

## СИЛОВОЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СПОРТСМЕНА С УПРУГОЙ ОПОРОЙ

Покатилов А.Е.<sup>1+</sup>, Загревский В.И.<sup>2</sup>, Лавшук Д.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> УО могилевский государственный университет продовольствия,

<sup>2</sup> УО могилевский государственный университет им. А.А. Кулешова

*The force analysis of interaction of the person with a sports shell specifies complex character of deformation of the last. The analysis allows to present basic reaction which causes deformation of a sports shell as the sum of two models: the deformation of a support allocated on characteristics and the model including only the characteristics of movement of the person.*

### Общие положения

Отметим различие в методах проведения силового анализа опорных шарниров и суставов человеческого тела. Оно заключается в том, что современные технические средства и исследовательские методики не позволяют измерить реакции, возникающие в суставах. Единственным методом, решающим данную задачу, является расчетный [1]. При этом он распространяется только на естественное движение, т.е. на движение при котором отсутствует управление. Если же имеет место управление движением за счет мышечной системы, то существующие методы силового анализа дают возможность определить лишь суммарную силу реакции и главного вектора управляющих сил, приведенную к суставу. Разделить указанные силы при современном уровне развития теории и методов исследования не представляется возможным.

С реакциями возникающими на опоре в месте контакта с биомеханической системой (БМС) ситуация иная. Некоторые методы, как например, электротензометрический, дают возможность экспериментальным путем изучить опорные реакции [2]. Но с другой стороны, за последние сотни лет развития теории упругости исследованы силовые факторы и перемещения, возникающие в телах почти всех мыслимых форм при действии самых разнообразных нагрузок. Такие разделы механики как сопротивление материалов [3], теория механизмов и машин [4], строительная механика [5] и детали машин [6] давно и широко используют аналитические методы определения сил, возникающих в различных системах. Именно на основе этих методов можно создать модели для проведения полного анализа движения спортсмена в условиях упругой опоры. Кроме того, именно они позволяют выявить физическую картину взаимодействия БМС со спортивным снарядом и раскрывают все закономерности влияния опоры на движение человека.

Также отметим еще один существенный момент – на самом деле упругие свойства проявляет весь спортивный снаряд, а не только его рабочая часть, контактирующая непосредственно с человеком. И вклад остальных элементов может быть не меньше, чем непосредственно опорной части снаряда.

Методики силового анализа биомеханических систем создаются с конца 60-х годов, постоянно совершенствуясь. На сегодняшний день уже разработаны компактные модели, предназначенные для систем с произвольным количеством звеньев, и имеются компьютерные программы для их реализации. Они предназначены как для моделирования движения в условиях жесткой опоры [1], так и упругой [7].

## Силовой анализ кинематических пар биомеханической системы

Расчетная схема для силового анализа с использованием метода кинестатики представлена на рис. 1. Здесь к звеньям приложены все внешние (активные) силы  $\bar{G}_i$ , фиктивные силы инерции масс звеньев  $\bar{U}_i$ , а также реакции связи  $\bar{R}_{i,i-1}$  в исследуемых кинематических парах биомеханической системы.

