



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-8-37-45>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 51-76; 612.76

АЛГОРИТМ АНАЛИЗА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕГА

ДАВЫДОВА Н.С.¹, ВАСЮК В.Е.², ПАРАМОНОВА Н.А.², МЕЖЕННАЯ М.М.¹,
ГУСЕЙНОВ Д.И.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 13 ноября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Биомеханика двигательных действий решает задачи анализа внешних двигательных проявлений – кинематических и динамических параметров движения. Для биомеханического анализа движений человека используются устройства инерциального измерения, такие как гироскоп и акселерометр. В работе рассмотрен алгоритм анализа кинематических характеристик бега на основе сигналов инерциального гироскопа. Бег используется для оценки физической работоспособности, выносливости, координационных способностей человека. Регистрация сигналов гироскопа осуществлялась с помощью беспроводной системы Trigno™ Wireless System. Для анализа данных в среде технических вычислений MATLAB было разработано программное обеспечение для автоматизированной оценки электромиографического и биомеханического паттерна движений. Представленный алгоритм позволяет количественно оценить пространственные, временные и пространственно-временные параметры движения, симметрию движений левых и правых конечностей, а также стабильность повторения биомеханического паттерна движения. Алгоритм включает в себя следующие этапы: 1) адаптивная фильтрация сигналов; 2) определение фаз движения; 3) расчет пространственно-временной симметрии левых и правых конечностей; 4) анализ стабильности повторения биомеханического паттерна движения. Предложенный алгоритм был использован для оценки двигательного-координационного потенциала высококвалифицированных представителей легкой атлетики в беге на длинные дистанции. Проведенное исследование позволило оценить индивидуальные особенности работы каждой группы мышц для каждого спортсмена при выполнении тестового задания со ступенчато повышающейся нагрузкой на беговой дорожке. Такой подход является наглядным инструментом для выявления асимметричной работы парных групп мышц, а также выявления групп мышц с нерациональной вработываемостью. Предлагаемый алгоритм анализа кинематических характеристик бега может быть использован для разработки новых критериев оценки эффективности решения двигательной задачи, а также оценки правильности выполнения техники движения и обнаружения критических ошибок, которые приводят к травмам.

Ключевые слова: биомеханика, инерциальные датчики, паттерн движения, цифровая обработка сигнала, статистический анализ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Давыдова Н.С., Васюк В.Е., Парамонова Н.А., Меженная М.М., Гусейнов Д.И. Алгоритм анализа кинематических характеристик бега. Доклады БГУИР. 2020; 18(8): 37-45.

ALGORITHM FOR THE ANALYSIS OF KINEMATIC CHARACTERISTICS OF RUNNING

NADEZHDA S. DAVYDOVA¹, VALERIY E. VASIUK², NATALIA A. PARAMONOVA²,
MARINA M. MEZHENNAYA¹, DANIIL I. GUSEINOV²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 13 November 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Biomechanics of motor actions solves the problems of analysis of external motor events - kinematic and dynamic movement parameters. Inertial measurement devices such as gyroscope and accelerometer are used for biomechanical analysis of human movements. The paper describes an algorithm for analysis of kinematic characteristics of the running based on inertial gyro signals. Running is used to estimate the physical performance, endurance, coordination abilities of a person. Gyroscope signals were registered using the Trigno™ Wireless System. For data analysis in the MATLAB, the software for automated evaluation of electromyographic and biomechanical motion patterns was developed. The algorithm allows one to calculate time, spatial and spatial-to-time parameters of motion, symmetry of movements of the left and right limbs, and also stability of repetition of biomechanical movement pattern. The algorithm includes the following stages: 1) adaptive filtering of signals; 2) identification of movement phases; 3) calculation of spatial and time symmetry of left and right limbs; 4) analysis of the repetition stability of biomechanical movement pattern. The proposed algorithm was used to estimate the motor coordination potential of high-skilled athletes in long-distance running. The research made it possible to estimate individual features of work of each group of muscles for each sportsman while performing a test task with stepwisely increasing load on a running track. This approach is a tool to detect asymmetric work of paired muscle groups and of muscle groups with irrational workability. The proposed algorithm for the analysis of running kinematic characteristics can be used to develop new criteria for evaluating the effectiveness of solving a movement problem, as well as to assess the correctness of the movement technique and identify errors that can lead to injuries.

