

СЕКЦИЯ 4  
**БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
В ПОДГОТОВКЕ СПОРТСМЕНОВ ВЫСШЕЙ  
КВАЛИФИКАЦИИ И СПОРТИВНОГО РЕЗЕРВА**

УДК 51-73; 531.3; 796.01

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В БИОМЕХАНИКЕ  
СПОРТА**

**Ю. В. Воронович<sup>1</sup>, А. Е. Покагилов<sup>2</sup>, А. А. Василевский<sup>2</sup>,  
А. А. Масейков<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup>Могилевский государственный медицинский колледж, Могилев,  
Беларусь; <sup>2</sup>Могилевский государственный университет пищевых и  
химических технологий, Могилев, Беларусь)

Показана эффективность алгоритмов сглаживания в вычислительном эксперименте. Также рассмотрены возникающие проблемы: однократное сглаживание не отражает реальную картину движения спортсмена. Графики имеют пилообразный характер, а в реальности движение спортсмена является плавным. Показано как решить эту проблему в вычислительном эксперименте.

*Ключевые слова:* алгоритм, биомеханическая система, вычислительный эксперимент, видеокамера, сглаживание.

Важнейшим этапом исследований в биомеханике спорта является получение траекторных положений спортсмена во время выполнения изучаемого упражнения. На рис. 1 показаны положения спортсмена при выполнении упражнения на перекладине в спортивной гимнастике.



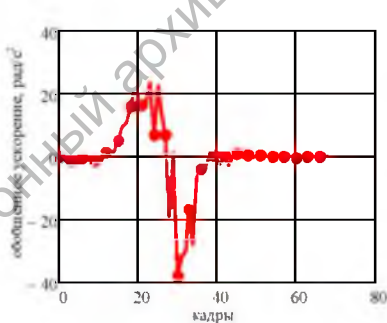
Рисунок 1 – Спортивная гимнастика

Исторически сложилось, что наиболее удобным, эффективным и доступным методом получения координат спортсмена в каждый момент времени при выполнении спортивного упражнения являются оптические методы регистрации движений. Так на рис. 1 показано использование такого метода как видеосъемка. На сегодня считается, что видеосъемка – это общедоступный информативный педагогический и биомеханический метод исследования в спорте. Видеосъемка обеспечивает последовательную съемку движущихся объектов и производится при помощи видеокамеры. Видеокамера – это устройство, которое применяется с целью получения оптических образов снимаемых объектов на светочувствительном элементе (матрице). Видеокамеры бывают со стандартной скоростью видеосъемки 24 к/сек и специальные высокочастотные до 100000 к/сек.

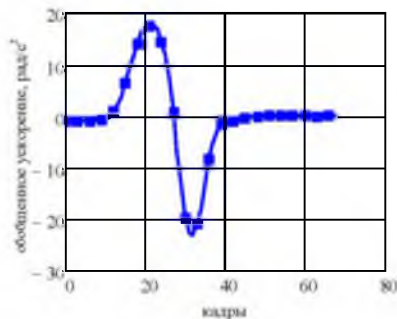
Отметим, что каждый вид спорта и даже каждое упражнение требует своей скорости видеосъемки. Так, например, минимальной скоростью обычно считают 1/500 с. Для велосипедного спорта и мотоспорта должна быть выдержка 1/1000 с или быстрее. При более скоростных движениях требуется еще более короткая выдержка.

После расшифровки видеокадров и получения координат всех звеньев БМС стоит задача подготовить данные к вычислительному эксперименту. Для этого необходимо выполнить сглаживание исходных данных. На рис. 2.23 а) и б) показаны обобщенные ускорения плеча спортсмена при рывке штанги весом 100 кг. Обобщенные ускорения представляют собой угловые ускорения звена, и они рассчитываются численным дифференцированием.

На рис. 2а представлены не сглаженные данные. А на рис. 2б показаны сглаженные в программе Маткад 15.0 угловые ускорения плеча.



а) не сглаженные данные



б) сглаженные данные

Рисунок 2 – Обобщенные ускорения плеча. Рывок, штанга 100 кг

Анализ рисунков показывает значительное различие сглаженных данных по сравнению с не сглаженными. Во-первых, меняется сам характер кривой, она становится гладкой, без резких перепадов. Во-вторых, в нижней части график по рис. 2а имеет ускорение в  $-38 \text{ рад/с}^2$ . А сглаженные данные достигают значения лишь в  $-23 \text{ рад/с}^2$ . Такая существенная разница появляется по той причине, что при промере угол на 30-м кадре сильно выскочил по отношению к значениям на соседних кадрах видеосъемки. Это погрешность – и сглаживание корректирует график на этом участке [1].

Отметим, что методы сглаживания могут оказывать значительное влияние на начало и окончание сглаживаемой функции, по этой причине желательно брать более широкий интервал с запасом в 10 кадров до начала исследуемого участка, и в 10 кадров после его окончания.