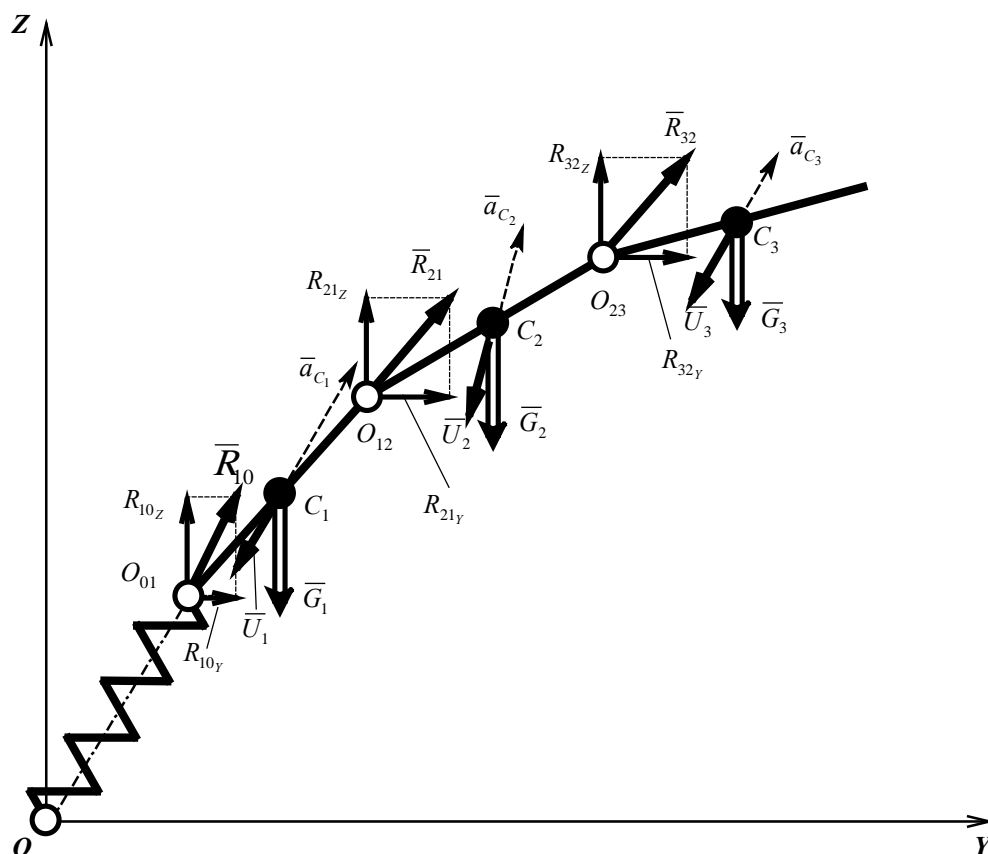


Рис. 1. Расчетная схема для силового анализа биомеханической системы

В общем виде условие кинестатического равновесия плоской системы сил имеет вид

$$\sum Y = 0, \quad \sum Z = 0. \quad (1)$$

При выводе уравнений для реакций выполняют специальные преобразования, суть которых заключается в разделении переменных и постоянных характеристик движения. К переменным относятся обобщенные координаты, обобщенные скорости и обобщенные ускорения. Постоянными являются характеристики биомеханической системы, которые не меняются во времени. Например, это длины звеньев, их массы и т.д.

После необходимых выкладок приходят к следующей форме уравнений для проекций реакции в кинематической паре  $O_{i-1,i}$ :

$$\begin{aligned}
R_{(i,i-1)_y} &= m_{i,N} \left( \ddot{L}_0 \cos Q_0 - 2\dot{L}_0 \dot{Q}_0 \sin Q_0 \right) - \sum_{j=0}^N C_{ij} \ddot{Q}_j \sin Q_j - \sum_{j=0}^N C_{ij} \dot{Q}_j^2 \cos Q_j, \\
R_{(i,i-1)_z} &= m_{i,N} \left( \ddot{L}_0 \sin Q_0 + 2\dot{L}_0 \dot{Q}_0 \cos Q_0 \right) + \sum_{j=0}^N C_{ij} \ddot{Q}_j \cos Q_j - \sum_{j=0}^N C_{ij} \dot{Q}_j^2 \sin Q_j + \sum_{p=i}^N G_p,
\end{aligned} \tag{2}$$

$i=1, 2, \dots, N.$

Здесь коэффициенты равны:

$$C_{ij} = \begin{cases} m_j S_j + L_j \sum_{s=j+1}^N m_s, & \text{если } i \leq j, \\ L_j \sum_{s=i}^N m_s, & \text{если } i > j, \end{cases} \tag{5}$$

$$m_{i,N} = \sum_{s=i}^N m_s,$$

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

Отметим, что коэффициенты  $C_{ij}$  при  $j > 0$  относятся непосредственно к биомеханической системе. Они постоянны, и их достаточно определить один раз для конкретного спортсмена. Коэффициенты  $C_{ij}$  при  $j = 0$  относятся к опоре, являются переменными и рассчитываются на всей траектории движения спортсмена.