Keywords: biomechanics, inertial sensors, movement pattern, digital signal processing, statistical analysis.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Davydova N.S., Vasiuk V.E., Paramonova N.A., Mezhennaya M.M., Guseinov D.I. Algorithm for the analysis of kinematic characteristics of running. Doklady BGUIR. 2020; 18(8): 37-45.

Введение

Биомеханика двигательных действий решает вопросы создания биомеханических критериев оценки продуктивности выполнения движений, совершенствования техники двигательных действий, выявления корректности существующей техники и обнаружения критических ошибок, которые приводят к травмам [1].

Биомеханические методы изучения движений человека направлены на анализ процессов, лежащих в основе формирования двигательных действий. Они позволяют исследовать кинематические и динамические параметры движения [2].

Кинематические характеристики позволяют проводить анализ движений во времени и в пространстве. Они описываются пространственными, временными и пространственно-временными параметрами [3].

Сегодня все большую популярность для биомеханического анализа движений человека набирают устройства инерциального измерения (IMU – inertial measurement unit), основанные на МЭМС. К таким устройствам относятся акселерометр и гироскоп. При этом датчики ускорения (акселерометры) используются для измерения параметров поступательного движения, а датчики угловой скорости – для измерения параметров вращательного движения [4].

Бег используется для оценки физической работоспособности, выносливости, координационных способностей человека [5]. Данное движение является циклическим, при этом мышцы правых и левых конечностей должны активизироваться и расслабляться в противофазе (движение асимметричное).

В работе предлагается алгоритм анализа кинематических характеристик бега на основе сигналов гироскопа. Представленный алгоритм позволяет количественно оценить пространственные, временные и пространственно-временные параметры движения, симметрию движений левых и правых конечностей, а также стабильность повторения биомеханического паттерна движения.

Методика исследования

Регистрация многоканальных биомеханических сигналов осуществляется на основе инерциального метода определения положения и ориентации объекта. Для этого используются МЭМС-сенсоры гироскопов для измерения угловой скорости по величине силы Кориолиса. Данный подход позволяет анализировать кинематические характеристики движений [6].

Сигналы с инерциального гироскопа представляются в виде проекций вектора угловой скорости на связанные с объектом оси [7]. На рис. 1 представлен пример сигналов гироскопа для каждой оси локальной системы координат при исследовании беговых локомоций (датчик расположен на нижней конечности).

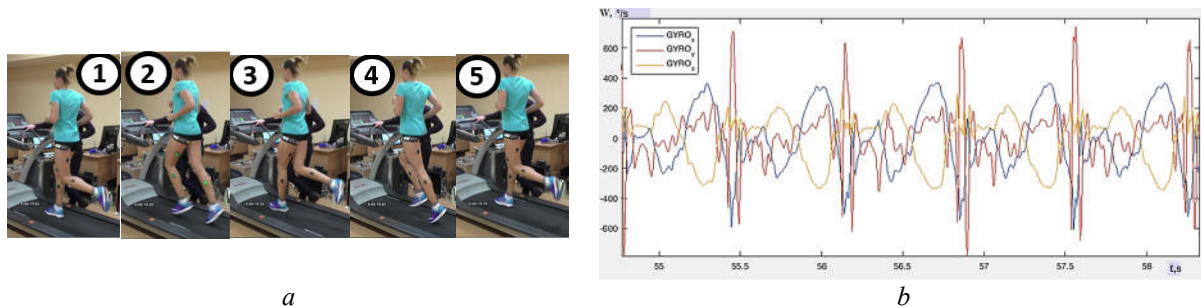


Рис. 1. Пример сигнала гироскопа (b) по трем осям координат при исследовании беговых локомоций (a)
Fig. 1. Example of gyroscope signals (b) across three axes of coordinates during the study of running locomotion (a)

Регистрация сигналов гироскопа осуществлялась с помощью беспроводной системы Trigno™ Wireless System (Delsys Inc., Бостон, США). Каждый датчик имеет встроенный трехосный гироскоп (частота дискретизации – 741 Гц, разрешение – 16 бит), дальность передачи – 20 м (TRIGNO Wireless System User’s Guide, 2013).

Сигналы гироскопа регистрировались с помощью программного обеспечения Delsys EMGWorks Acquisition. Для анализа данных в среде технических вычислений MATLAB было разработано программное обеспечение для автоматизированной оценки электромиографического и биомеханического паттерна движений (рис. 2), которое по формату и протоколу принимаемых данных (многоканальных электрографических сигналов и сигналов гироскопа) полностью соответствует технической системе Trigno™ Wireless System (<http://www.delsys.com/products/wireless-emg/trigno-lab/>).

