А.В. Ворон

...Прямо на меня мчалась изумительная машина, совершенно непохожая на все виденные мною до сих пор. ... основу ее составляли два мощных и гибких стержня, по-видимому, состоявших каждый из нескольких частей. ... невозможно было проникнуть в суть и секрет их поразительного движения. Как еще далека наша, знакомая мне, техника от подобных механизмов!!!
(Н.А. Бернштейн, «О ловкости и ее развитии»)

Математические основания временной структуры системы движений бега и ее единство

Аннотация. В статье на основе геометрической модели периодов опоры и полета беговых шагов и подограммы движений двойного шага показана оптимальная временная структура локомоций бега. Обосновывается гипотеза о том, что единство объекта-системы «Двойной шаг бега» обусловлено «золотыми» пропорциональными отношениями объекта-системы к своим подсистемам и между самими подсистемами. Выявленные закономерности системы локомоций человека представляют не только теоретическую ценность для биомеханики, но и практическую – для робототехники.

Ключевые слова. Временная структура, локомоции бега, движения бега, единство системы, геометрическая модель бега.

Введение. В основе современного понимания двигательных действий заложен системно-структурный подход, который позволяет рассматривать тело как движущуюся систему. Системно-структурный подход к изучению движений реализуется в теории структурности движений Н.А Бернштейна. Ученый утверждает, что «Движение не есть цепочка деталей, а структура, дифференцирующаяся на детали» [1, 2, 3]. Собственные исследования позволяют научно обоснованно предполагать наличие определенных закономерностей системы локомоций человека [4, 5, 6, 7, 8]. Выявление закономерностей системы локомоций человека представляет значимую проблему биомеханики. В этой связи предпринято настоящее исследование.

Основная часть. *Объектом* настоящего исследования явились локомоции бега. *Предметом* исследования выступила временная структура системы движений бега.

В качестве наглядного образного представления соотношения длительности исследуемых движений создана геометрическая модель оптимального способа бега (рисунок 1) [4, 6, 7]. Эта модель содержит отрезки соразмерные длительности фазы амортизации опорного периода (отрезок АВ, красный), фазы отталкивания опорного периода (отрезок ВО, синий), безопорного периода (отрезок $ОВ_1$, зеленый). Направляющие АО, $ОА_1$ образуют окончательный вид геометрической модели в виде прямоугольных треугольников.

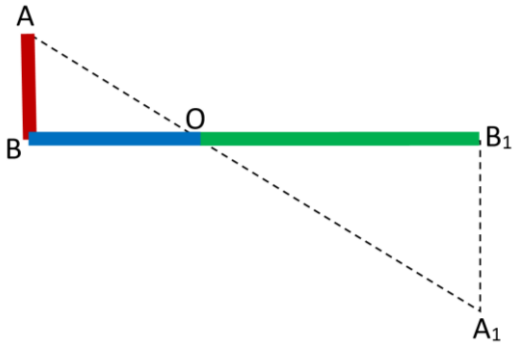

Рисунок 1 – Геометрическая модель оптимальной временной структуры периодов опоры и полета беговых шагов, где: АВ+ВО – соразмерное отображение длительности опорного периода (АВ/ВО = 0,618…); АВ – длительность амортизации; ВО – длительность отталкивания; $ОВ_1$ – длительность безопорного периода в беге; $АО/ОА_1 = 0,618…$

Оптимальный вариант техники бега (на примере геометрической модели представленной на рисунке 1) возникает условиях, когда соотносится в отношении «золотой» пропорции длительность фазы отталкивания к длительности фазы амортизации в опорном периоде и, соответственно, длительность безопорного периода – к длительности фазы отталкивания опорного периода согласно формуле 1 [6].

$$BO/AB=OB_1/BO \quad (1)$$

Используя цифровые данные о длительности амортизации опорного периода бегового шага и геометрическую модель периодов опоры и полета беговых шагов в беге (рисунок 1), а также – теорему Пифагора, можно рассчитать, длительность отталкивания опорного периода бегового шага по формуле 2.

