

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО МАСТЕРСТВА СПОРТСМЕНА В СОРЕВНОВАТЕЛЬНОМ УПРАЖНЕНИИ ПО ФАЗОВЫМ КООРДИНАТАМ УПРАВЛЕНИЯ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В. И. Загrevский

доктор педагогических наук, профессор
Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова

Д. А. Лавшук

кандидат педагогических наук, доцент
Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова

Ю. Ю. Кучеров

преподаватель
Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова

А. Ю. Овчинко

преподаватель
Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова

Разработан метод оценки технического мастерства спортсмена по фазовым координатам биомеханической системы в соревновательном упражнении. Введено понятие – коэффициент соответствия индивидуальной техники (КСИТ) в соревновательном упражнении ее эталонному образцу и разработан алгоритм численного определения КСИТ на основе сравнения индивидуальных показателей спортивной техники с параметрами биомеханических характеристик эталонного образца, принимаемого за идеал спортивной техники соревновательного упражнения.

Ключевые слова: биомеханическая система, техника соревновательного упражнения, математическая модель, соответствие образцу, фазовые координаты.

Введение

В настоящее время как в теории, так и в практике спорта на повестке дня остро стоит вопрос об объективной количественной оценке уровня освоенности атлетом спортивной техники изучаемого соревновательного упражнения. Оценка может выполняться на основе сравнения техники оригинального движения с эталонным образцом. Техника оригинального движения может быть исследована, например, по материалам видеосъемки двигательных действий, а в качестве эталонного образца может выступать:

1. Видеозапись соревновательного упражнения в исполнении спортсмена экстра-класса.
2. Синтезированная в вычислительном эксперименте на компьютере оптимальная индивидуальная техника соревновательного упражнения.

В нашей концепции педагогическая и биомеханическая оценка освоенности соревновательного упражнения может выполняться на основе сопоставления численных значений биомеханических характеристик в индивидуальном двигательном навыке с эталонным образцом технического мастерства. Таким образом, техническое мастерство спортсмена, как объект исследования, характеризуется некоторыми признаками, которые можно оценить в количественной и качественной форме. Здесь следует отметить, что задача отбора признаков в общем случае не может быть формализована [1], она тесно связана с тематической направленностью решаемой проблемы.

Так как в качестве показателей биомеханических параметров движения может выступать более 40 биомеханических характеристик двигательного действия [2; 3], один из основных, но так до сих пор не решенных как в теории спорта, так и в биомеханике физических упражнений вопросов заключается в выборе таких показателей движения и таком их представлении, которые бы давали достоверную картину уровня технического мастерства спортсмена на количественном уровне, что и обусловило цель исследования.

Методологическая база исследования опирается на ряд методических принципов и дидактических алгоритмов технической подготовки спортсменов, применяемых в теории и практике спорта (дидактический алгоритм «вход– выход», принцип конвергенции), в биомеханике физических упражнений (принцип стабилизации движений), в физиологической концепции зрения человека и теории машинного зрения (принцип сравнения по морфологической форме).

Дидактический алгоритм «один вход (много входов) – один выход (много выходов)» обуславливает одиночное (многовекторное) воздействие арсенала тренировочных средств на один (несколько) компонент(ов) моторной программы двигательного действия, сопровождаемый целостным контролем по одному (нескольким) показателям одновременно [4; 5]. В наших исследованиях была принята формула: «один вход – один выход». В качестве входного воздействия рассматривался кинематический уровень задания программного управления [2; 3]. Такой подход позволил для анализа технического мастерства спортсмена разработать и применить алгоритм вычисления коэффициента соответствия индивидуальной техники (КСИТ), сопоставляемого с техникой спортсмена экстра-класса.

Принцип конвергенции в теории спорта [4; 6] постулирует, что в процессе начального обучения двигательному действию и дальнейшего его совершенствования необходимо приобретение такой топологической структуры изучаемого двигательного действия, которая сходна с аналогичной структурой соревновательного упражнения в исполнении высококвалифицированного спортсмена.

Принцип стабилизации движений в биомеханике физических упражнений [7] провозглашает, что стабилизация системы движений – это достижение постоянства высокого спортивного результата путем уменьшения влияния сбивающих воздействий (помех), снижающих его.

