

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМПЕНСАЦИИ ДВИГАТЕЛЬНОЙ ОШИБКИ В АДАПТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В.И. Загревский<sup>1,2</sup>, О.И. Загревский<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Могилевский государственный университет имени А.А. Кулешова, г. Могилев, Республика Беларусь,

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия,

<sup>3</sup>Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

**Цель.** Разработать компьютерную программу моделирования движения объекта с заданными параметрами начального и конечного фазового состояния. **Материалы и методы.** Двигательная ошибка при выполнении спортивного упражнения является результатом отклонения в кинематическом состоянии спортсмена от параметров заданной программы движения. Математический аппарат адаптивного управления, основанный на использовании в математической структуре управляющей функции информации о текущих параметрах фазового состояния объекта движения, способен уменьшить рассогласование в параметрах программной и текущей траектории. В статье выдвигается и экспериментально подтверждается гипотеза о возможности компьютерного синтеза движений биомеханических систем с нейтрализацией двигательной ошибки на основе математического аппарата адаптивного управления. В проведенных вычислительных экспериментах математическое описание движения объекта основано на известном законе разомкнутого по времени сближения (А.П. Батенко, 1977), в котором требуется, чтобы и скорость, и координаты одновременно приняли бы заданные значения. Время движения в этом законе – неуправляемый параметр. Математическая модель объекта движения построена в форме системы дифференциальных уравнений первого порядка. **Результаты.** Математическая модель движения материальной точки с заданными значениями фазовых координат в начальный и конечный моменты времени реализована в компьютерной программе. Программа функционирует на базе интегрированной среды разработки Visual Studio Express 2013 в языковой среде Visual Basic 2010. Поддержка результатов моделирования обеспечивается числовой и графической информацией. **Заключение.** Разработанная компьютерная модель метода адаптивного управления реализует целевой результат движения и к конечному моменту времени нейтрализует рассогласование между текущим и программным кинематическим состоянием объекта. В модели спортивных упражнений результат нейтрализации проявляется в погашении двигательной ошибки.

**Ключевые слова:** техника упражнения, биомеханическая система, двигательная ошибка, управление, синтез движения.

**Введение.** Задача синтеза заключается в поиске и нахождении такой синтезирующей функции, при которой система удовлетворяла бы необходимым показателям качества и налагаемым на нее ограничениям [1, 3, 6, 7, 8, 12, 17]. Если текущее состояние объекта принимать за начальное и решать задачу оптимального управления непосредственно в процессе управления объектом, то величину синтезирующей функции можно вычислить [10, 13, 14, 15, 20]. Однако здесь возникает проблема нахождения такого математического выражения, которое будет описывать функциональную зависимость управления от текущего состояния объекта [10, 14, 16, 18, 19].

В работе А.П. Батенко [2] предложен достаточно простой, но эффективный метод синтеза управления с обратной связью. В этой связи мы выдвинули гипотезу о возможности использования предлагаемого метода в синтезе адаптивного управления в движениях биосистем.

За одну из возможных форм адаптивного управления можно принять разомкнутое управление [2]. Задача разомкнутого управления заключается в переводе объекта управления из начального фазового состояния  $[S_o, V_o]$  с заданной координатой  $[S_o]$  и скоростью  $[V_o]$  в конечное фазовое состояние  $[S_k, V_k]$  с заданной координатой  $[S_k]$  и скоростью  $[V_k]$ . Время

## Спортивная тренировка

движения  $[T_k]$  в разомкнутом управлении не регламентируется.

**Закон управления.** Для заданных условий задачи закон управления, в котором отсутствует время выполнения задачи, имеет вид [2]

$$u = \frac{V_k^2 - V_o^2}{2(S_k - S_o)}, \quad (1)$$

а движение объекта, осуществляемое по закону (1), описывается дифференциальным уравнением:

$$2 \frac{d^2 S}{dt^2} (S_k - S) + \left( \frac{dS}{dt} \right)^2 = V_k^2. \quad (2)$$

**Программное управление.** Решением (2) является функция

$$S = S_o + V_o t + \left( \frac{V_k^2 - V_o^2}{2(S_k - S_o)} \right) \frac{t^2}{2}. \quad (3)$$

