

Теоретические основы использования имитационного моделирования при исследовании сложных биомеханических систем в стрелковом спорте

Львовский государственный университет физической культуры (г. Львов),

**Центр математического моделирования Института прикладных проблем механики и математики имени Я. С. Пидстригача НАН Украины (г. Львов),*

***Саммелвейский университет (Венгрия, г. Будапешт)*

Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций. Одним из самых мощных инструментов анализа при разработке и исследовании функционирования сложных процессов и систем в спорте является имитационное моделирование. Основная идея имитационного моделирования достаточно проста и в то же время привлекательна. Она дает возможность пользователям экспериментировать с системами (существующими или предлагаемыми) в тех случаях, когда делать это на реальном объекте практически невозможно или нецелесообразно. И хотя имитационное моделирование получило первоначальный толчок в ходе реализации авиакосмических программ, оно может стать мощным инструментом исследования сложных биомеханических систем в спорте [2; 3].

Имитационное моделирование – это процесс конструирования модели реальной системы и постановки экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить (в рамках ограничений, накладываемых, некоторым критерием или совокупностью критериев) различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы [8].

Таким образом, процесс имитационного моделирования понимаем как процесс, включающий и конструирование модели, и аналитическое применение модели для изучения некоторой проблемы.

При моделировании сложной биомеханической системы исследователь обычно вынужден использовать совокупность нескольких моделей. Любая система или подсистема может быть представлена различными способами, которые значительно отличаются друг от друга по сложности и детализации. В большинстве случаев в результате системных исследований появляются несколько различных моделей одной и той же системы. Но обычно по мере того, как исследователь глубже анализирует и лучше понимает проблему, простые модели заменяются все более сложными [5; 6].

Все имитационные модели представляют собой модели типа так называемого “черного ящика”. Это означает, что они обеспечивают выдачу выходного сигнала системы, если на ее взаимодействующие подсистемы поступает входной сигнал. Поэтому для получения необходимой информации или результатов необходимо осуществлять “прогон” имитационных моделей, а не “решать” их. Имитационные модели не способны формировать свое собственное решение в том виде, в каком это имеет место в аналитических моделях, а могут лишь служить в качестве средства для анализа поведения системы в условиях, которые определяются экспериментатором.

Прежде чем начать разработку модели, необходимо понять, что собой представляют структурные элементы, из которых она строится. Хотя математическая или физическая структура модели может быть очень сложной, основы ее построения весьма просты. В самом общем виде структуру модели мы можем представить математически в виде:

$$E=f(X_i, y_j),$$

где E – результат действия системы; X_i –переменные и параметры, которыми мы можем управлять; y_j – переменные и параметры, которыми мы управлять не можем; f – функциональная зависимость между X_i и y_j , которая определяет величину E .

Столь явное и чрезмерное упрощение полезно лишь тем, что оно показывает зависимость функционирования системы как от контролируемых нами, так и от неконтролируемых переменных. Почти каждая модель представляет собой, говоря вообще, некоторую комбинацию таких составля-

ющих, как компоненты, переменные, параметры, функциональные зависимости, ограничения, целевые функции.

Под компонентами биомеханической системы в спорте мы понимаем составные части, которые при соответствующем объединении образуют единую систему. Иногда мы считаем компонентами также элементы системы или ее подсистемы. Система определяется как группа, или совокупность объектов, объединенных некоторой формой регулярного взаимодействия или взаимозависимости для выполнения заданной функции. Объекты являются компонентами, которые образуют изучаемую систему [1].

Параметры суть величины, которые оператор, работающий на модели, может выбирать произвольно, в отличие от переменных, которые могут принимать только значения, определяемые видом данной функции. Смотря на это под другим углом зрения, мы можем сказать, что параметры, после того как они установлены, являются постоянными величинами, не подлежащими изменению.