Принцип сравнения объектов исследования по морфологической форме предусматривает выполнять сравнение двух изображений на плоскости по корреляционной матрице [8-11]. В работе [8] показано, что аналогичную функцию выполняет и отношение перекрываемых площадей сравниваемых изображений.

Цель исследования – теоретически обосновать, разработать и реализовать методику количественной оценки уровня технического мастерства спортсмена в соревновательном упражнении.

Методы исследования. Аналитический обзор специальной литературы, расчетные модели анализа движений биомеханических систем, вычислительный эксперимент, компьютерная визуализация результатов исследования.

Результаты исследования. Концептуальная основа исследования разработана на основе аналитического обзора специальной литературы и последующего дедуктивного обобщения основных этапов экспериментальной части работы в виде информационной модели.

1. **Исходные данные.** Первичная биомеханическая информация, необходимая для построения и анализа фазового портрета управления двигательным действием спортсмена по материалам оптической регистрации движений, включает данные видеосъемки упражнения и выполненный промер соревновательного упражнения в виде кинетограммы упражнения.

2. **Расчетные модели анализа движений биомеханических систем** – математические модели представления движения биомеханической системы (БС) в визуальной, графической, численной форме.

Визуальная и графическая модель траектории БС. По численным значениям обобщенных координат создается представление о траектории биомеханической системы, которую можно визуально отобразить в виде кинетогаммы упражнения (рис. 1, А) и графика обобщенных координат звеньев БС (рис. 1, Б).

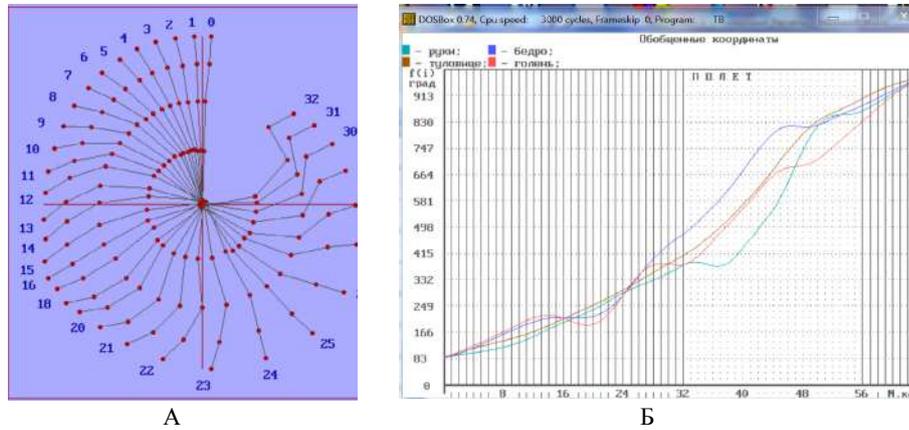


Рисунок 1 – Визуальная (А) и графическая (Б) интерпретация траектории звеньев тела спортсмена в гимнастическом упражнении «Сальто Ковач» на перекладине

По материалам видеосъемки спортивных упражнений имеется набор обобщенных координат (Q_{ij}) звеньев тела спортсмена, представленных в виде значений угла наклона звена БС к числовой оси Ox ДСК. Здесь: i – номер звена биосистемы, j – номер узла дискретизации модели по времени t_j . Введем также: n – количество звеньев биосистемы, L – количество узлов дискретизации модели.

Обобщенные координаты. Результат считывания декартовых координат маркерных точек биомеханической системы (суставы) и их последующее преобразование в обобщенные координаты (табл. 1) биомеханической системы (БС) – итог выполненного промера упражнения.