$$BO=\sqrt{(AO^2–AB^2)} \quad (2)$$

Зная длительность отталкивания опорного периода бегового шага и, используя геометрическую модель периодов опоры и полета беговых шагов в беге (рисунок 1), можно рассчитать, длительность безопорного периода бегового шага в соответствии с формулой 3.

$$OB_1=BO\times1{,}618… \quad (3)$$

Зная значение коэффициента активности бега (КА), можно рассчитать соотношение длительности отдельных периодов и фаз бегового шага следующим способом [6]. Значение этого коэффициента (например, 1,3) делится на значение «золотого сечения» – 1,618... согласно предложенной формуле (4). Получаем относительное значение фазы отталкивания опорного периода ($Ф_{от}$=0,8034441853748632…). Если от условной единицы вычесть полученное значение фазы «отталкивание» – получим относительное значение фазы «амортизация» ($Ф_{ам}$=0,1965558146251368…) (формула 5). Таким образом, используя сравнительно простые математические операции, получаем ряд относительных значений (коэффициентов) двух периодов бегового шага – отталкивания (амортизации и отталкивания) и полета в виде следующего ряда относительных величин: 0,196…∝ 0,803… ∝ 1,3.

$$Ф_{от}=КА/1{,}618… \quad (4)$$

$$Ф_{ам}=1– Ф_{от} \quad (5)$$

Эмпирическая проверка гипотезы о наличии оптимальных временных структур в локомоциях бега с экономией физических усилий (или при беге «на выносливость») проводилась в исследованиях [4, 5, 6].

Под структурой системы мы понимаем совокупность устойчивых связей между элементами системы, которые обеспечивают целостность системы и тождественность самой себе. При этом наличие связей между элементами системы ведет к появлению в целостной системе новых свойств, не присущих элементам в отдельности.

Структурные элементы в системе находятся не сами по себе, а связаны один с другим. Под такой связью мы понимаем любого рода взаимоотношения между частями системы. Максимальное количество неоднородных (с различным соотношением) связей в системе определяется числом возможных сочетаний между элементами. Если, например, система состоит из пяти элементов, то максимальное количество неоднородных связей для нее равно 10-ти (за исключением повторений). Между двумя элементами в таком случае допустима лишь одна связь (соотношение). Образование более одной (в данном случае – две) структурной связи возможно при условии построения системы на основе, так называемой,

«золотой» пропорции или принципа «золотого» соотношения (рисунок 2). В таком случае возникает, например, для двух подсистем не одна, а две однородные (с одним соотношением) структурные связи. Подобное число однородных связей среди множества подсистем в системе может характеризовать ее единство: чем больше однородных связей у частей системы, тем более единой представляется целая система.

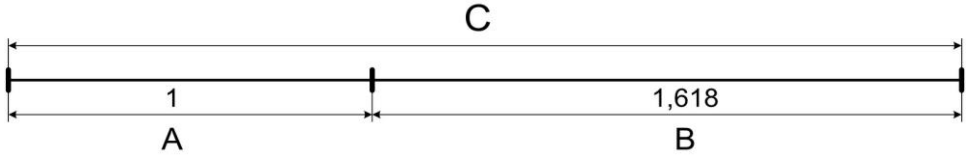

Рисунок 2 – Деление в соответствии с «Золотой» пропорцией, где B/A=C/B

Увеличение количества подсистем в такой системе приводит к сравнительно большому увеличению ее однородных структурных связей в соответствии с формулой 6:

$$A=n\times2-2 \qquad (6)$$

где: A – количество структурных связей; n – количество элементов в структуре.

Единство объекта-системы «Двойной шаг бега», вероятно, обусловлено «золотыми» пропорциональными отношениями объекта-системы к своим подсистемам и между самими подсистемами [5]. Например, отношением «золотой» пропорции между фиксацией предплечья и его движением, между движением голени и ее фиксацией (рисунок 3, 4). Таким образом, единство временной структуры отдельных движений локомоций бега может быть обусловлено наибольшим (из возможных вариантов) количеством «золотых» соотношений между подсистемами, а значит – и наибольшим количеством структурных связей (математических отношений) между ними. Любой другой коэффициент показывает меньшее количество структурных связей в рассматриваемой системе (равенства 7–14).