В представленной работе предлагается алгоритм анализа кинематических характеристик бега на основе сигналов гироскопа. Алгоритм включает в себя следующие этапы:

1. Адаптивная фильтрация сигналов.
2. Определение фаз движения.
3. Расчет пространственно-временной симметрии левых и правых конечностей.
4. Анализ стабильности повторения биомеханического паттерна движения.

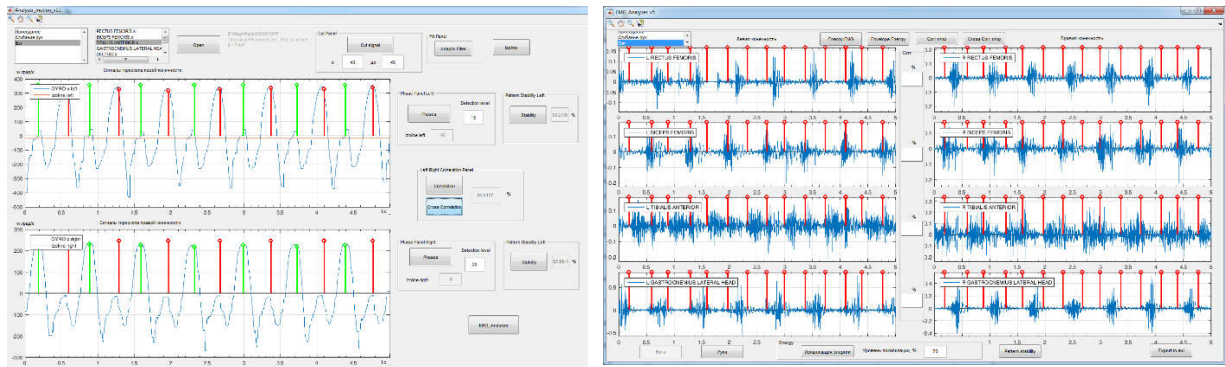


Рис. 2. Программное обеспечение для автоматизированной оценки электромиографического и биомеханического паттернов движений

Fig. 2. The software for automated estimation of electromyographic and biomechanical movement patterns

Адаптивная фильтрация сигналов

Для фильтрации сигналов инерциальных датчиков используется скользящий усредняющий (медианный) фильтр. Данный фильтр считается оптимальным для снижения случайного шума при сохранении резкости краев сигнала во временной области [8].

Медианный фильтр производит усреднение заданного количества точек из входного сигнала для расчета каждой точки в выходном сигнале:

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j], \quad (1)$$

где M – число усредняемых точек (окно фильтра), $x[i + j]$ – входной сигнал, $y[i]$ – выходной сигнал.

Ширина окна медианного фильтра выбирается динамически и зависит от периода движения. Период движения определяется на основании экстремумов автокорреляционной функции сигналов.

На рис. 3 показан пример фильтрации сигналов гироскопа при выполнении бега.



Рис. 3. Сигналы гироскопа для бега с применением адаптивного скользящего усредняющего фильтра

Fig. 3. Gyroscope signals for running using a sliding averaging filter

Определение фаз движения

Фазы движения определяются на основе анализа выбранных каналов гироскопа. В зависимости от типа движения, критериями выделения фаз могут быть локальные экстремумы сигнала (что соответствует изменению направления движения звена тела) либо пересечение сигнала с изолинией (что соответствует остановке звена тела человека в определенном положении).

На рис. 4 представлен пример выделения циклов движения на основании локальных экстремумов сигнала для бега на тредбане.

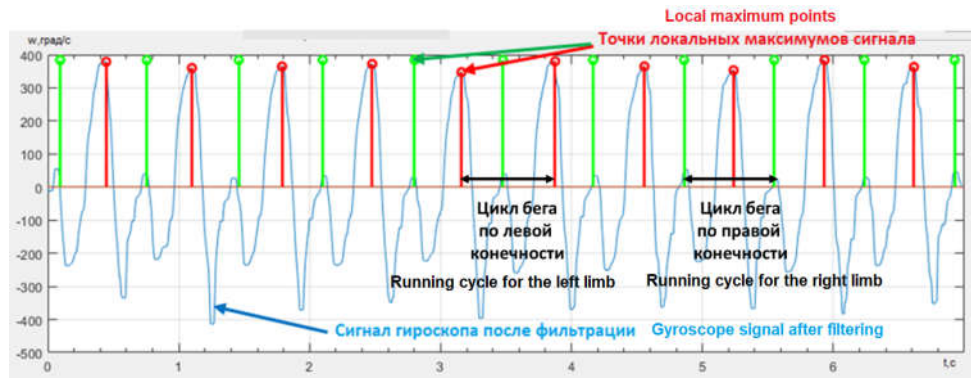


Рис. 4. Выделение циклов бега
Fig. 4. Running cycle detection

Расчет пространственно-временной симметрии левых и правых конечностей

Участие правого и левого полушария мозга в управлении движениями различно, что приводит к асимметрии в двигательных функциях левых и правых конечностей [9].