Таблица 1 – Обобщенные координаты звеньев тела гимнаста в упражнении «Сальто Ковач» (фрагмент опорного периода)

№ п/п (видеокадр)	Время (с)	Обобщенные координаты звеньев модели (град)			
		Звено 1 $Q_{1,j}$	Звено 2 $Q_{2,j}$	Звено 3 $Q_{3,j}$	Звено 4 $Q_{4,j}$
0	0	87.95	88.15	84.68	87.27
1	0,04	91.10	94.33	88.56	94.51
2	0,08	93.36	100.3	101.56	102.87
3	0,12	99.61	107.74	107.65	117.14
...
30	1,20	345.71	385.14	445.36	380.85
31	1,24	361.1	396.65	459.92	371.56

Программное управление. Количественные изменения суставных углов используются в математической модели синтеза движений БС в виде программного управления ($u_{i,j}$), аналитическое выражение которого для i -го сустава и j -го узла временной сетки t_j имеет вид

$$u_{i,j} = (Q_{i+1,j} - Q_{i,j}); \quad i = 1, \dots, n-1; \quad j = 0, \dots, L. \quad (1)$$

Скорость программного управления ($\dot{u}_{i,j}$) вычисляется в каждой временной точке t_j дискретизации модели

$$\dot{u}_{i,j} = (Q_{i+1,j+1} - Q_{i,j-1}) / 2h; \quad i = 1, \dots, n-1; \quad j = 1, \dots, L-1. \quad (2)$$

Временной интервал (h) между узлами дискретизации модели равен 0,04 с.

3. Фазовый портрет кинематического управления. Отдельные показатели фазового портрета управления рассматривались нами как элементы характеристик структурного состава фазовой траектории и формы кинематического управления: фазовая плоскость, траектория, форма, периметр, центр, площадь.

Фазовая плоскость и траектория изображающей точки управления. Графическое воспроизведение траектории движения биомеханической системы на плоскости выполняется, например, построением прямоугольной декартовой системы координат Oxy , в которой x, y – декартовы координаты объекта в проекции на числовые оси Ox и Oy . Координаты объекта (x, y) определяются в евклидовом метрическом пространстве с заданным шагом по времени. Каждой i -й временной точке t_i соответствует пара значений координат x_i, y_i – изображающая точка в фазовом пространстве. Аналогичным образом строится и фазовая плоскость Oxy (рис. 2), в которой числовая ось Ox определяет величину кинематического управления в суставах спортсмена (u_{ij}), а числовая ось Oy имеет значения и размерность скорости кинематического управления (\dot{u}_{ij}).

Сегментация формы. Традиционно для геометрического анализа формы объекта начало системы координат совмещают или с центром тяжести объекта или размещают объект в одном из квадрантов ДСК. Максимальное и минимальное значения величины суставного угла (лимиты) и будут определять ограничения по оси Ox . Скорость изменения суставного угла отсчитывается по оси Oy и определяет максимум и минимум сетки ДСК по вертикали. Такое расположение начала системы координат ДСК позволяет ввести традиционную запись квадрантов ДСК (рис. 2, А, квадранты: I, II, III, IV) и выполнить сегментацию формы объекта в соответствии с расположением ее части (всей формы) в квадрантах фазовых координат системы ДСК.

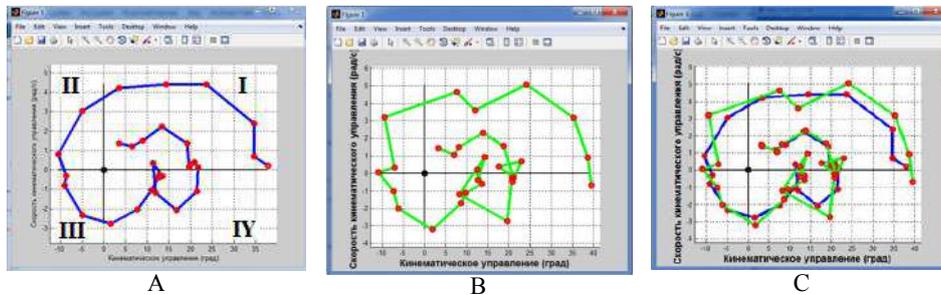


Рисунок 2 – Фазовая траектория кинематического управления различных спортсменов:
А – эталон, Б – сравниваемый исполнитель, С – наложение траекторий

Управление (u_{ij}) имеет знак «+» – плюс в квадрантах I, IV и знак «-» – минус в квадрантах II, III. Скорость управления (\dot{u}_{ij}) имеет положительное значение в квадрантах I, II и отрицательное – в квадрантах III, IV.

