

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СИНТЕЗА ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ДВИЖЕНИЯ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*А.Е. Покатилов, Ю.Ю. Федосеев, А.А. Музыкантов,
В.И. Загревский, Д.А. Лавшук*

Для полных биомеханических систем, представляющих собой опорно-двигательный аппарат человека и упругий спортивный снаряд, разработаны математические модели синтеза целенаправленного движения с учетом влияния снаряда на спортсмена. Выявлены возможные способы построения программного управления на кинематическом и динамическом уровнях и показана роль упругого спортивного снаряда, являющегося опорой во время выполнения упражнений, с точки зрения синтеза движения биомеханической системы.

Введение

При исследовании движения спортсмена в первую очередь обращают внимание на целенаправленное движение человека, т.е. на движение, при котором для управления внутри тела вырабатываются мышечные силы [1].

Так как ни величина, ни направление, ни точка приложения к звену каждой управляющей силы и в каждый момент времени неизвестны, то принято эти силы приводить к соответствующим шарнирам. При этом появляются пары управляющих сил (моменты управляющих сил). В такой постановке задача исследования движения имеет решение.

В результате использования указанного приема получаем приложенные к суставу силы реакции и управляющие силы, а также действующий на звено момент управляющих сил относительно исследуемого шарнира (сустава).

Отметим, что одним из возможных методов анализа движения можно выбрать метод кинестатики. Практика показывает, что его применение позволяет расширить ряд факторов, включаемых в исследование. В качестве примера можно привести трение в опорной паре, исследование которого с помощью уравнений Лагранжа второго рода требует использования дополнительных методов, так как выражения применимы только в случае идеальных связей [1–4].

Особенностью взаимодействия является тот факт, что двигательные действия спортсмена относятся к движению, имеющему цель, т.е. целенаправленному, а упругая деформация подчиняется только законам механики и ее необходимо отнести к движению естественному. Это коренным образом сказывается на разработке методов синтеза движения спортсмена с учетом движения снаряда и использовании динамических уравнений движения, полученных по результатам кинестатического анализа и записанных относительно моментов управляющих сил.

Целью данной работы является исследование характера взаимодействия биомеханической системы, каковой является опорно-двигательный аппарат человека, с системой механической в виде спортивного снаряда, выступающего в качестве упругой опоры.

Исследовался большой оборот назад, выполняемый на перекладине олимпийского образца. В качестве примера из всего спортивного упражнения взят один оборот, составляющий примерно 360°. Движение человека фиксировалось видеокамерой с частотой съемки 25 кадров в секунду. Вторая видеокамера регистрировала перемещение спортивного снаряда. Отметим, что методы сглаживания могут оказывать значительное влияние на начало и окончание сглаживаемой зависимости [5, 6], по этой причине первоначально брался более широкий интервал с запасом в 10 кадров до начала исследуемого участка, и в 10 кадров после его окончания. Общее количество отобранных кадров составило 72, а для последующего биомеханического анализа из них взято 52. В дальнейшем для всех необходимых расчетов и графиков отсчет кадров на анализируемом участке начинается с 0, при этом отбрасывается за-

пас в начале и в конце таблицы исходных данных [4, 7, 8].

Кинетограмма упражнения показана на рисунке 1. Биомеханическая система моделируется трехзвенником – звеньями являются руки, туловище и ноги. Начальное положение биомеханической системы (БМС) выделено сплошной толстой линией, три последних – штриховой. Направление вращения спортсмена – против часовой стрелки.