Для оценки пространственно-временной симметрии левых и правых конечностей при выполнении движений выполняется корреляционный анализ сигналов гироскопа разноименных конечностей. Такой анализ позволяет выявить асимметрию в двигательных функциях левых и правых конечностей.

Коэффициент взаимной корреляции двух сигналов рассчитывается по формулам (2), (3) [10].

$$\rho_{12}(j) = \frac{r_{12}(j)}{\frac{1}{N} \left[\sum_{n=0}^{N-1} x_1^2(n) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_2^2(n) \right]^{1/2}}, \quad (2)$$

где r_{12} – взаимная корреляция сигналов:

$$r_{12}(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n) \cdot x_2(n+j), \quad (3)$$

где $x_1(n)$ и $x_2(n)$ – цифровые сигналы, содержащие по N элементов, j – величина задержки, на которую сигнал $x_2(n)$ смещается относительно сигнала $x_1(n)$.

Коэффициент взаимной корреляции сигналов гироскопа разноименных конечностей позволяет оценить степень их пространственно-временной симметрии. При анализе перекрестных движений задержка j (задержка, на которую сигнал $x_2(n)$ смещается относительно сигнала $x_1(n)$) для расчета коэффициента взаимной корреляции равна $t_{\text{цикла}}/2$, так как движения разноименными конечностями выполняются в противофазе (рис. 5).

Анализ стабильности повторения биомеханического паттерна движения

Вариабельность биомеханических параметров движения указывает на увеличение затрачиваемой мышечной работы на стабилизацию двигательного паттерна [11]. Проблема оценки стабильности воспроизведения двигательного паттерна является актуальной для спорта и может быть решена на основе анализа значимых биомеханических параметров неоднократно повторяемого движения [2, 12].

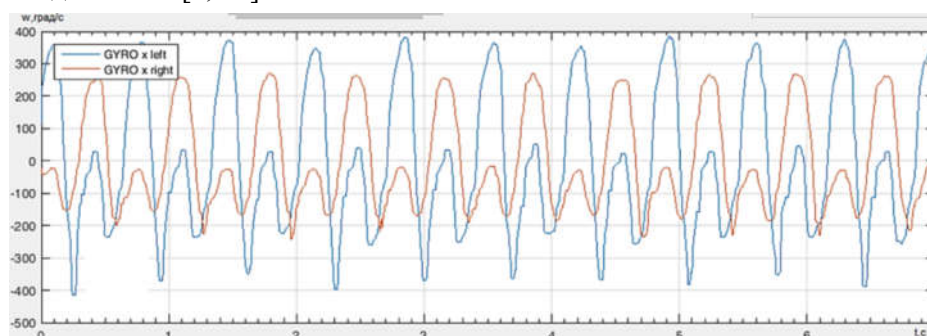


Рис. 5. Пример сигналов гироскопа разноименных конечностей для бега
Fig. 5. An example of gyroscope signals of different limbs for running

В представленной работе для оценки стабильности повторения биомеханического паттерна проводится анализ целевых сигналов гироскопа для неоднократно повторяемого исследуемого движения. В качестве параметров для анализа выбраны максимальная угловая скорость в фазах (ω^{\max}) и длительность фаз движения (t).

Коэффициент стабильности биомеханического паттерна рассчитывается в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Для каждой фазы движения определяется среднее значение максимальной угловой скорости W_f^{cp} (4) и длительности фазы T_f^{cp} (5) при неоднократном повторении движения.

$$W_f^{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_f^{i,\max}}{N}, \quad (4)$$

где N – количество попыток исследуемого движения, i – номер попытки, f – номер фазы движения, $\omega_f^{i,\max}$ – максимальная угловая скорость в f -й фазе рассматриваемого движения для i -й попытки.

$$T_f^{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_f^i}{N}, \quad (5)$$

где t_f^i – длительность f -й фазы рассматриваемого движения для i -й попытки.