Пересечение изображающей точкой нулевой отметки оси Oy – момент максимума (по абсолютной величине) кинематического управления (максимум сгибания или разгибания). В этот момент происходит переключение сгибательного движения в суставе на разгибательное или наоборот – разгибательного движения на сгибательное. Пересечение изображающей

точкой нулевой отметки оси Ox – момент достижения расположения двух звеньев кинематической пары на одной прямой (суставной угол равен 180°).

Границы. Границы не могут относиться к атрибутам траектории, т.к. границы определяют контур объекта и формируются его краями: траекторию определяет линия, а форму – контур и границы объекта. Визуально положение на плоскости ДСК вычисленных значений управления (ось Ox) и скорости управления (ось Oy) для дискретных значений времени (t_j) определяют маркерные точки фазовых координат в узлах дискретизации временной оси. Маркерные точки соединяются отрезками прямых (кривой) и формируют линию траектории (рис. 2, А) и контур формы объекта.

Форма. Геометрическая форма модели фазовых координат описывается многоугольником, вершины которого соединяются прямолинейными отрезками (ребро). Координаты вершин многоугольника (отличительные точки) формируются по расчетным показателям биомеханических характеристик. К примеру, точка C_i , соотносится с i -м номером видеокадра упражнения и имеет по числовой оси Ox ДСК значение X_i – величина суставного угла в точке i (рис. 1). Координата этой же точки (C_i) имеет по числовой оси Oy ДСК значение Y_i – скорость изменения суставного угла в точке i . Вершины многоугольника – дескрипторы формы модели (отличительные точки).

Геометрическими признаками, характеризующими форму объекта выступают [1]: периметр, площадь, минимальный и максимальный радиус, углы, степени округленности объекта, кривизна, степень симметрии.

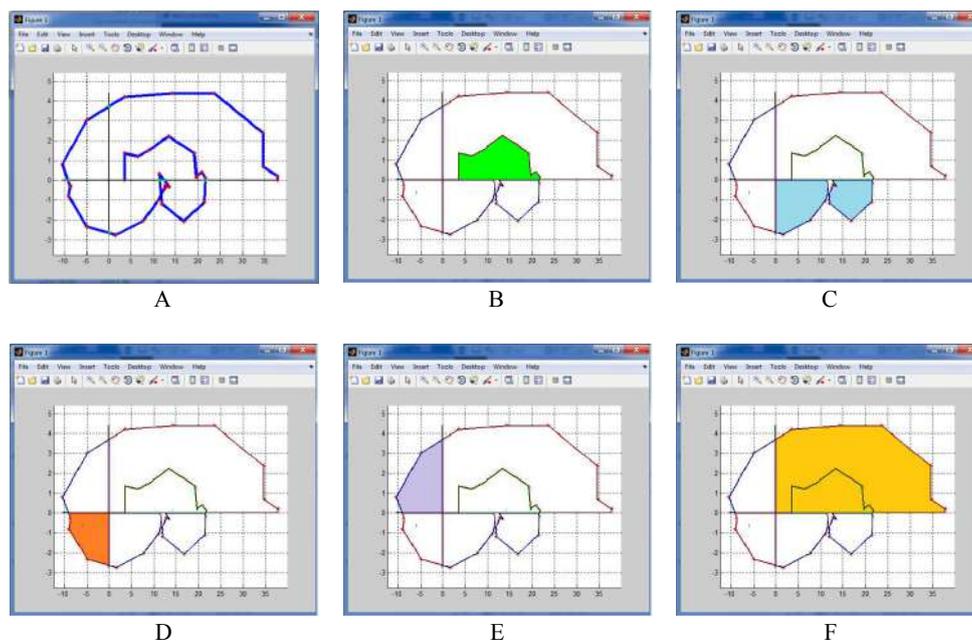


Рисунок 3 – Форма сегментированных изображающей точкой участков траектории управления в зависимости от их расположения в квадрантах ДСК

В наших исследованиях было определено, что наиболее информативными показателями сопоставления технического мастерства различных исполнителей являются следующие характеристики формы управления: периметр, центр, площадь, ориентация, отношение площади выхода за границы контура эталона к площади эталона.