Элементами первой и второй производной по  $t$  от  $S$  в уравнении (3) являются скорость ( $V$ ) и ускорение объекта ( $u$ )

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= V = V_o + \frac{V_k^2 - V_o^2}{2(S_k - S_o)} t, \\ \frac{d^2 S}{dt^2} &= u = \frac{V_k^2 - V_o^2}{2(S_k - S_o)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения (3, 4) суть заданного программного управления при наложенных условиях на начальное и конечное фазовое состояние объекта. Время движения ( $T_V$ ) не регламентируется, но определяется из выражения

$$T_V = \frac{2(S_k - S_o)}{V_k + V_o}. \quad (5)$$

Уравнения (3, 4) являются уравнениями программного управления, обеспечивающие перемещение объекта из начального фазового состояния  $[S_o, V_o]$  в конечное фазовое состояние  $[S_k, V_k]$ , в соответствии с заданным законом (1) изменения ускорения ( $u$ ).

**Адаптивное управление.** Задача возвращения объекта на заданную траекторию появляется в том случае, если заданное начальное фазовое состояние объекта по координате не соответствует параметрам заданного программного управления в начальный момент времени ( $t_o$ ). Такой ситуации в технической подготовке спортсмена соответствует двигательная ошибка упражнения, возникающая в процессе выполнения целевого упражнения [4, 5, 9, 11]. В этом случае необходимо синтезировать такое адаптивное управление, кото-

рое обеспечивает возврат объекта движения на программную траекторию.

Возвращение объекта движения на программную траекторию может быть достигнуто при условии, что адаптивное управление формируется на основе обратной связи, учитывающей информацию о текущем состоянии объекта по координате и скорости  $[S, V]$ . Закон управления с обратной связью может быть получен заменой в (1) начальных значений фазовых координат  $[S_o, V_o]$  их текущими значениями  $[S, V]$ :

$$u = \frac{V_k^2 - V^2}{2(S_k - S)}. \quad (6)$$

В работе [2] показано, что закон управления (6) можно привести к виду, в котором в синтезируемом управлении присутствует обратная связь по текущей координате ( $S$ ) и текущей скорости ( $V$ )

$$u = k_o + k_s S + k_v V^2. \quad (7)$$

Здесь коэффициенты  $k_o, k_s, k_v$  зависят от номера квадранта, в котором находится изображающая фазовая точка объекта:

$$\begin{aligned} k_o &= \frac{V_k^2 - V_o^2}{2(S_k - S_o)} \left( 1 - \frac{S_o}{\Delta S} \right) + \frac{V_o^2}{2\Delta S}, \\ k_s &= \frac{V_k^2 - V_o^2}{2\Delta S(S_k - S_o)}, k_v = -\frac{1}{2\Delta S}; \\ &\text{если квадрант I } (x > 0, y > 0); \\ k_o &= \frac{V_k^2 - V_o^2}{2(S_k - S_o)} \left( 1 - \frac{S_o}{\Delta S} \right) + \frac{V_k^2}{2\Delta S}, \\ k_s &= \frac{V_k^2 - V_o^2}{2\Delta S(S_k - S_o)}, k_v = -\frac{1}{2\Delta S}; \\ &\text{если квадрант II } (x < 0, y > 0); \\ k_o &= \frac{V_k^2 - V_o^2}{2(S_k - S_o)} \left( 1 + \frac{S_o}{\Delta S} \right) - \frac{V_o^2}{2\Delta S}, \\ k_s &= -\frac{V_k^2 - V_o^2}{2\Delta S(S_k - S_o)}, k_v = \frac{1}{2\Delta S}; \\ &\text{если квадрант III } (x < 0, y < 0); \\ k_o &= \frac{V_k^2 - V_o^2}{2(S_k - S_o)} \left( 1 + \frac{S_o}{\Delta S} \right) - \frac{V_k^2}{2\Delta S}, \\ k_s &= -\frac{V_k^2 - V_o^2}{2\Delta S(S_k - S_o)}, k_v = \frac{1}{2\Delta S}; \\ &\text{если квадрант IV } (x > 0, y < 0). \end{aligned} \quad (8)$$

Номеру квадранта соответствует местоположение фазовой точки, ограниченной ося-

ми  $(x, y)$  прямоугольной декартовой системы координат в соответствии с уравнениями (8).