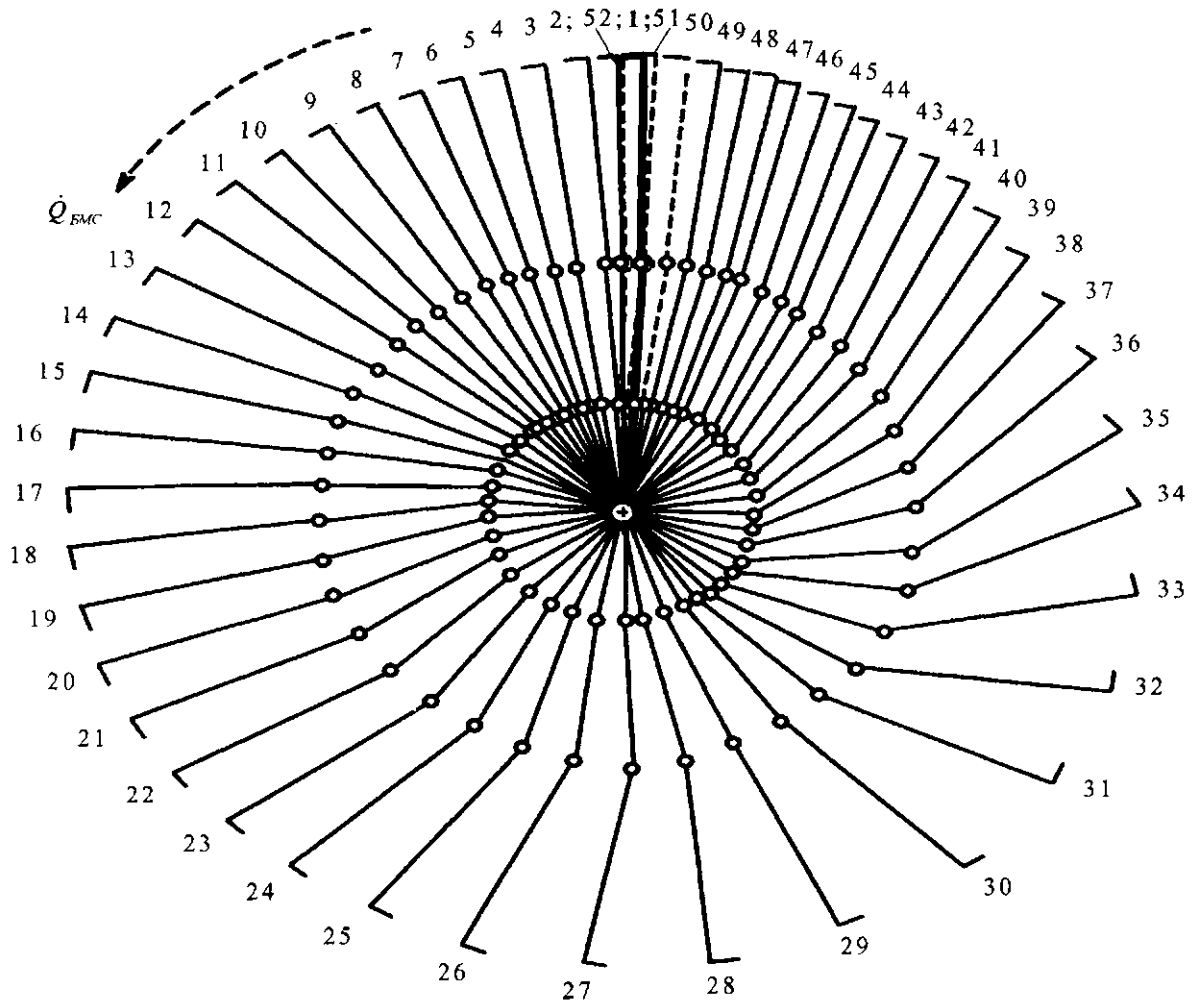


Рисунок 1 – Кинетограмма большого оборота на перекладине

При этом кинетограмма на рисунке 1 показывает движение спортсмена со стороны камеры, фиксирующей перемещение спортивного снаряда. Если рассматриваемая фаза упражнения для звена длится больше оборота, то это учитывается в значениях обобщенных координат – на втором круге угловые координаты больше 360° .

Взятое для исследования маховое упражнение выполнял мастер спорта Ю. К., 1980 г. р. Параметры тела, необходимые для кинематического и динамического анализов, рассчитаны по специальной методике, представленной в работе [1].

Уравнение целенаправленного (управляемого) движения имеет вид [3]

$$\begin{aligned}
 M_{i,i-1} = & g \sum_{j=i}^N C_{ij} \cos Q_j + \ddot{L}_0 \sum_{j=i}^N C_{ij} \sin(Q_0 - Q_j) + 2\dot{L}_0 \dot{Q}_0 \sum_{j=i}^N C_{ij} \cos(Q_0 - Q_j) + \\
 & + \sum_{k=0}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \ddot{Q}_k \cos(Q_k - Q_j) - \sum_{k=0}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \dot{Q}_k^2 \sin(Q_k - Q_j).
 \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь коэффициенты, учитывающие массу звеньев и их размеры, равны:

$$C_{ij} = \begin{cases} m_j S_j + L_j \sum_{s=j+1}^N m_s, & \text{если } i \leq j, \\ L_j \sum_{s=i}^N m_s, & \text{если } i > j, \end{cases}$$

$$i=1, 2, \dots, N; \quad j=0, 1, \dots, N; \quad s \leq N.$$

Аналитическое выражение коэффициентов для вычисления момента управляющих сил N -звенной биомеханической системы в условиях упругой опоры построено с помощью символа Кронекера. Последний равен

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i=j, \\ 0, & \text{если } i \neq j. \end{cases}$$

Здесь i, j – буквенные индексы, соответствующие цифровым индексам коэффициентов A_{ij} .

$$A_{ij} = \delta_{ij} (I_i + m_i S_i^2) + m_j L_i S_j (1 - \delta_{ij}) + \sum_{k=j+1}^N m_k L_i L_j,$$

где $i=1, 2, \dots, N; \quad j=1, 2, \dots, N; \quad k \leq N$.