Периметр. Для многоугольника с вершинами, определяемыми координатами маркерных точек управления (рис. 2, А), периметр вычисляется как сумма его сторон. В принятых

нами обозначениях координат маркерных точек управления формульное выражение периметра кинематического управления имеет вид

$$p_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}, \quad R = \sqrt{(x_L - x_1)^2 + (y_L - y_1)^2}, \quad P = \sum_1^{L-1} p_i + R. \quad (3)$$

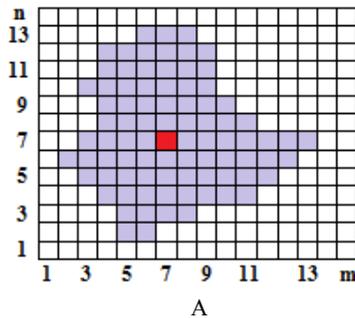
Здесь: L – количество вершин многоугольника, R – расстояние между начальной (x_1, y_1) и конечной маркерными точками (x_L, y_L) , принимаемыми за вершины многоугольника. Координаты вершин многоугольника считаются в пикселях изображения. В пикселях вычисляется и периметр (P) формы кинематического управления.

Центр. В биомеханике физических упражнений [2, 3] общий центр масс системы тел по оси Ox (Cx) и оси Oy (Cy) определяется из формульных выражений

$$Cx = \frac{\sum_{i=1}^N m_i X_i}{\sum_{i=1}^N m_i}, \quad Cy = \frac{\sum_{i=1}^N m_i Y_i}{\sum_{i=1}^N m_i}. \quad (4)$$

Здесь: m_i – масса i -го тела, X_i, Y_i – координата i -го тела по осям Ox, Oy .

Уравнения (4) для однородной тонкой пластины произвольной формы с равномерным распределением вещества преобразуются к виду



$$Cx = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M j \cdot K_{i,j}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M K_{i,j}} \quad (5) \quad Cy = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M i \cdot K_{i,j}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M K_{i,j}} \quad (6)$$

$K_{i,j} = 1$ – ячейка фигуры; $K_{i,j} = 0$ – ячейка фона.

Рисунок 4 – Центр тяжести (■) фигуры (□) произвольной формы (А) и алгоритм его определения по оси Ox (В) и Oy (С)

Сетку рисунка (рис. 4, А) можно представить в виде матрицы пикселей компьютерного экрана, в котором каждый пиксель имеет вес: если пиксель захватывает изображение, то его вес становится равным 1, в противном случае вес пикселя равен 0. Становится возможным считать по формулам (5-6) координаты центра рисунка, а также и его площадь, определяемую знаменателем формул (5-6).

Площадь. Для расчета площади (S) фазового портрета кинематического управления, кроме способа бинаризации изображения и вычисления знаменателя в формулах 5-6, можно выполнить расчет площади изображения по методике вычисления определителя матрицы [12], реализуя схему (рис. 5).

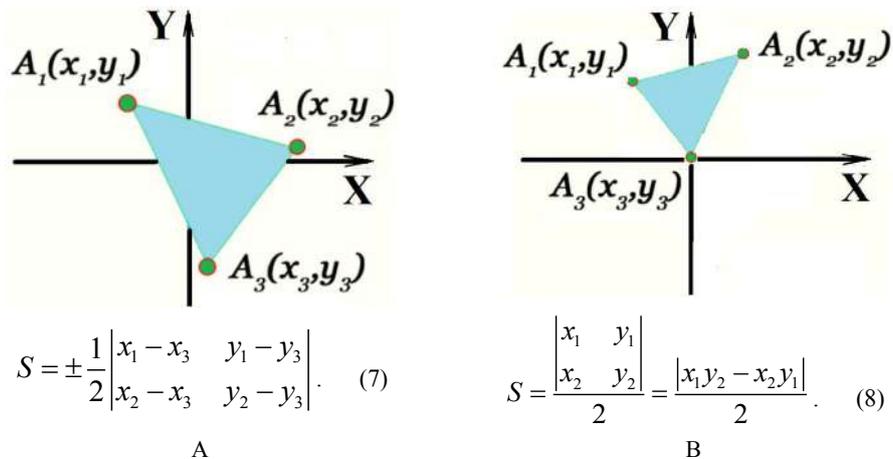


Рисунок 5 – Площадь произвольно расположенного треугольника в прямоугольной системе координат (А) и при расположении одной из вершин в начале ДСК (В)

В работе [12] приведены формулы определения площади треугольника по координатам его вершин, которые можно представить через вычисление определителя (рис. 8, А). Так как площадь треугольника – положительное число, то, если определитель в уравнении (7) больше 0, дробь $(1/2)$ берется положительной, в противном случае – отрицательной.