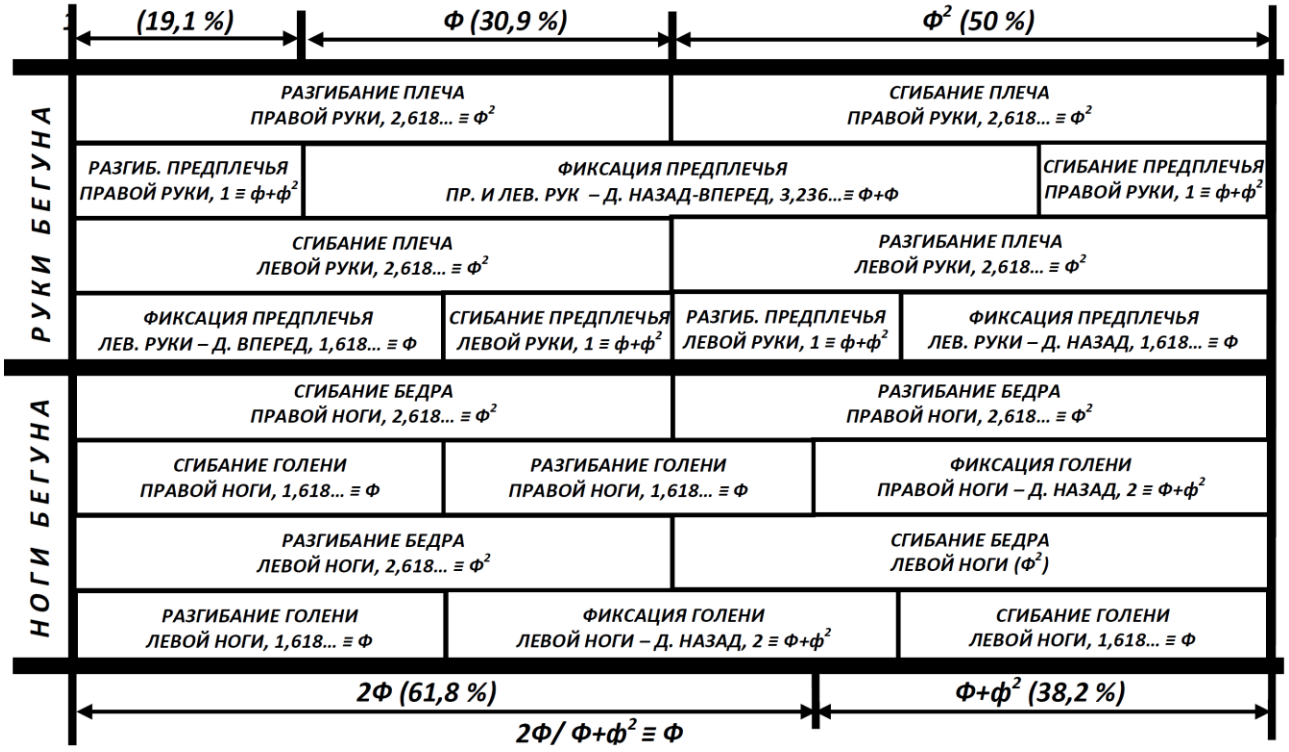

Рисунок 3 – Подограмма временной структуры движений двойного шага в беге [5], где «Ф» ((√5+1)/2=1,618) и «ф» ((√5+1)/2)–1=0,618) – константы «золотой» пропорции



Рисунок 4 – Блок-схема длительности движений спортсменов в цикле «двойной шаг» бега как отношений объекта-системы «А» к объектам-подсистемам «В», «С», «D», «Е», «F» [5], где: составными частями объекта-системы размером 5,236 условных единицы (у.е.) являются подсистемы с размерами 1; 1,618; 2; 2,618; 3,236 у.е.