**Вычислительный эксперимент.** На первом этапе вычислительных экспериментов рассматривалось движение материальной точки (кисть, стопа, общий центр масс тела спортсмена) под действием программного управления (1). На втором этапе рассматривалась возможность использования адаптивного

управления для компенсации двигательной ошибки и возвращения объекта движения на программную траекторию.

*Программное управление.* Исходные данные для *программной траектории* объекта движения: начальное фазовое состояние  $[S_o = 1,00 \text{ м}, V_o = -1,0 \text{ м/с}]$ , конечное фазовое состояние  $[S_k = 0 \text{ м}, V_k = 0 \text{ м/с}]$ . Пусть  $\Delta S = 0,05 \text{ м}$ . Тогда время движения равно

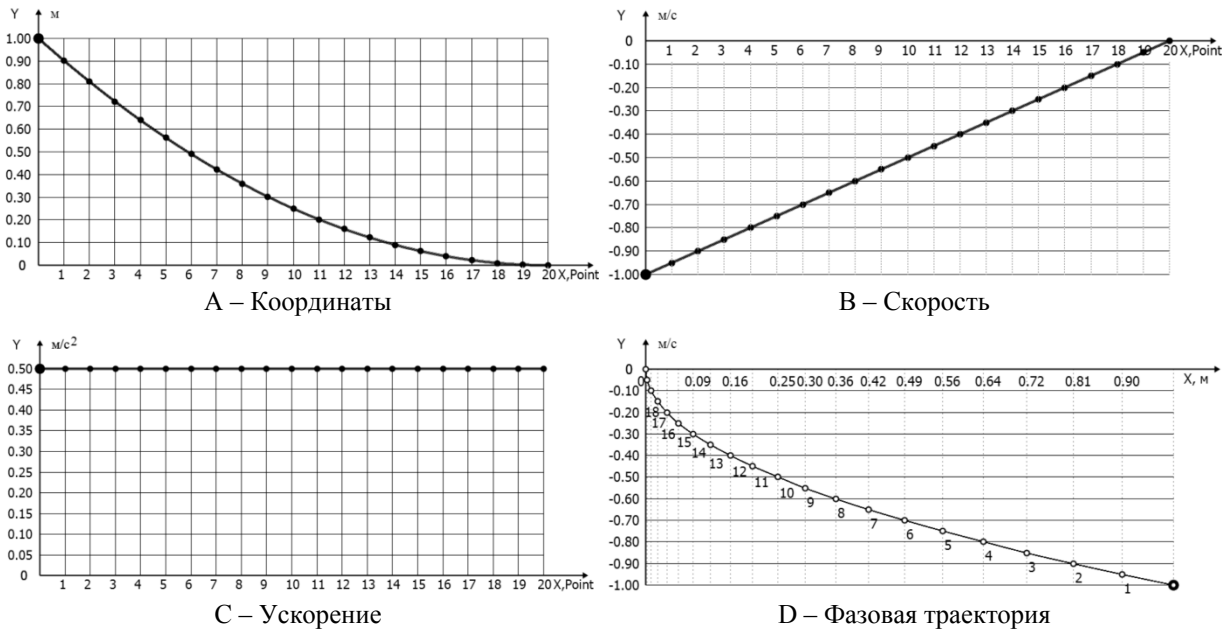


Рис. 1. Элементы программной траектории (A, B, D) и программного управления (C)  
Fig. 1. Program trajectory (A, B, D) and program control (C) elements