В модели биомеханической системы мы различаем переменные двух видов – экзогенные и эндогенные. Экзогенные переменные называются также входными; это значит, что они порождаются вне системы или являются результатом воздействия внешних причин. Эндогенными переменными называются переменные, возникающие в системе или в результате воздействия внутренних причин. Мы также называем эндогенные переменные переменными состояния (когда они характеризуют состояние или условия, имеющие место в биомеханической системе) либо выходными переменными (когда речь идет о выходах системы). Статистики иногда называют экзогенные переменные независимыми, а эндогенные зависимыми.

Функциональные зависимости описывают поведение переменных и параметров в пределах компонента или выражают соотношения между компонентами системы. Эти соотношения, или операционные характеристики, по своей природе являются либо детерминистскими, либо стохастическими. Детерминистские соотношения – это тождества или определения, которые устанавливают зависимость между определенными переменными или параметрами в тех случаях, когда процесс на выходе системы однозначно определяется заданной информацией на входе. В отличие от этого, стохастические соотношения представляют собой такие зависимости, которые при заданной входной информации дают на выходе неопределенный результат. Оба типа соотношений обычно выражаются в форме математического уравнения, которое устанавливает зависимость между эндогенными переменными (переменными состояния) и экзогенными переменными. Обычно эти соотношения можно строить лишь на основе гипотез или выводиться с помощью статистического или математического анализа.

Ограничения представляют собой устанавливаемые пределы изменения значений переменных или ограничивающие условия распределения и расходования тех или иных средств (энергии, времени и т. п.). Они могут вводиться либо разработчиком (искусственные ограничения), либо самой биомеханической системой вследствие присущих ей свойств (естественные ограничения).

Целевая функция, или функция критерия, – это точное отображение целей или задач биомеханической системы и необходимых правил оценки их выполнения. Как правило это уровень спортивного результата.

Цель работы – повышение эффективности дидактических процессов совершенствования двигательных действий в стрелковом спорте на основе использования имитационного моделирования системы “стрелок–оружие–мишень”.

Задачи исследования:

- 1) предложить общую концепцию имитационного моделирования биомеханической системы “стрелок–оружие–мишень”;
- 2) конкретизировать практические задачи совершенствования управления системой “стрелок–оружие–мишень”.

Методы исследования – теоретический анализ и синтез; имитационное и физико-математическое моделирование.

Изложение основного материала исследования

Моделирование системы “стрелок–оружие–мишень”

Основная сложность при моделировании системы “стрелок–оружие–мишень” (схема 1) состоит в выборе модели для первой подсистемы, а именно “стрелок”. Простейший вариант, предложенный авторами статьи [5], который состоит в том, что подсистема “оружие–мишень” есть объект моделирования, а все, что не включено в эту подсистему, но взаимодействует с ней или взаимовлияет на нее, считается внешней средой. Внешней средой относительно системы, таким образом, является человек

и окружающая среда, которая характеризуется температурой, давлением, влажностью, действием сил тяжести и силы ветра.