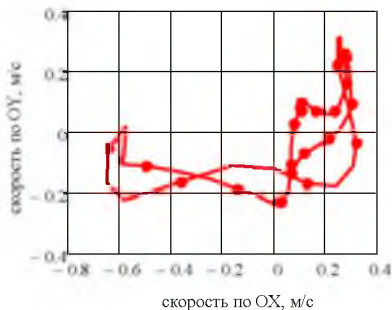
В программе Mathcad 15.0 сглаживание обобщенных координат одного из звеньев (ноги) биомеханической системы представлено небольшим листингом 1. В методах «бегущих медиан» и на основе функции Гаусса выбрано окно сглаживания равное 3. Иначе, чем шире окно, тем больше изменяются края сглаженных графиков.

Листинг 1 Сглаживание обобщенных ускорений плеча

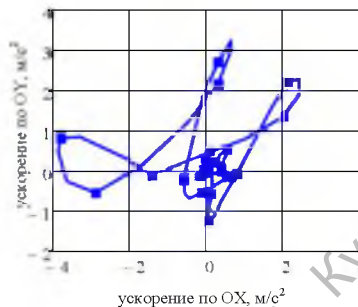
$Q_{zv5S\_df2\_1} := \text{medsmooth}(Q_{zv5\_df2}, 3)$ – сглаживание алгоритмом «бегущих медиан»; $Q_{zv5S\_df2\_2} := \text{ksmooth}(Nk, Q_{zv5\_df2}, 3)$ – сглаживание на основе функции Гаусса; $Q_{zv5S\_df2\_3} := \text{supsmooth}(Nk, Q_{zv5\_df2})$ – локальное сглаживание адаптивным алгоритмом.  Здесь $Q_{zv5\_df2}$ – массив исходных данных; $Nk$ – массив с номерами кадров.
---

В листинге приведены расчеты, ввод же исходных данных не дается. Лучше всего себя показало локальное сглаживание адаптивным алгоритмом. По алгоритму «бегущих медиан» и по функции Гаусса данные до сглаживания и после него почти совпадают.

В листинге 1 обозначения  $Q_{zv5S\_df2\_1}$ ,  $Q_{zv5S\_df2\_2}$ ,  $Q_{zv5S\_df2\_3}$  представляют собой сглаженные векторы обобщенных ускорений плеча за время движения БМС, полученные по соответствующему методу.  $Q_{zv5\_df2}$  – вектор, составленный из массива исходных данных;  $Nk$  – вектор с номерами кадров.



а) годограф скоростей



б) годограф ускорений

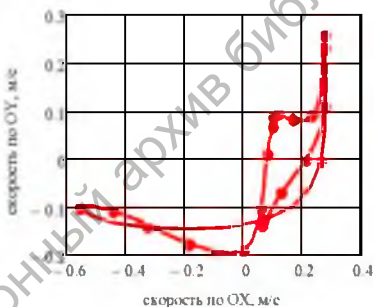
Рисунок 3 – Не сглаженные годографы центра масс бедра.

Рывок, штанга 100 кг

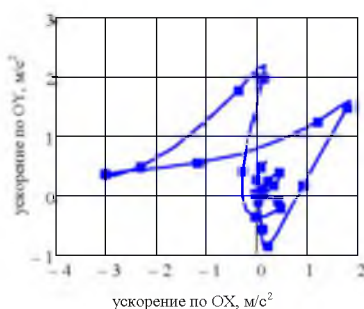
На рис. 3а представлен годограф скоростей центра масс (ЦМ) бедра БМС до сглаживания. А на рисунке 3б – годограф ускорений ЦМ бедра и тоже до сглаживания. Сглаживание выполнялось на примере листинга 1.

Констатируем – внешний вид графиков изменения обобщенных кинематических параметров БМС свидетельствует о необходимости сглаживания.

На рис. 4а показан сглаженный по локальному адаптивному методу годограф скоростей центра масс (ЦМ) бедра БМС. И тут же на рис. 4б дан тоже сглаженный по этому же методу годограф ускорений ЦМ бедра.



а) годограф скоростей



б) годограф ускорений

Рисунок 4 – Сглаженные годографы ЦМ бедра. Рывок, штанга 100 кг

Попарное сравнение графиков по рис. 3 а) и 4 а); а также 3 б) и 4 б) показывает эффективность применения методов сглаживания в программе Маткад 15.0.

Пример, показанный в листинге 1, демонстрирует эффективность использования математических программ – достаточно одного небольшого уравнения и будет выполнено сглаживание даже очень большой таблицы данных. Но здесь выявлена одна проблема. Теория в области численных методов требует однократного сглаживания. В случае применения сглаживания в области вычислительного эксперимента в задачах биомеханики спорта одного сглаживания недостаточно, так как возникает парадокс на каждом этапе вычислений кинематических и динамических характеристик движения спортсмена: движение человека осуществляется плавно, а графики скоростей, ускорений и пр. характерных точек БМС показывают рваный характер движения, что не соответствует экспериментальным данным. Выходом из этого положения представляется или использование высокоскоростных видеокамер, что не всегда возможно по финансовым причинам, или же применение алгоритмов сглаживания на каждом этапе вычислительного эксперимента.

### **Список литературы**

1. Покатилов, А. Е. Биомеханический анализ спортивных упражнений на примере тяжелой атлетики и спортивной гимнастики: моногр. / А. Е. Покатилов, Ю. В. Воронович. – Могилев: БГУТ, 2024. – 369 с.: ил.