

УДК 62-503.5

ДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ АППАРАТА ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА ПОСЛЕ ТРАВМ ПРИ ДИСКРЕТНОМ УПРАВЛЕНИИ

Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Понедельченко М.С.

ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», Курск, e-mail: makss-88@mail.ru

В работе предлагается решение проблемы управления движением аппарата для реабилитации нижних конечностей человека после травм. Предлагается использование цифрового управления устройством, что приводит к появлению дискретного движения механизма. Предложена конструкция аппарата, оснащенного тремя активными шарнирами, позволяющая осуществлять реабилитационные мероприятия в различных режимах работы. Описан принцип работы устройства и приведена система автоматического управления, представляющая собой многоуровневую систему, выбор которой обусловлен необходимостью предотвращения возможных травм пациента при выполнении упражнений на устройстве. Предложена математическая модель объекта, включающая в себя описание принципа работы и конструкции устройства, которая позволяет выявить закономерности движения аппарата. Результаты численного моделирования позволили определить параметры дискретизации управляющего сигнала, помогающие получить заданные законы движения.

Ключевые слова: аппарат для реабилитации нижних конечностей, трехзвенник, активные шарниры, дискретное управление

THE DYNAMIC FEATURES OF THE MOTION OF THE DEVICE FOR THE REHABILITATION OF THE LOWER EXTREMITIES OF A PERSON AFTER TRAUMAS AT DISCRETE CONTROL

Jatsun S.F., Loktionova O.G., Ponedelchenko M.S.

Southwest State University, Kursk, e-mail: makss-88@mail.ru

The paper proposes a solution to the problem of control motion device for the rehabilitation of the lower extremities of a person after injuries. The use of digital control device leads to the appearance of discrete motion mechanism. The article presents the design of a device equipped with three active joints, allowing to carry out rehabilitation measures in different modes. The paper presents a principle of job of the device and the system of automatic control. Automatic control system is a multilevel system. The choice of such a system driven by the need to prevent possible injury of a patient while performing the exercises on the device. The paper presents a mathematical model of the object, which includes a description of the operating principle and design of the device, which allows to reveal the laws of motion of the device. Results of numerical modeling allow to determine the parameters of a discretization of the control signal, allowing to obtain the specified laws of motion.

Keywords: device for rehabilitation of the lower extremities of the person, active joints, discrete control

В настоящее время во всем мире активно практикуется метод реабилитации, основанный на использовании физических упражнений в лечебных целях с помощью специальных аппаратов и приборов. Этот метод называется «Механотерапия», целью его является улучшение подвижности в суставе, восстановление максимально возможного объема движений в нем, тренировка мышц, улучшение кровообращения и микроциркуляции в тканях сустава [2].

Одним из главных направлений в реабилитации является разработка суставов. Существует большое количество различных тренажеров, методов и реабилитационных систем, которые позволяют заниматься реабилитацией конечностей, при этом управление аппаратами для разработки суставов максимально упрощено и не требует специальных знаний [4; 6; 7; 8; 9]. В настоящее время наибольшее распространение получили двухзвенные системы с одним активным шарниром. Такие устройства имеют ограниченные функциональные возможности, с целью их расширения появились трехзвенные конструкции аппаратов с несколькими активными шарнирами. Трех-

звенная система может иметь пассивный коленный шарнир и голеностопный шарнир, перемещающийся поступательно.

В большинстве случаев тренажеры представляют собой системы для пассивной реабилитации, которые лишь сгибают и разгибают сустав в пределах заданного угла. При этом недостаточное внимание уделяется разработке и исследованию аппаратов, воздействующих на нужные группы мышц в определенные фазы движения сустава, тем самым навязывается правильный стереотип ходьбы и тренируются мышцы, необходимые для правильной походки. В данной статье рассматривается исследование заданного движения трехзвенного механизма с активными тазобедренным, коленным и голеностопным суставами, работа которого осуществляется в сопряжении с основными принципами движения нижней конечности человека. Применение таких активных элементов существенно повышает эффективность реабилитационных мероприятий.