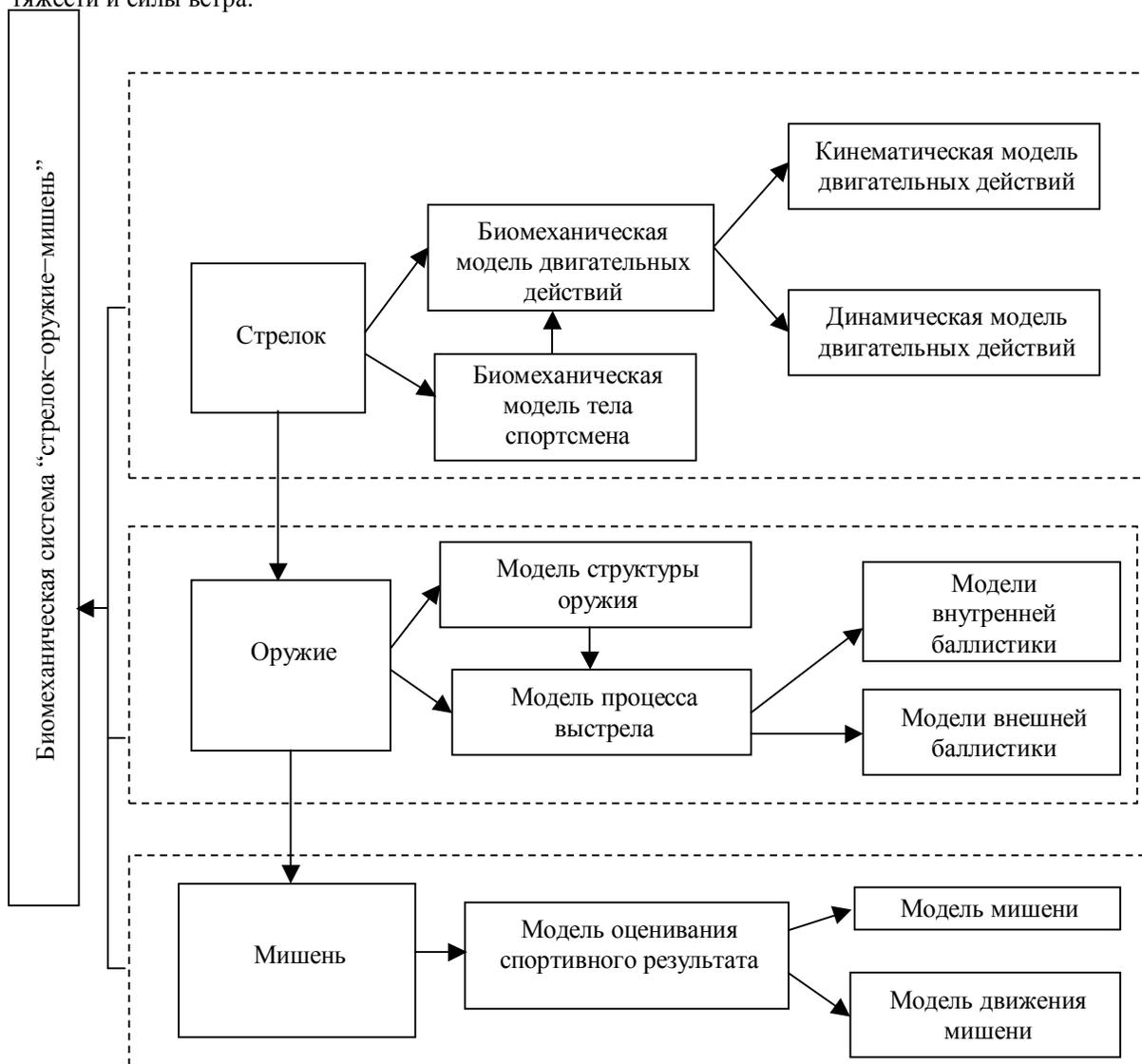


Схема 1. Структура имитационной модели биомеханической системы "стрелок-оружие-мишень"

Рассматривая определенные физико-математические или механико-математические модели, при описании состояния системы используются уравнения (довольно часто дифференциальные уравнения в частных производных), которые для однозначности решения нужно дополнить соответствующими краевыми (начальными и граничными) условиями. Если модель описывается дифференциальными уравнениями в частных производных второго порядка (один из наиболее часто встречающихся случаев), то начальные условия задаются на функции состояния и ее производных, а граничные условия – как зависимость между некоторыми параметрами состояния и их производными.

Действие человека, а также давление ветра на оружие, записывается в следующем виде [4]:

$$p(t) = p_0(t) [H(t - t_1) - H(t - t_2)],$$

где p , p_0 – давление; t – время, t_1 , t_2 – время начала и конца действия импульса, H – функция Хевисайда.

Остановимся на изучении объекта управления "стрелок-оружие-мишень" при внешних воздействиях с целью получения информации о процессах, которые протекают в системе, и разработки управленческих решений.