Рис. 2. Большой оборот назад

Покажем силовой анализ движения человека на примере большого оборота назад, выполняемого на перекладине в спортивной гимнастике. На рисунке 2 представлен один из кадров видеосъемки спортивного упражнения, выполняемого мастером спорта К.Ю., 1980 г.р.

Анализ выполнен в математическом редакторе *Mathcad* [8]. Программу удобнее всего построить с использованием уравнения (2),

которое представляют разбитым на две части: часть, включающую характеристики деформации спортивного снаряда, и часть, отражающую только движение самого человека. Это позволяет в дальнейшем провести анализ влияния спортивного снаряда на величины полных реакций на опоре и в суставах.

Результаты расчета показаны на рис. 3 и 4. Рис. 3, а дает представление об изменении реакций в горизонтальной плоскости  $Ox$ , а рис. 3, б – в вертикальной плоскости  $Oy$  в рамках принятых допущений, т.е. с учетом управляющих сил, приведенных к суставам тела.

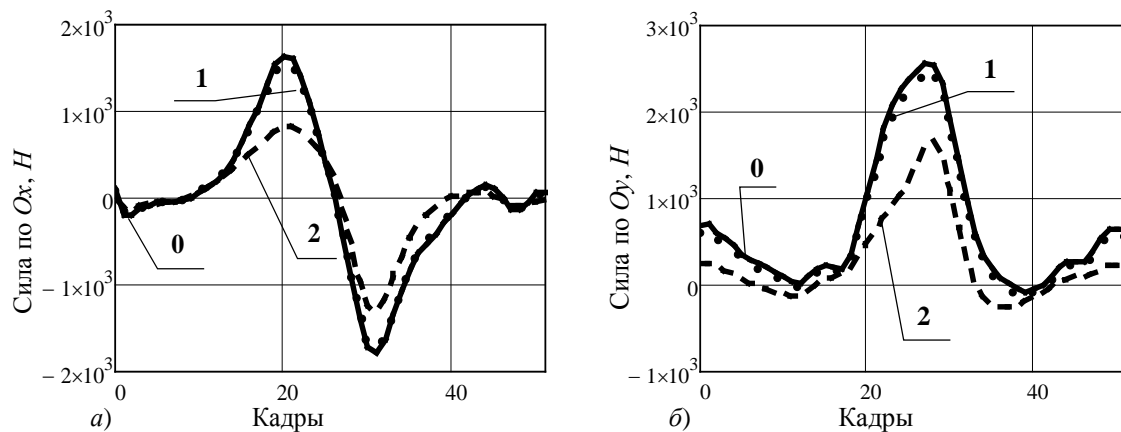


Рис. 3. Проекция реакций в шарнирах БМС:

0 – опорный шарнир; 1 – плечевой сустав; 2 – тазобедренный сустав

Рис. 4 представляет уже полные суставные и опорную реакции по модулю. Здесь расшифровка соответствует рис. 3.