Переход к цифровому управлению приводит к появлению дискретного управляемого движения механизма. **Целью данного исследования** является изучение закономерностей

дискретного управляемого движения трехзвенного механизма с тремя активными шарнирами. Для достижения поставленной цели необходимо разработать математическую модель движения трехзвенника, получить результаты исследования, провести сравнительный анализ с экспериментальными данными.

Описание трехзвенного механизма

В работе рассматривается устройство для реабилитации нижних конечностей человека после травм, которое состоит из неподвижного основания 1, стола 2, штанг 3–5, соединенных между собой приводами вращательного движения 6–8, фиксаторов 9–13, которые фиксируют ногу человека, привода вращательного движения 14, для регулировки положения тела, червячного редуктора 15.

Устройство работает следующим образом.

Нога человека удерживается в механизме фиксаторами 9–13. Приводом 14 регулируется угол наклона тела пациента. Приводы 6–8 передают движение ноге пациента.

Переход к цифровому управлению приводит к появлению дискретного управляемого движения механизма.

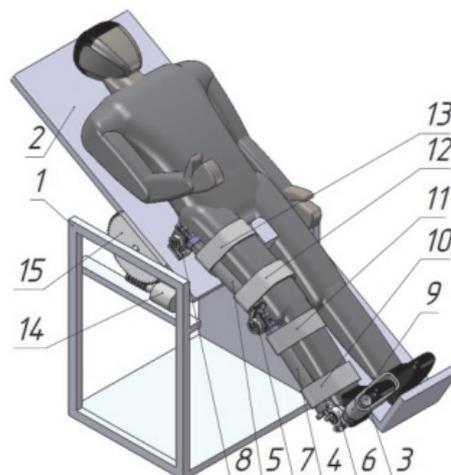


Рис. 1. Конструкция аппарата для реабилитации нижних конечностей человека после травм

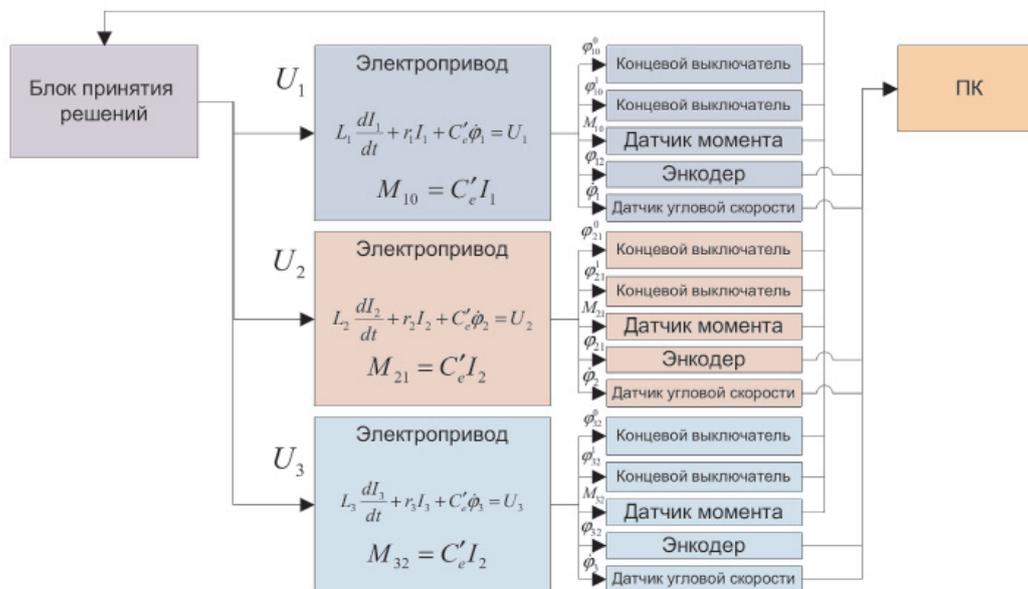


Рис. 2. Система автоматического управления аппаратом для реабилитации нижних конечностей человека после травм

Для устройства разработана система автоматического управления, которая представляет собой комплекс, включающий в себя:

- 1) пары концевых датчиков, датчиков моментов, датчиков угловых скоростей, датчиков углов поворота;
- 2) блок электроприводов;
- 3) блок принятия решений;
- 4) персональный компьютер.