Коэффициенты, характеризующие опору, являются переменными $A_{0j} = var$, в отличие от коэффициентов для биосистемы $A_{ij} = const$, где $i > 0, \quad j > 0$.

Динамическое усиление движения человека спортивным снарядом

Выделенные системы дают представление о динамическом усилении движения спортсмена упругой опорой в явной части, т.е. без учета влияния деформации спортивного снаряда на величину обобщенных координат биомеханической системы.

Используя уравнение целенаправленного движения (1), запишем выделенную опору как

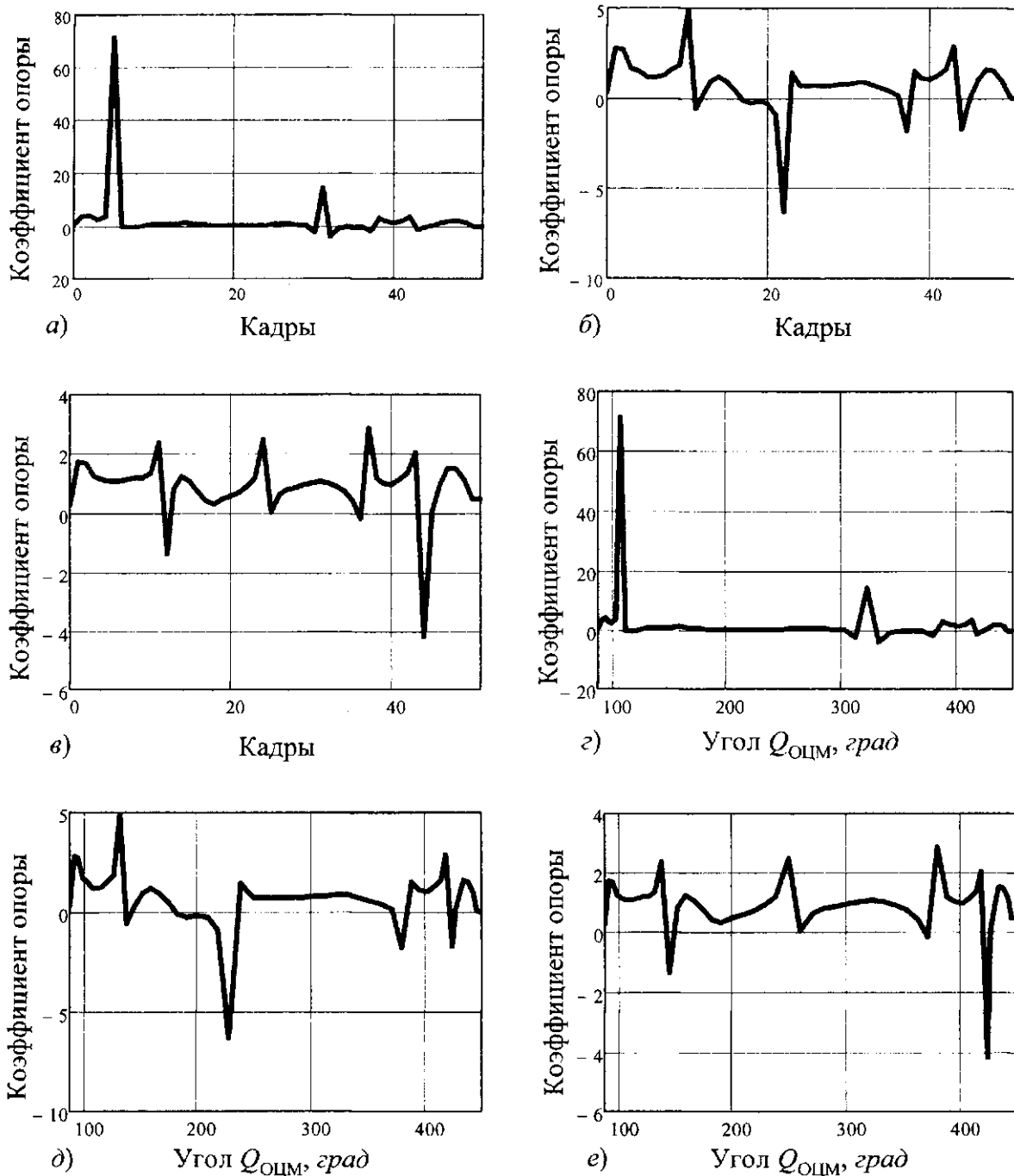
$$M_{i,i-1}^{OP} = \ddot{L}_0 \sum_{j=i}^N C_{ij} \sin(Q_0 - Q_j) + 2\dot{L}_0 \dot{Q}_0 \sum_{j=i}^N C_{ij} \cos(Q_0 - Q_j) + \sum_{j=i}^N A_{j0} \ddot{Q}_0 \cos(Q_0 - Q_j) - \sum_{j=i}^N A_{j0} \dot{Q}_0^2 \sin(Q_0 - Q_j). \quad (2)$$