Отклонение исполнителя от эталона – критерий оценки технического мастерства спортсмена. Степень отклонения кинематического управления спортсмена от эталона-образца оценивает уровень технического совершенства исполнителя в управлении движением (рис. 6, В).

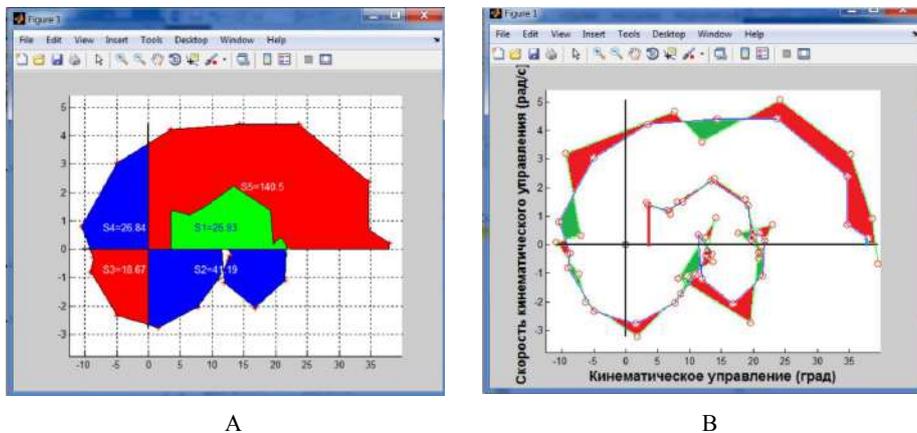


Рисунок 6 – Площадь сегментов кинематического управления (А) и разница между эталоном и сравниваемым исполнителем (В)

На рисунке (рис. 6, В) выход за пределы фазового портрета отмечен красным цветом, зеленый цвет – недостигнутые показатели эталона-образца.

Качественную сторону результата отклонения можно формализовать, представив этот показатель в виде отношения разницы площадей фазового портрета эталона и исполнителя к площади эталона

$$КСИТ = \frac{|S_1 - S_2|}{S_1}. \quad (9)$$

Здесь: S_1 – площадь фазового портрета эталона, S_2 – площадь фазового портрета исполнителя.

Так как численное значение показателя КСИТ в формульном выражении (9) имеет не абсолютную, а относительную величину, то он может быть использован для оценки индивидуального технического мастерства спортсмена.

Заключение

Кинематическое управление биомеханической системы на основе сгибательно-разгибательных движений спортсмена в суставах формирует ее траекторию в пространстве фазовых координат и является управляющей функцией, изменяющей механическое состояние биосистемы. Движение спортсмена без схода с траектории эталонной техники принимается за 100% уровень технического мастерства и осуществляется кинематическим управлением, адекватным управлению эталонной модели.

Сравнение технического мастерства спортсмена с эталонной техникой выполняется по фазовому портрету кинематических управлений исполнителя и эталона-образца, сформированных в пространстве фазовых координат.

Методика сравнительного сопоставления позволяет количественно оценить степень соответствия индивидуального исполнения соревновательного упражнения с его эталоном, принимаемым за идеальный образец спортивной техники соревновательного упражнения. Численная оценка осуществляется на основе разработанного критерия коэффициента соответствия индивидуальной техники (КСИТ), сопоставляемого с техникой соревновательного упражнения спортсмена экстра-класса или техники упражнения, синтезированного по методике построения оптимального управления в вычислительном эксперименте на компьютере.