2. Для каждой фазы движения рассчитывается среднеквадратическое отклонение максимальной угловой скорости σ_f^W (6) и длительности фазы σ_f^T (7) при неоднократном повторении движения

$$\sigma_f^W = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\omega_f^{i,\max} - W_f^{\text{cp}})^2}{N}}. \quad (6)$$

$$\sigma_f^T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_f^i - T_f^{\text{cp}})^2}{N}}. \quad (7)$$

Среднеквадратическое отклонение максимальной угловой скорости в фазах и длительности фаз движения характеризуют степень variability биомеханических параметров двигательного действия от раза к разу.

3. Для каждой фазы движения определяется коэффициент стабильности максимальной угловой скорости k_f^W (8) и коэффициент стабильности длительности фазы k_f^T (9).

$$k_f^W = \left(1 - \frac{\sigma_f^W}{W_f^{\text{cp}}}\right) \cdot 100 \%. \quad (8)$$

$$k_f^T = \left(1 - \frac{\sigma_f^T}{T_f^{\text{cp}}}\right) \cdot 100 \%. \quad (9)$$

Коэффициент стабильности максимальной угловой скорости в фазах и коэффициент стабильности длительности фаз движения характеризуют степень повторяемости биомеханических параметров двигательного действия от раза к разу.

4. Расчет коэффициента стабильности биомеханического паттерна.

Интегральный коэффициент стабильности биомеханического паттерна K рассчитывается как среднее значение всех полученных коэффициентов стабильности максимальной угловой скорости в фазах и коэффициентов стабильности длительности фаз движения по формуле (10).

$$K = \sum_{f=1}^F \frac{(k_f^W + k_f^T)}{2} / F, \quad (10)$$

где F – количество фаз движения.

Коэффициент стабильности биомеханического паттерна имеет значение в диапазоне 0...100 %.

Результаты

Научная работа выполнялась в рамках задания Государственной программы развития физической культуры и спорта в Республики Беларусь на 2016–2020 годы «Разработать методику оценки компонентов координационных способностей спортсменов на основе анализа биоэлектрической активности мышц в движениях со сложной двигательной структурой» (2019–2020, № ГР 20191858).

Предложенный алгоритм был использован для оценки двигательного-координационного потенциала высококвалифицированных представителей легкой атлетики в беге на длинные дистанции. Программа тестирования включала в себя выполнение задания на беговой дорожке со ступенчато повышающейся нагрузкой на 1 км/ч каждые 30 с, начиная со скорости 8 км/ч до 12 км/ч. Проведенное исследование позволило оценить индивидуальные особенности работы каждой группы мышц для каждого спортсмена при выполнении тестового задания со ступенчато повышающейся нагрузкой на беговой дорожке. Такой подход является наглядным инструментом для выявления асимметричной работы парных групп мышц, а также выявления групп мышц с нерациональной вработываемостью [13].

Заключение

В работе рассмотрен алгоритм анализа кинематических характеристик бега на основе сигналов гироскопа. Представленный алгоритм позволяет количественно оценить пространственные, временные и пространственно-временные параметры движения, симметрию движений левых и правых конечностей, а также стабильность повторения биомеханического паттерна движения. Предлагаемый алгоритм может быть использован для разработки новых критериев оценки эффективности решения двигательной задачи, а также оценки правильности выполнения техники движения и обнаружения критических ошибок, которые приводят к травмам.

Список литературы

1. Попов Г.И. *Биомеханика двигательной деятельности*. Москва: Академия; 2011.
2. McGinnis P.M. *Biomechanics of sport and exercise*. Human Kinetics; 2013.
3. Watkins J. *An introduction to biomechanics of sport and exercise*. London: Churchill Livingstone; 2007.
4. Khoshnoud F., de Silva C.W. Recent advances in MEMS sensor technology-mechanical applications. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2012;15:14-24.
5. Segers V. et al. Biomechanics of spontaneous overground walk-to-run transition. *Journal of Experimental Biology*. 2013;16:3047-3054.
6. Mayagoitia R.E., Nene A.V., Veltink P.H. Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems. *Journal of biomechanics*. 2002;35(4):537-542.
7. Looney M. The Basics of MEMS IMU/Gyroscope Alignment. *Analog Dialogue*. 2015;49:1-6.
8. Antoniou A. *Digital signal processing*. New York: McGraw-Hill; 2016.
9. Anshel M.H. *Sport psychology: From theory to practice*. B. Cummings; 2003.
10. Hu G.S. *Introduction to digital signal processing*. Beijing: Tsinghua University Press; 2005.
11. Жилев А.А. Биомеханическая диагностика оптимального выполнения циклических движений. *Теория и практика физической культуры*. 2001;10:41-43.