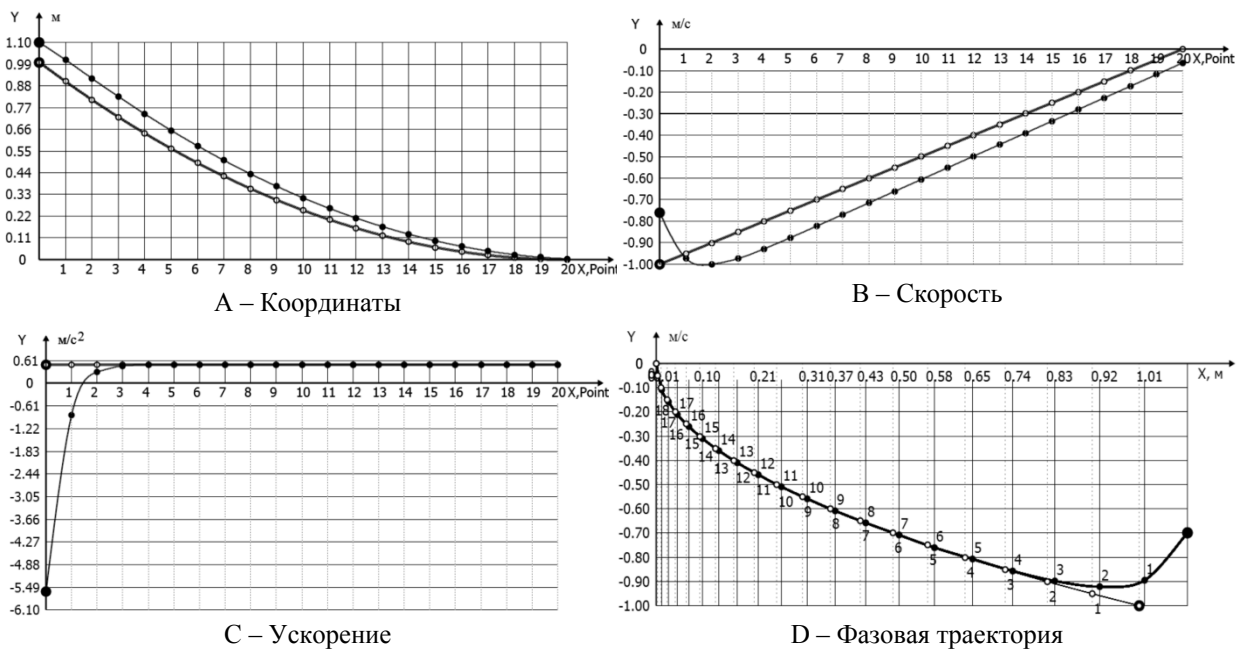


Рис. 2. Элементы программной траектории (—; A, B, D) и программного управления (—; C), адаптивной траектории (---; A, B, D) и адаптивного управления (---; C)  
Fig. 2. Program trajectory (—; A, B, D), program control (—; C), adaptive trajectory (---; A, B, D), and adaptive control (---; C) elements

2,0 с, что следует из (5). Программная траектория и ее элементы, реализующие поставленную задачу, показаны на рис. 1.

Временная длительность движения поделена на 20 точек (рис. 1). Шаг выдачи результатов вычислений – 0,1 с, шаг интегрирования – 0,001 с. По условиям поставленной задачи коэффициенты закона управления (7) из формульных зависимостей (8) будут рассчитываться для IV квадранта. Закон управления принимает вид:  $u = 0,5 - 10S + 10V^2$ .

**Адаптивное управление.** Двигательная ошибка, характеризующая отклонение объекта движения от начального состояния, задавалась списком [ $S_0 = 1,10$  м,  $V_0 = -0,70$  м/с]. В соответствии с условиями задачи конечное фазовое состояние объекта задано в виде: [ $S_k = 0$  м,  $V_k = 0$  м/с].

Координаты объекта ( $S$ ) и скорость ( $V$ ) вычислялись численным интегрированием системы уравнений:

$$\begin{cases} \dot{V} = u, \\ \dot{S} = V. \end{cases}$$

Результаты вычислительного эксперимента с использованием адаптивного управления, корректирующего отклонения от программной траектории, приведены на рис. 2.

### Выводы

1. Программное управление с постоянным ускорением реализует задачу приведения объекта из начального заданного фазового состояния в требуемое конечное фазовое состояние.

2. Адаптивное управление выполняет задачу нейтрализации двигательной ошибки и приводит объект движения в конечный момент времени в заданную точку пространства.