На первом этапе система “стрелок–оружие–мишень” рассматривается как “черный ящик”, в котором есть безграничное количество параметров входа, а на последующих этапах “черный ящик” детализируется, описывая в определенных приближениях процессы, происходящие в нем. Описываются параметры входа (точнее подсистема, которую сможем описать) и моделируется система эффективных двигательных действий стрелка. В стрельбе входными параметрами в систему “стрелок–оружие–мишень” являются, например, подсистемы параметров, связанные с внутренней и внешней баллистикой оружия со снарядом, а также движением мишени.

При моделировании подсистемы “стрелок” основное внимание уделим биомеханике физических упражнений, а именно двигательной системе человека и двигательным актам с целью создания научных основ современной системы подготовки спортсменов высокой квалификации.

Представим биомеханическую систему как совокупность элементов, обладающих определенными свойствами, которые могут по-разному проявляться в движениях спортсмена [1; 4]. В общем случае биомеханическая система состоит из трех блоков:

1. Скелет, состоящий из костей, суставов и связок, обеспечивающих жесткую конструкцию тела спортсмена. При этом кости выступают в роли рычагов для передачи силы или энергии, маятников для преобразования энергии, стержней для опоры и противодействия внешним нагрузкам. Суставы являются шарнирами, которые соединяют кости в кинематические цепи или шарнирами, ограничивающими подвижность костей относительно друг друга.

2. Мышечная система, состоящая из мышц и сухожилий, выполняющих функцию двигателей и трансмиссии. При этом мышцы являются преобразователями химической энергии в механическую. Сухожилиям присуще следующее: упругие элементы, способные накапливать и отдавать энергию; вязкие элементы, способные демпфировать внешние нагрузки; передатчики энергии (мощности) от других источников энергии.

3. Нервная система, обеспечивающая управление и контроль мышечной системы. Во время моделирования нервная система может выступать в виде программы управления в виде “черного ящика”.

При анализе движений в биомеханических системах решают две задачи:

- моделирование действия сил на систему с определением в результате формы (кинематики) перемещения отдельных звеньев биомеханической системы или ее в целом (прямая задача динамики);
- определение сил, действующих на биомеханическую систему на основе анализа кинематических характеристик (обратная задача динамики).

Особо укажем, что важнейшим моментом моделирования биомеханической системы является определение цели моделирования, исходя из чего подбирается адекватная модель. Структура модели предполагает задание числа звеньев, тип суставов, количество и вид движителей. Наиболее популярными и достаточно полными моделями тела человека являются 16–17-звенные модели с 40–44 степенями свободы. В связи с тем, что число мышц превышает число степеней свободы, то многие исследователи пытались использовать оптимизационные методы для поиска степени активности мышц при заданной кинематике.

Для математического и имитационного моделирования необходимо задавать следующие параметры биомеханической модели спортсмена: длины сегментов тела, их масса, расположение общих центров тяжести сегментов и всего тела, силы сопротивления внешней среды, величины и направления внутренних сил (сил мышечной системы) или их импульсы, перемещение, скорость и ускорение сегментов и тела. В зависимости от возможности получения тех или иных параметров возможна постановка прямой или обратной задачи динамики. При решении как прямой, так и обратной задачи динамики накладываются следующие ограничения и упрощения:

- сегменты тела человека (включая туловище) абсолютно твердые;
- все суставы идеальные;
- длины сегментов, положения центров масс известны;
- определены линейная и угловая кинематика звеньев тела;
- массы, тензор моментов инерции звеньев тела известны;
- силы реакции приложены в центрах вращения в суставах;
- моменты управления являются функциями сил межзвенных реакций, углов, угловых скоростей;
- силы сопротивления внешней среды известны.

Так называемая динамическая модель тела человека, которая состоит из систем с сосредоточенными и распределенными параметрами, связанными между собой упругими элементами, рассмотрена Г. А. Мысиной [7]. Элементы модели, имитирующие голову, бедро и голень – деформируемые элементы с различными значениями масс, моментов инерции, длинами и модулями упругости. Позвоночник представлен в виде упругого стержня или в более общем случае виде набора деформируемых элементов-позвонков.