$$Ф=1{,}618=A/B=B/D=C/E=E/F=(E+E)/D=B/(F+F)=(C+E)/C=(B+F)/C \quad (7)$$

$$A=C+E+F=B+D=B+F+F=D+E+E=C+C \quad (8)$$

$$B=E+E \quad (9)$$

$$C=E+F \quad (10)$$

$$D=F+F \quad (11)$$

$$A=C\times D=B\times E=F\times A=C\times E+F=D\times E+(F+F) \quad (12)$$

$$B=D\times E=E\times(F+F) \quad (13)$$

$$C=E\times E \quad (14)$$

Примечательным является равенство 12: числовое значение объекта-системы «А» равно произведению двух различных подсистем входящих в систему ($C\times D=B\times E=F\times A$).

Закономерности системы локомоций человека представляет не только теоретический вопрос биомеханики, но и практическую составляющую для робототехники. А именно: важную часть построения или создания человекоподобного робота составляет решение проблемы программирования движений «бега» машины. Базовые математические алгоритмы этой локомоции у робота должны быть основаны на закономерностях биомеханики подобной локомоции человека. В целом, использование закономерностей биомеханики локомоций человека позволит в значительной степени усовершенствовать качество движений у человекоподобных роботов.

Заключение.

1. На основе геометрической модели периодов опоры и полета беговых шагов и подограммы движений двойного шага показана оптимальная временная структура локомоций бега.

2. Обосновывается гипотеза о том, что единство объекта-системы «Двойной шаг бега» обусловлено «золотыми» пропорциональными отношениями объекта-системы к своим подсистемам и между самими подсистемами.

3. Выявленные закономерности системы локомоций человека представляют не только теоретическую ценность для биомеханики, но и практическую – для робототехники.

Список литературы:

1. Бернштейн Н.А. Исследования по биодинамике ходьбы, бега, прыжка / Н.А. Бернштейн. – М., «Физкультура и спорт», 1940. – 312 с.

2. Бернштейн Н.А. О построении движений / Н.А. Бернштейн. – М., Медгиз, 1947. – 254 с.

3. Бернштейн, Н.А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности / Н.А. Бернштейн. – М.: Медицина, 1966. – 349 с.

4. Ворон, А.В. «Золотая» пропорция и локомоции человека / А.В. Ворон // Ученые записки: сб. рец. науч. тр. / редкол.: С.Б. Репкин (гл. ред.) [и др.]; Белорус. гос. ун-т физ. культуры. – Минск: БГУФК, 2018. – Вып. 21. – С. 86–92.

5. Ворон, А.В. Гармоничные отношения временной структуры движений конечностей человека при беге / А.В. Ворон // Ученые записки: сб. рец. науч. тр. / редкол.: С.Б. Репкин (гл. ред.) [и др.]; Белорус. гос. ун-т физ. культуры. – Минск: БГУФК, 2019. – Вып. 22. – С. 256–263.

6. Ворон, А.В. Математические соотношения временных структур оптимальных способов ходьбы и бега // А.В. Ворон, О.А. Гарбаль, А.В. Седнева // Ученые записки: сб. рец. науч. тр. / редкол.: С.Б. Репкин (гл. ред.) [и др.]; Белорус. гос. ун-т физ. культуры. – Минск: БГУФК, 2024. – Вып. 27. – С. 8–17.

7. Ворон, А.В. Структурная гармония локомоций человека / А.В. Ворон // Научное обоснование физического воспитания, спортивной тренировки и подготовки кадров по физической культуре, спорту и туризму: материалы XV Междунар. науч. сессии по итогам НИР за 2016 год, посвященной 80-летию университета, Минск, 30 марта – 17 мая 2017 г.: в 4 ч. / Белорус. гос. ун-т физ. культуры; редкол.: Т.Д. Полякова (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГУФК, 2017. – Ч. 1. – С. 47–51.

8. Юшкевич, Т.П. Некоторые аспекты использования пропорции «золотого сечения» в физической культуре и спорте // Т.П. Юшкевич, А.В. Ворон // Мир спорта. – 2022. – № 2. – С. 77–83.