3. Полная компенсация двигательной ошибки по скорости не достигается, и в конечный момент времени достигнутая скорость не соответствует заданной.

### Литература

1. Андреев, А.С. О стабилизации программных движений голономной механической системы / А.С. Андреев, О.А. Перегудова // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 1840–1843.

2. Батенко, А.П. Управление конечным состоянием движущихся объектов / А.П. Батенко. – М.: Сов. радио, 1977. – 256 с.

3. Борисов, О.И. Методы управления робототехническими приложениями: учеб. пособие / О.И. Борисов, В.С. Громов, А.А. Пыркин. – СПб.: Ун-т ИТМО, 2016. – 108 с.

4. Гавердовский, Ю.К. Обучение спортивным упражнениям. Биомеханика. Методология. Дидактика / Ю.К. Гавердовский. – М.: Физкультура и Спорт, 2007. – 912 с.

5. Горячева, Н.Л. Двигательные ошибки в спорте: учеб.-метод. пособие / Н.Л. Горячева. – Волгоград: ВГАФК, 2017. – 64 с.

6. Грибков, В.А. Устойчивость тройного физического маятника из статьи академика В.Н. Челомея 1983 г. / В.А. Грибков, А.О. Хохлов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2015. – № 6. – С. 33–49.

7. Грибков, В.А. Экспериментальное исследование устойчивости обращенных стабилизируемых маятников / В.А. Грибков, А.О. Хохлов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». – 2017. – № 2. – С. 22–39.

8. Дыда, А.А. Решение обратной задачи кинематики для манипуляционного робота методом штрафных функций / А.А. Дыда, Д.А. Оськин // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11-4. – С. 673–677.

9. Евсеев, С.П. Формирование двигательных действий в гимнастике с помощью тренажеров: учеб. пособие / С.П. Евсеев. – Л.: Изд-во ГДОИФК им. П.Ф. Лесгафта, 1987. – 91 с.

10. Забихифар, С.Х. Управление двухзвенным манипулятором с использованием нечеткого управления скользящего типа / С.Х. Забихифар, А.Х.Д. Маркази, А.С. Юценко // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2015. – № 6. – С. 30–45.

11. Загrevская, А.И. Психомоторные особенности детей старшего дошкольного возраста / А.И. Загrevская, В.С. Сосуновский, Т.Н. Зальмеж // Психологическая наука и образование. – 2018. – Т. 23. – № 5. – С. 13–21.

12. Кулаков, П.А. Задача построения модели адаптивного регулятора на примере нефтехимической установки / П.А. Кулаков // Наука и современность. – 2015. – № 2 (4). – С. 81–88.

13. Поляхов, Н.Д. Управление перевернутым двухзвенным маятником / Н.Д. Поляхов, Р.И. Галиулин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2015. – № 6. – С. 65–69.

14. Фу, К. Робототехника: пер с англ. / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Лу. – М.: Мир, 1989. – 624 с.

15. Хомченко, В.Г. Мехатронные и робототехнические системы / В.Г. Хомченко, В.Ю. Соломин. – Омск: ОмГТУ, 2008. – 160 с.

16. *Dynanic analysis of two link robot manipulator for control design using computed torque control* / J. Shan, S.S. Rattan, B.C. Nakra // *International Journal of Research in Computer Applications and Robotics*. – 2015. – Vol. 3. – P. 52–59.

17. *Neural network feedback control with guaranteed stability* / F.L. Lewis, T. Partisini //

*Int. J. Control*. – 1998. – Vol. 70 (3). – P. 337–345.

18. *Optimal trajectories of curvature constrained motion in the Hamilton–Jacobi formulation* / R. Takei, R. Tsai // *J. Sci. Comp.* – 2013. – Vol. 54, no. 2-3. – P. 622–644. DOI: 10.1007/s10915-012-9671-y

19. *Reconstruction of 3D Models from 2D Orthographic Views Solid Extrusion and Revolution* / A. Cicec, M. Gulesin // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2004. – Vol. 152. – P. 291–298.

20. *Robot modeling and control* / M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar. – Wiley New York, 2006. – 496 p.