Напряженно-деформируемое состояние в каждом сечении модели описывается вектором состояния, компонентами которого являются продольное перемещение, поперечное перемещение, угол поворота, изгибающий момент, поперечная сила, осевая сила.

Связь между начальными значениями параметров состояния и их значениями в некотором сечении представляется с помощью цепочки матриц.

При определенной частоте изгибно-продольных колебаний по известным значениям перемещений и внутренних сил в начале участка определяются значения тех же переменных в конце участка. Переходя от участка к участку, можно дойти до границы рассматриваемой системы, где перемещения или силы связаны условиями закрепления.

В конечном итоге с помощью биомеханической модели тела человека с использованием методов математического моделирования формализованы и описаны количественные характеристики исследуемых процессов, протекающих в организме спортсмена.

Выводы. В результате исследований предложено общую концепцию имитационного моделирования и практические схемы его реализации в спортивной стрельбе. Разработана структура имитационной модели формирования спортивного результата, составными частями которой есть стрелок, оружие и мишень с соответствующими структурными и процессуальными подмоделями. Обоснованы варианты исследования модели сложной биомеханической системы, при которых 1) стрелок является основным управляющим звеном в системе “стрелок–оружие–мишень”; 2) действия стрелка выступают внешними факторами влияния на систему “оружие–мишень”.

Литература

1. Биомеханика спорту / За ред. А. М. Лапутіна.– К.: Олімп. л-ра, 2005.– 320 с.
2. Воронов А. В. Имитационное биомеханическое моделирование как метод изучения двигательных действий человека // Теория и практика физ. культуры.– 2004.– № 2.– С. 22–26.
3. Загревский В. И. Программирование деятельности спортсменов на основе имитационного моделирования движений человека на ЭВМ: Автореф. дисс. ... д-ра пед. наук.– М., 1994.– 48 с.
4. Зацюрский В. М., Аруин А. С., Селуянов В. Н. Биомеханика опорно-двигательного аппарата человека.– М.: Физкультура и спорт, 1981.– 141 с.
5. Лопатьев А. О., Дзюбачик Н. И., Виноградский Б. А. О возможных подходах при моделировании сложных систем в стрелковых видах спорта // Наука в олимп. спорте.– 2004.– № 2.– С. 101–107.
6. Лопатьев А. О., Дзюбачик Н. И., Виноградский Б. А., Карасев В. А. Моделирование системы “стрелок–оружие–мишень” с учетом действия ветровых нагрузок // Наука в олимп. спорте.– 2005.– № 2.– С. 147–158.
7. Мысина Г. А. Основы создания новых средств для комплексной механотерапии с позиции теории биотехнических систем и устройств // Мед. науч. и уч.-метод. журн.– 2002.– № 6.– С. 97–108.
8. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем.– М.: Мир, 1978.– 418 с.

Анотації

У роботі запропоновано загальну концепцію імітаційного моделювання і практичні схеми її реалізації в спортивній стрільбі. Розроблено структуру імітаційної моделі формування спортивного результату, складовими частинами якої є стрілець, зброя і мішень із відповідними структурними та процесуальними підмоделями. Обґрунтовано варіанти дослідження моделі складної біомеханічної системи.

Ключові слова: модель, імітаційне моделювання, біомеханічна система.

В работе предложена общая концепция имитационного моделирования и практические схемы ее реализации в спортивной стрельбе. Разработана структура имитационной модели формирования результата, составляющими частями, которой являются стрелок, оружие, мишень с соответствующими структурными и процессуальными подмоделями. Обоснованы варианты исследования модели сложной биомеханической системы.

Ключевые слова: модель, имитационное моделирование, биомеханическая система.

The paper contains general concept of modeling and simulation and its practical implementation schemes in sport shooting. Structure of formation sport result simulation model was build. It includes shooter, weapon, target and their structure and process models. The research variants of compound biomechanical system are base.

Key words: *model, simulation model, biomechanical system.*