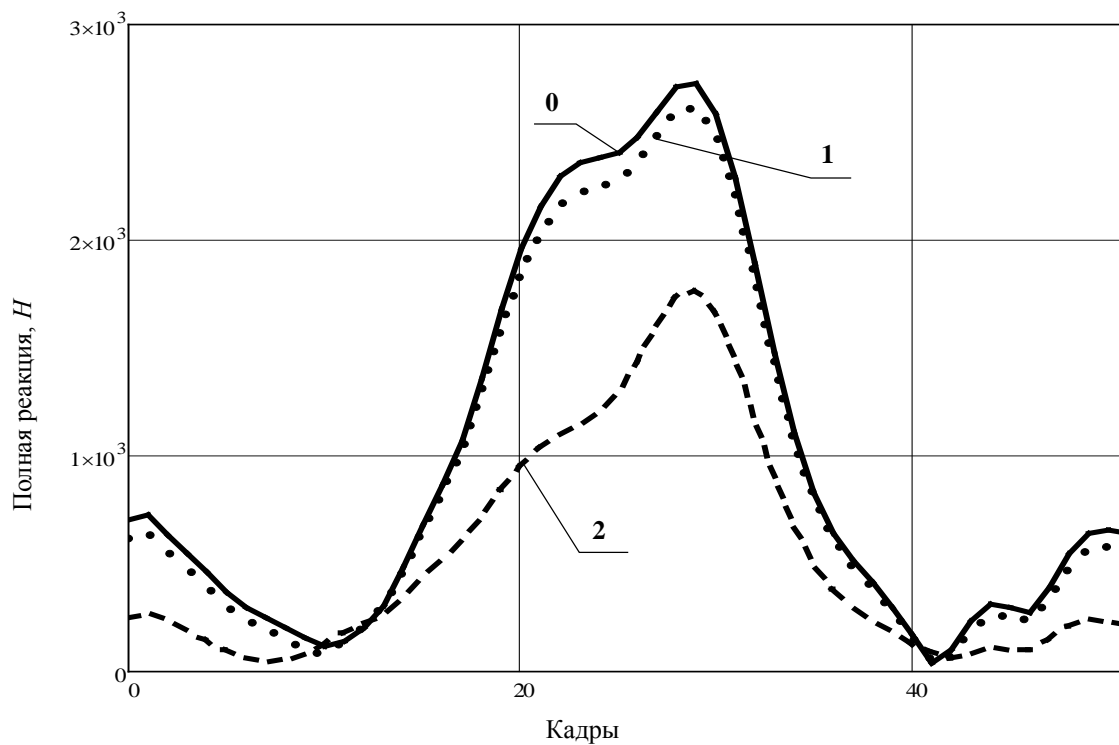


Рис. 4. Полные реакции в шарнирах БМС:

0 – опорный шарнир; 1 – плечевой сустав; 2 – тазобедренный сустав

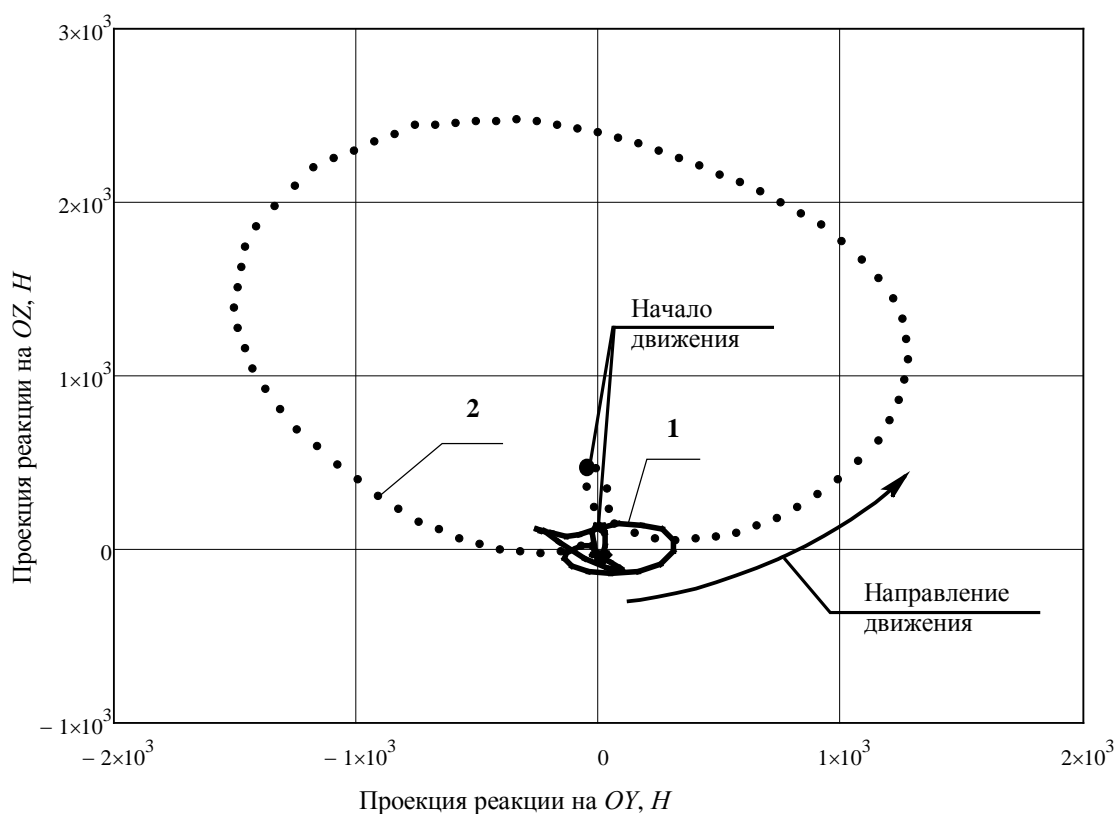


Рис. 5. Годографы составляющих опорной реакции:  
1 – выделенная опора; 2 – выделенная биомеханическая система

Отметим, что именно опорная реакция и вызывает упругое перемещение всего спортивного снаряда. Поэтому для оценки ее изменения построим годографы составляющих полной опорной реакции и покажем их на рис. 5.

Графики дают не только представление об абсолютных значениях сил и их направлении, но и иллюстрируют соотношение реакций в шарнире между собой. Составляющая опорной реакции, зависящая *в явном виде* от деформации снаряда показана графиком 1. А графиком 2 иллюстрируется изменение величины и направления части опорной реакции, определяемой по характеристикам движения только спортсмена.

Таким образом, по рисунку 5 видно значительное влияние на деформацию спортивного снаряда, прежде всего, движения самого человека, и уже во вторую очередь на ней сказываются собственные упругие свойства.

Необходимо подчеркнуть, что годограф 2 тоже отражает влияние деформации опоры, но уже не в явном виде, а через изменение величины обобщенных координат спортсмена, его обобщенных скоростей и обобщенных ускорений.

Также следует указать, что в определенные моменты времени составляющие полной реакции резко меняют свою величину и направление. Эти моменты соответствуют таким же резким изменением траектории опорного шарнира, которая образует фигуру, получившую название «улитка Паскаля» [9, 10].

*Работа выполняется по гранту государственной программы научных исследований на 2006–2010 г.г.*

*Финансирует: Министерство образования Республики Беларусь.*

**Тема:** «Разработка методов оценки биомеханического состояния человека и реализация оптимальных режимов движений биомеханических систем».

### Литература

1. **Загревский, В.И.** Расчетные модели кинематики и динамики биомеханических систем / В.И. Загревский. - Томск-Могилев: Издательская лаборатория Томского педагогического университета, 1999. - 156 с.
2. **Манина, Т. И.** Тензометрическая методика исследования техники толчка руками в гимнастических прыжках через коня / Т. И. Манина, И. А. Замыцкий, Л. И. Головенчиц // Теория и практика физ. культуры.– 1970. – № 6. – С. 70-71.
3. **Дарков, А. В.** Сопротивление материалов / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. – М. : Высшая школа, 1975. – 655 с.
4. **Артоболовский, И. И.** Теория механизмов и машин : учеб. для вузов / И. И. Артоболовский. – М. : Наука, 1988. – 640 с.
5. **Снитко, Н. К.** Строительная механика / Н. К. Снитко. – М. : Высшая школа, 1980. – 432 с.
6. **Дмитриев, В. А.** Детали машин / В. А. Дмитриев. – Л. : Судостроение, 1970. – 792 с.
7. **Покатилов, А.Е.** Биомеханика взаимодействия спортсмена с упругой опорой / А.Е. Покатилов; под. ред. В.И. Загревского. – Минск : Изд. центр БГУ, 2006. – 351 с.
8. **Кирьянов, Д. В.** Самоучитель Mathcad 11 / Д. В. Кирьянов. – Спб. : БХВ-Петербург, 2003. – 560 с.
9. **Гавердовский, Ю. К.** Техника гимнастических упражнений. Популярное учебное пособие / Ю. К. Гавердовский. – М. : Терра-Спорт, 2002. – 512 с.
10. **Гусак, А. А.** Справочник по высшей математике / А. А. Гусак, Г. М. Гусак. – Мн. : Навука і техника, 1991. – 480 с.