12. Давыдова Н.С., Осипов А.Н., Кульчицкий В.А., Давыдов М.В., Меженная М.М. Оценка варибельности двигательного навыка человека на основе электрофизиологических и биомеханических параметров движения. *Доклады БГУИР*. 2012;1(63):40-46.
13. Davydova N., Lukashevich D., Bykov D., Vasiuk V., Osipov A., Semeniuk A., Mezhennaya M., Davydov M. Amplitude-time analysis of biomechanical patterns of human motions. *Journal Engineering Science*. 2020;3:169-181.

References

1. Popov G.I. [*Motion biomechanics*]. Moscow: Akademiya; 2011. (In Russ.)
2. McGinnis P.M. *Biomechanics of sport and exercise*. Human Kinetics; 2013.
3. Watkins J. *An introduction to biomechanics of sport and exercise*. London: Churchill Livingstone; 2007.
4. Khoshnoud F., de Silva C.W. Recent advances in MEMS sensor technology-mechanical applications. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2012;15:14-24.
5. Segers V. et al. Biomechanics of spontaneous overground walk-to-run transition. *Journal of Experimental Biology*. 2013;16:3047-3054.
6. Mayagoitia R.E., Nene A.V., Veltink P.H. Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems. *Journal of biomechanics*. 2002;35(4):537-542.
7. Looney M. The Basics of MEMS IMU/Gyroscope Alignment. *Analog Dialogue*. 2015;49:1-6.
8. Antoniou A. *Digital signal processing*. New York: McGraw-Hill; 2016.
9. Anshel M.H. *Sport psychology: From theory to practice*. B. Cummings; 2003.
10. Hu G.S. *Introduction to digital signal processing*. Beijing: Tsinghua University Press; 2005.
11. Zhilyaev A.A. [Biomechanical diagnostics of optimal performance of cyclic movements]. *Theory and practice of physical culture*. 2001;10:41-43. (In Russ.)
12. Davydova N.S., Osipov A.N., Kulchitsky V.A., Davydov M.V., Mezhennaya M.M. [Estimation of human movement skill variability based on electrophysiological and biomechanical motion parameters]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2012;1(63):40-46. (In Russ.)
13. Davydova N., Lukashevich D., Bykov D., Vasiuk V., Osipov A., Semeniuk A., Mezhennaya M., Davydov M. Amplitude-time analysis of biomechanical patterns of human motions. *Journal Engineering Science*. 2020;3:169-181.

Вклад авторов

Давыдова Н.С., Меженная М.М. разработали алгоритм анализа кинематических характеристик бега.

Васюк В.Е. выполнил постановку научной проблематики и обобщение результатов исследования.

Парамонова Н.А. и Гусейнов Д.И. провели исследования.

Authors' contribution

Davydova N.S. and Mezhennaya M.M. developed an algorithm for analyzing the kinematic characteristics of running.

Vasiuk V.E. formulated scientific problems and generalized the results of the research.

Paramonova N.A. and Guseinov D.I. conducted the research.

Сведения об авторах

Давыдова Н.С., к.т.н, доцент, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Васюк В.Е., к.п.н, доцент, заведующий кафедрой спортивной инженерии Белорусского национального технического университета.

Парамонова Н.А., к.б.н., доцент, доцент кафедры спортивной инженерии Белорусского национального технического университета.

Information about the authors

Davydova N.S., PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Infocommunication Technologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Vasiuk V.E., PhD (Pedagogics), Associate Professor, Head of the Sports Engineering Department of the Belarusian National Technical University.

Paramonova N.A., PhD (Biology), Associate Professor, Associate Professor of the Sports Engineering Department of the Belarusian National Technical University.

Меженная М.М., к.т.н, доцент, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гусейнов Д.И., аспирант кафедры спортивной инженерии Белорусского национального технического университета.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь
г. Минск, ул. П. Бровка, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. + 375-29-312-49-90;
e-mail: davydova-ns@bsuir.by
Давыдова Надежда Сергеевна

Mezhennaya M.M., PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Engineering Psychology and Ergonomics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Guseinov D.I., PhD student of the Sports Engineering Department of the Belarusian National Technical University.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus
Minsk, P. Brovka str., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. + 375-29-312-49-90;
e-mail: davydova-ns@bsuir.by
Nadezhda Davydova