Сегментация фазового портрета кинематического управления с последующей визуализацией траектории фазовой точки позволяет сделать обоснованные выводы о двигательных ошибках в отдельных сегментах (стадиях и фазах) управляющих движений спортсмена в суставах и разработать соответствующую методику их коррекции, исправления и нейтрализации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Макаров, А. О.* Быстрые алгоритмы вычисления признаков на цифровых изображениях / А. О. Макаров, В. Г. Старовойтов. – Минск, 2005. – 39 с. (Препринт / Объединенный институт информатики Национальной академии наук Беларуси; № 1).
2. *Загrevский, В. И.* Формализм Лагранжа и Гамильтона в моделировании движений биомеханических систем: монография / В. И. Загrevский, О. И. Загrevский, Д. А. Лавшук. – Могилев : МГУ имени А.А. Кулешова, 2018. – 296 с.
3. *Загrevский, В. И.* Построение оптимальной техники спортивных упражнений в вычислительном эксперименте на ПЭВМ: монография / В. И. Загrevский, Д. А. Лавшук, О. И. Загrevский. – Могилев : МГУ имени А. А. Кулешова, 2000. – 190 с.
4. *Хлебников, В. А.* Основные принципы технической подготовки в спорте / В. А. Хлебников // Сб. науч. тр. по материалам научно-практ. конференции «Наука, технологии и образование в XXI веке: проблемы взаимодействия и интеграция». – Белгород : АПНИ, 2020. – С 156–160.
5. *Музылева, И. В.* Применение метода пространства состояний для обобщенной системы типа «один вход – один выход» / И. В. Музылева, Л. Н. Языкова, В. Н. Мещеряков // Вестник кибернетики. – 2022. – № 4 (48). – С. 59–68.
6. *Платонов, В. Н.* Двигательные качества и физическая подготовка спортсменов / В. Н. Платонов. – М. : Спорт, 2019. – 656 с.
7. *Донской, Д. Д.* Биомеханика: учеб. для ин-тов физ. культуры / Д. Д. Донской, В. М. Зациорский. – М. : Физкультура и спорт, 1979. – 264 с.
8. *Визильтер, Ю. В.* Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий / Ю. В. Визильтер [и др.]. – М. : Физматкнига, 2010. – 672 с.
9. *Визильтер, Ю. В.* Сравнение статистических оценок свойств различных морфологических фильтров, построенных на основе мозаичных моделей изображений / А. В. Визильтер, О. В. Выголов, С. Ю. Желтов // «Компьютерная оптика». – 2021. – Т. 45, № 3. – С. 449–462.

10. **Грудинин, С. Н.** Сравнение трехмерных объектов. Критерии оценки сходства / С. Н. Грудинин // Молодой ученый. – 2011. – Т. 1, № 5(28). – С. 42–44.

11. **Пытьев, Ю. П.** Методы морфологического анализа изображений / Ю. П. Пытьев, А. И. Чуликов. – М. : Физматлит, 2010. – 336 с.

12. **Гусак, А. А.** Справочник по высшей математике / А. А. Гусак, Г. М. Гусак, Е. А. Бричкова. – Мн. : ТетраСистемс, 1999. – 640 с.

Поступила в редакцию 3.01.2024 г.

Контакты: zagrevskii@msu.by (Загревский Валерий Иннокентьевич), lavshuk_da@msu.by (Лавшук Дмитрий Александрович), kucherov@msu.by (Кучеров Юрий Юрьевич), ovchinko@msu.by (Овчинко Анастасия Юрьевна)

Zagrevsky V. I., Lavshuk D. A., Kucherov Yu. Yu., Ovchinko A. Yu. ASSESSMENT OF ATHLETE'S TECHNICAL SKILL IN A COMPETITIVE EXERCISE BY PHASE COORDINATES OF BIOMECHANICAL SYSTEM

The method for evaluating athlete's technical skill in a competitive exercise according to the phase coordinates of a biomechanical system has been developed. The concept of the coefficient of conformity of individual equipment (CCIE) in a competitive exercise to its reference model is introduced and the algorithm for numerical determination of CCIE is developed based on the comparison of individual indicators of sports technique with the parameters of biomechanical characteristics of the reference model, taken as the ideal of sports technique of a competitive exercise.

Keywords: biomechanical system, technique of competitive exercise, mathematical model, pattern matching, phase coordinates.