергию их упругой деформации при взаимодействии с опорой сугубо индивидуальна и в значительной степени обусловлена спецификой двигательной деятельности.

2. Совершенствованию способности мышечно-сухожильных структур рекуперировать энергию их упругой деформации при взаимодействии с опорой будут способствовать плиометрические упражнения, условия выполнения которых, например, высота прыгивания, должны превышать условия, при которых эквивалентная биомеханическая добротность $Q_{\text{ВМ}}$ минимальна.

Использованные источники

1. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1969. – 347 с.
2. Гурфинкель В.С., Левик Ю.С. Скелетная мышца, структура и функция. – М.: Наука, 1985. – 146 с.
3. Дышко Б.А. Электромеханические аналогии при функциональном анализе эквивалентных биомеханических характеристик мышечно-сухожильных структур голеностопного сустава человека // Теория и практика физической культуры. –1989. – № 5. – С. 52-56.
4. Дышко Б.А. Об оценке рекуперативных свойств мышечно-сухожильных структур голеностопного сустава человека // Тезисы Всесоюзного научного симпозиума "Структурно-энергетическое обеспечение механической работы мышц". – М. – 1990. – С. 12-13.
5. Дышко Б.А., Фарбер Б.С. Оценка упруговязких свойств голеностопного сочленения // Протезирование и протезостроение. Сб. трудов. – Вып. 83. – М., ЦНИИПП, 1988. – С. 88-95.
6. Зацюрский В.М., Аруин А.С., Селуянов В.М. Биомеханика двигательного аппарата человека. – М.: ФиС, 1981, С. 97 – 112.
7. Скудчик Е. Простые и сложные колебательные системы. – М. Мир, 1971, 557 с.
8. Стретт В. (лорд Рэлей). Теория звука. – М.: Гостехиздат, 1955. – 504 с.
9. Asmussen E., Djinde-Petersen F. Apparent efficiency and storage of elastic energy in human muscles during exercise.//Acta Physiol. Scand., 1974, v.92, p. 537 – 545.
10. Bosco C., Viitasalo I., Komi P., Luhtanen P. Combined effect of elastic energy and myoelectrical potentiation during stretch-shortening cycle exercise.// Acta Physiol. Scand., 1982, v.114, p. 557 – 565.
11. Komi, P.V. and Bosco, C.) Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men andwomen.// Medicine & Science in Sports and Exercise ,1978, v.10(4), p. 261-265.

12. Kyrolainen, H., Finni, T., Avela, J. and Komi, P.V. Neuromuscular behavior of the triceps surae muscle-tendon complex during running and jumping.//International Journal of Sports Medicine,2003, v.24(3), p.153-155.
13. Viitasalo, J.T., Salo, A. and Lahtinen, J. Neuromuscular functioning of athletes and non-athletes in drop jump.// European Journal of Applied Physiology, 1998, v.78, p.432-440.

Dyshko B.A.

**THE INTEGRAL CRITERION OF THE EVALUATION
OF THE MUSCLE - TENDON STRUCTURES OF THE ANKLE JOINT'S RECUPERATIVE
PROPERTIES - "EQUIVALENT BIOMECHANICAL QUALITY"**

Increasing the effectiveness of the implementation of human locomotion, beginning with the rapid stretching of the prestressed of the muscle and tendon structures of the lower extremities (jumping, running) depends on the ability of these structures to recover their elastic deformation energy. Using of the Method of the Electromechanical Analogies we can instead of mechanical appreciate to consider of the electric circuit and to take advantage characteristics which developed for the electric chains. Q-factor of the electric circuit allows to quantitatively estimate the degree of using or realization of the stored energy in the circuit. Consequently, a new biomechanical characteristic – the equivalent biomechanical quality factor or Q-factor, gives an opportunity to evaluate the degree of use or energy recovery of the elastic deformation of the muscle and tendon structures of the ankle, to determine the height of drop – jump, which needed to improve this ability.

Key words: *the muscle-tendon structure of the ankle joint, recovery of the elastic deformation energy, equivalent biomechanical characteristics, the electromechanical analogies, the equivalent biomechanical quality factor or Q-factor.*

Стаття надійшла до редакції 28.08.2013 р.