**Загrevский Валерий Иннокентьевич**, доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры теории и методики физического воспитания, Могилевский государственный университет имени А.А. Кулешова. 212022, Республика Беларусь, г. Могилев, ул. Космонавтов, 1; профессор кафедры гимнастики и спортивных игр, Национальный исследовательский Томский государственный университет. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: zvi@tut.by, ORCID: 0000-0002-2128-6066.

**Загrevский Олег Иннокентьевич**, доктор педагогических наук, профессор, научный руководитель института физической культуры, Тюменский государственный университет. 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6; профессор кафедры гимнастики и спортивных игр, Национальный исследовательский Томский государственный университет. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: O.Zagrevsky@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1758-6592.

Поступила в редакцию 17 апреля 2019 г.

DOI: 10.14529/hsm190210

## ANALYTICAL MODEL FOR COMPENSATING MOTION ERROR IN THE ADAPTIVE MOTION CONTROL OF THE BIOMECHANICAL SYSTEM

V.I. Zagrevskiy<sup>1,2</sup>, zvi@tut.by, ORCID: 0000-0002-2128-6066,

O.I. Zagrevskiy<sup>2,3</sup>, O.Zagrevsky@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1758-6592

<sup>1</sup>Mogilev State University named after A.A. Kuleshov, Mogilev, Republic of Belarus,

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation,

<sup>3</sup>Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation

**Aim.** The article deals with developing software to simulate the motion of an object with the given parameters of initial and final phase status. **Materials and methods.** A motion error in sports exercise is the result of kinematic deviation from the parameters of a given motion program. The mathematical apparatus of adaptive control allows neutralizing motion mistakes between a program and a real trajectory. It is based on utilising the information about current parameters of a phase status of a moving object in a mathematical structure of the control function. The article proposes and experimentally proves the hypothesis about the computer synthesis of motions in biomechanical systems based on the mathematical apparatus of adaptive control. In the computational experiments, a mathematical description of an object is based on a well-established law of open-time approximation (A.P. Batenko, 1977), which requires that both velocity and coordinates simultaneously take the given values. Motion time in this law is an uncontrolled

parameter. The mathematical model of a moving object is built as a system of a first-order differential equation. **Results.** A mathematical model describing the motion of a material point with given phase coordinates at the initial and final points in time is implemented in a computer program. The program works based on the integrated development environment Visual Studio Express 2013 and the Visual Basic 2010 language environment. **Conclusion.** The developed computer model of adaptive control achieves the aim of any motion, which implies transferring an object from a given initial state to the required final state.