Другая часть выражения показывает связь параметров движения непосредственно спортсмена с моментами управляющих сил. Это выделенная биомеханическая система, но с измененными упругой опорой параметрами движения, имеющая вид:

$$M_{i,i-1}^{BMC} = g \sum_{j=i}^N C_{ij} \cos Q_j + \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \ddot{Q}_k \cos(Q_k - Q_j) - \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} \dot{Q}_k^2 \sin(Q_k - Q_j) \quad (3)$$

Управляющий момент мышечных сил на i -ом звене является суммой моментов, отражающих влияние движения биомеханической системы и деформации опоры (ее движения):

$$M_{i,i-1} = M_{i,i-1}^{OP} + M_{i,i-1}^{BMC}. \quad (4)$$



а) – опорный шарнир; б) – плечевой сустав; в) – тазобедренный сустав;
 г) – опорный шарнир; д) – плечевой сустав; е) – тазобедренный сустав.

Рисунок 2 – Изменение коэффициентов опоры для момента управляющих сил по кадрам видеосъемки и по угловому положению общего центра масс (ОЦМ) биомеханической системы

Рисунки 2, а–в иллюстрируют изменение коэффициентов опоры по кадрам, а рисунки 2, г–е – в зависимости от углового положения общего центра масс биомеханической системы. Графики, показывающие зависимость коэффициентов от времени (по кадрам) и от углового положения общего центра масс (ОЦМ) спортсмена подобны друг другу, различаясь лишь масштабом.

Анализ показывает, что наибольшее влияние опора оказывает на управляющий момент

относительно опорного шарнира, среднее – на момент относительно плечевого сустава, и наименьшее – на момент относительно сустава тазобедренного. Другими словами, чем дальше шарнир расположен от спортивного снаряда, тем меньшая доля управляющего момента приходится на упругую опору.

Отметим один важный аспект данного анализа: необходимо учитывать не только относительность величин, но и их абсолютные значения, а также пространственное положение спортсмена в исследуемый момент времени.

Общая структура управляющих воздействий по межсуставным углам имеет вид

$$u_z = Q_{z+1} - Q_z, z=1, 2, \dots, N-1.$$

Первую и вторую производные по времени, представляющие угловые скорости и ускорения, можно показать как

$$\dot{u}_z = \dot{Q}_{z+1} - \dot{Q}_z, \quad \ddot{u}_z = \ddot{Q}_{z+1} - \ddot{Q}_z, \quad z=1, 2, \dots, N-1.$$

Кинематическая связь, наложенная на обобщенные координаты БМС, через программное управление принимает вид

$$Q_{z+1} = Q_z + u_z, \quad z=1, 2, \dots, N-1.$$

В общем же виде программное управление на кинематическом уровне предстает тремя моделями:

$$Q_p = Q_i + \sum_{z=1}^{p-1} u_z, \quad \dot{Q}_p = \dot{Q}_i + \sum_{z=1}^{p-1} \dot{u}_z, \quad \ddot{Q}_p = \ddot{Q}_i + \sum_{z=1}^{p-1} \ddot{u}_z \quad p=2, 3, \dots, N.$$

Для характеристики взаимодействия спортивного снаряда и человека при синтезе запишем динамическое уравнение движения через выделенные системы, а также через активную и пассивную части. Имеем в общем виде

$$M_{i,i-1} = M_{i,i-1}^{ОП} + M_{i,i-1}^{БМС} = M_{i,i-1}^{ПАС} + M_{i,i-1}^{АКТ} = M_{i,i-1}^{ОП-ПАС} + M_{i,i-1}^{ПАС-БМС} + M_{i,i-1}^{АКТ-БМС} \quad (5)$$