**Keywords:** exercise technique, biomechanical system, motion error, control, motion synthesis.

### References

1. Andreyev A.S., Peregudova O.A. [On Stabilization of Software Motions of the Holonomic Mechanical System]. *XII Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU* [XII All-Russian Meeting on the Problems of Management of the All-Union Main Alert Service of Ukraine], 2014, pp. 1840–1843. (in Russ.)
2. Batenko A.P. *Upravleniye konechnym sostoyaniyem dvizhushchikhsya ob'yektov* [Management of the Final State of Moving Objects]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1977. 256 p.
3. Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkin A.A. *Metody upravleniya robototekhnicheskimi prilozheniyami. Uchebnoye posobiye* [Methods for Managing Robotic Applications]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2016. 108 p.
4. Gaverdovskiy Yu.K. *Obucheniye sportivnym uprazhneniyam. Biomekhanika. Metodologiya. Didaktika* [Training in Sports Exercises. Biomechanics. Methodology. Didactics]. Moscow, Physical Culture and Sport Publ., 2007. 912 p.
5. Goryacheva N.L. *Dvigatel'nyye oshibki v sporte: uchebno-metodicheskoye posobiye* [Motoristic Mistakes in Sport]. Volgograd, VGAFK Publ., 2017. 64 p.
6. Gribkov V.A., Khokhlov A.O. [Stability of a Triple Physical Pendulum from an Article by Academician V.N. Chelomey 1983]. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye* [Vestnik of Moscow State Technical University Named after N.E. Bauman. Ser. Engineering], 2015, no. 6, pp. 33–49. (in Russ.)
7. Gribkov V.A., Khokhlov A.O. [Experimental Study of the Stability of Inverted Stabilized Pendulums]. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Seriya Estestvennyye nauki* [Vestnik of Moscow State Technical University Named after N.E. Bauman. Ser. Natural Sciences], 2017, no. 2, pp. 22–39. (in Russ.)
8. Dyda A.A., Os'kin D.A. [Solution of the Inverse Kinematics Problem for a Manipulation Robot Using the Penalty Function Method]. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental Research], 2015, no. 11–4, pp. 673–677. (in Russ.)
9. Evseyev S.P. *Formirovaniye dvigatel'nykh deystviy v gimnastike s pomoshch'yu trenazherov. Uchebnoye posobiye* [The Formation of Motor Actions in Gymnastics with the Help of Simulators]. Leningrad, GDOIFK them. P.F. Lesgaft Publ., 1987. 91 p.
10. Zabikhifar S.Kh., Markazi A.Kh.D., Yushchenko A.S. [Control of a Two-Stage Manipulator Using Fuzzy Sliding-Type Control]. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Seriya Priborostroyeniye* [Bulletin of Moscow State Technical University Named after N.E. Bauman. Instrument Making Series], 2015, no. 6, pp. 30–45. (in Russ.)
11. Zagrevskaya A.I., Sosunovskiy V.S., Zal'mezh T.N. [Psychomotor Features of Children of Preschool Age]. *Psikhologicheskaya nauka i obrazovaniye* [Psychological Science and Education], 2018, vol. 23, no. 5, pp. 13–21. (in Russ.) DOI: 10.17759/pse.2018230502
12. Kulakov P.A. [The Task of Building a Model of an Adaptive Controller on the Example of a Petrochemical Plant]. *Nauka i sovremennost'* [Science and Modernity], 2015, no. 2 (4), pp. 81–88. (in Russ.) DOI: 10.17117/ns.2015.02.081
13. Polyakhov N.D., Galiulin R.I. [Control of an Inverted Two-Link Pendulum]. *Izvestiya SPBGETU "LETI"* [Proceedings of St. Petersburg Electrotechnical University LETI], 2015, no. 6, pp. 65–69. (in Russ.)
14. Fu K., Gonsales R., Li K. *Robototekhnika* [Robotics], russian translation. Moscow, World Publ., 1989. 624 p.

15. Khomchenko V.G., Solomin V.Yu. *Mekhatronnyye i robototekhnicheskiye systemy* [Mechatronic and Robotic Systems]. Omsk, OmGTU Publ., 2008. 160 p.
16. Shan J., Rattan S.S., Nakra B.C. Dynamic Analysis of Two Link Robot Manipulator for Control Design Using Computed Torque Control. *International Journal of Research in Computer Applications and Robotics*, 2015, vol. 3, pp. 52–59.
17. Lewis F.L., Partisini T. Neural Network Feedback Control with Guaranteed Stability. *Int. J. Control.*, 1998, vol. 70 (3), pp. 337–345. DOI: 10.1080/002071798222262
18. Takei R., Tsai R. Optimal Trajectories of Curvature Constrained Motion in the Hamilton–Jacobi Formulation. *J. Sci. Comp.*, 2013, vol. 54, no. 2–3, pp. 622–644. DOI: 10.1007/s10915-012-9671-y
19. Cicec A., Gulesin M. Reconstruction of 3D Models from 2D Orthographic Views Solid Extrusion and Revolution. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 152, pp. 291–298. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.368
20. Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M. *Robot Modeling and Control*. Wiley New York, 2006. 496 p.

*Received 17 April 2019*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Аналитическая модель компенсации двигательной ошибки в адаптивном управлении движением биомеханической системы / В.И. Загrevский, О.И. Загrevский // Человек. Спорт. Медицина. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 79–85. DOI: 10.14529/hsm190210

#### FOR CITATION

Zagrevskiy V.I., Zagrevskiy O.I. Analytical Model for Compensating Motion Error in the Adaptive Motion Control of the Biomechanical System. *Human. Sport. Medicine*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 79–85. (in Russ.) DOI: 10.14529/hsm190210

---