К пассивной части относится часть, отражающая движение опоры и действие силы тяжести. Подробно эту часть модели исходя из выражений (1)-(4) можно записать как

$$M_{i,i-1}^{ПАС} = \left[\ddot{L}_0 \sum_{j=i}^N C_{ij} \sin(Q_0 - Q_j) + 2\dot{L}_0 \dot{Q}_0 \sum_{j=i}^N C_{ij} \cos(Q_0 - Q_j) + \sum_{j=i}^N A_{j0} \ddot{Q}_0 \cos(Q_0 - Q_j) - \sum_{j=i}^N A_{j0} \dot{Q}_0^2 \sin(Q_0 - Q_j) \right] + \left[g \sum_{j=i}^N C_{ij} \cos Q_j \right].$$

Активная часть, это управление на уровне моментов, задаваемое мышечной системой человека. Она принимает вид

$$M_{i,i-1}^{АКТ} = \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} (\ddot{Q}_k + \sum_{s=1}^{k-1} \ddot{u}_s) \cos(Q_k - Q_j) - \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N A_{jk} (\dot{Q}_k + \sum_{s=1}^{k-1} \dot{u}_s) \sin(Q_k - Q_j).$$

Решая динамическую модель движения спортсмена в условиях опоры (5) относительно левой или правой частей, получим соответственно управление на динамическом или кинема-

тическом уровне.

Заключение

Изложены трудности и способы их решения при построении программного управления целенаправленным движением спортсмена в условиях взаимодействия с упругим спортивным снарядом, являющимся опорой во многих видах спорта. Предложено выделить из динамического уравнения движения часть, отражающую движение биомеханической системы, и часть, отражающую только движение спортивного снаряда. Сравнение полной характеристики с выделенной из общего уравнения биомеханической системой дало возможность ввести новое понятие в виде коэффициента опоры для оценки влияния на движение биосистемы спортивного снаряда, провести натурный и вычислительный эксперимент и получить количественную картину по взаимодействию человека со снарядом. Установлено, что относительно спортивного снаряда управляющие моменты под воздействием опоры могут меняться в десятки раз. Относительно же плечевого и тазобедренного суставов эти изменения тоже значительны, но не более чем в 5 раз по отношению к движению при жесткой опоре. Использование данного принципа разделения моделей движения на выделенную опору и выделенную биомеханическую систему с количественной оценкой влияния спортивного снаряда, также позволило в задачах синтеза прояснить такой аспект взаимодействия двух систем, как сочетание двух разных по управлению видов движения: целенаправленного человека и естественного опоры. Показано, что управление движением при его синтезе направлено на биомеханическую систему, снаряд же является системой пассивной и только корректирует движение в целом. Что, в свою очередь, даст возможность в дальнейшем наметить пути разработки вычислительных алгоритмов синтеза движения при влиянии снаряда на технику спортивного упражнения.

Литература

- 1 Загrevский, В. И. Расчетные модели кинематики и динамики биомеханических систем / В. И. Загrevский. – Томск–Могилев: 1999. – 156 с.
- 2 Загrevский, В. И. Построение оптимальной техники спортивных упражнений в вычислительном эксперименте на ПЭВМ / В. И. Загrevский, Д. А. Лавшук, О. И. Загrevский. – Могилев–Томск. : 2000. – 190 с.
- 3 Покатилов, А. Е. Биомеханика взаимодействия спортсмена с упругой опорой / А. Е. Покатилов; под ред. В.И. Загrevского. – Минск: Изд. центр БГУ, 2006. – 351 с.
- 4 Покатилов, А. Е. Биодинамические исследования спортивных упражнений в условиях упругой опоры / А. Е. Покатилов, В. И. Загrevский, Д. А. Лавшук. – Минск: Изд. центр БГУ, 2008. – 279 с.
- 5 Васильков, Ю. В. Компьютерные технологии вычислений в математическом моделировании / Ю. В. Васильков, Н. Н. Василькова. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 256 с.
- 6 Крутов, В. И. Основы научных исследований: учебник для техн. вузов / В. И. Крутов, И. М. Грушко, В. В. Попов ; под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. – М.: Высшая школа., 1989. – 400 с.
- 7 Турчак, Л. И. Основы численных методов / Л. И. Турчак, П. В. Шлотников. – М. : Физматлит, 2002. – 304 с.
- 8 Шуп, Т. Решение инженерных задач на ЭВМ / Т. Шуп. – М.: Мир, 1982. – 238 с.

Поступила в редакцию 22.06.2013