Предложенная система управления устройством построена на базе микроконтроллеров серии Atmega, которые реализуют алгоритмы цифрового компаратора и интеллектуального регулятора. Пары кон-

цевых выключателей образуют релейную систему управления, направленную на повышение безопасности конструкции. Выбор такой многоканальной системы управления обусловлен необходимостью предотвращения возможных травм пациента при выполнении упражнений на устройстве.

Моделирование движения трехзвенного механизма

Исследуем режим работы трехзвенного механизма, при котором шарнир O_3 движется поступательно. Такой принцип движения используется во многих существующих аппаратах для разработки суставов [1; 4].

Для получения результатов математического моделирования будем использовать следующую систему дифференциальных уравнений, описывающих движение рассматриваемого механизма [9]:

$$\left. \begin{aligned}
 & \left(\ddot{\phi}_1 \left(J_1 + \frac{1}{4} m_2 l_1^2 + \frac{1}{4} m_3 l_1^2 - \frac{l_1^2}{4} (m_2 + m_3) (\sin^2 \phi_1 - 1) \right) + \right. \\
 & \quad + \ddot{\phi}_2 \left(\frac{1}{2} m_2 + m_3 \right) \frac{l_1 l_2}{2} \cos(\phi_1 - \phi_2) + \\
 & \quad + \ddot{\phi}_3 m_3 \frac{l_1 l_3}{4} \cos(\phi_1 - \phi_3) - \\
 & \quad - \frac{l_1^2}{4} (m_2 + m_3) \dot{\phi}_1^2 \sin 2\phi_1 + \\
 & \quad + \dot{\phi}_2^2 \left(\frac{1}{2} m_2 + m_3 \right) \frac{l_1 l_2}{2} \sin(\phi_1 - \phi_2) + \\
 & \quad \left. + \dot{\phi}_3^2 m_3 \frac{l_1 l_3}{4} \sin(\phi_1 - \phi_3) \right) = \begin{pmatrix} M_{10} - m_1 g \frac{l_1}{2} \cos \phi_1 - \\ -m_2 g l_1 \cos \phi_1 - \\ -m_3 g l_1 \cos \phi_1 \end{pmatrix} \\
 \\
 & \left(\ddot{\phi}_2 \left(J_2 + \frac{1}{4} m_2 l_2^2 + m_3 l_2^2 - \frac{l_2^2}{4} (m_2 + 2m_3) \cos 2\phi_2 \right) + \right. \\
 & \quad + \ddot{\phi}_1 \left(\frac{1}{2} m_2 + m_3 \right) \frac{l_1 l_2}{2} \cos(\phi_1 - \phi_2) + \\
 & \quad + \ddot{\phi}_3 m_3 \frac{l_2 l_3}{2} \cos(\phi_2 - \phi_3) + \\
 & \quad + \frac{l_2}{4} (m_2 + 2m_3) \dot{\phi}_1^2 (2\sin(\phi_1 + \phi_2)) + \\
 & \quad + l_2 \sin 2\phi_2 \dot{\phi}_2^2 - 2\ddot{\phi}_1 l_1 \cos(\phi_1 + \phi_2) + \\
 & \quad \left. + \dot{\phi}_3^2 m_3 \frac{l_2 l_3}{2} \sin(\phi_2 - \phi_3) \right) = \begin{pmatrix} M_{21} - m_2 g \frac{l_2}{2} \cos \phi_2 - \\ -m_3 g l_2 \cos \phi_2 \end{pmatrix} \quad (1) \\
 \\
 & \left(\ddot{\phi}_3 \left(J_3 + \frac{1}{4} m_3 l_3^2 + m_3 l_3^2 - \frac{l_3^2}{4} m_3 \cos 2\phi_3 \right) + \right. \\
 & \quad + \ddot{\phi}_2 m_3 \frac{l_2 l_3}{2} \cos(\phi_2 - \phi_3) + \\
 & \quad + \ddot{\phi}_1 m_3 \frac{l_1 l_3}{4} \cos(\phi_1 - \phi_3) + \\
 & \quad + \frac{l_3}{4} m_3 (2l_1 \dot{\phi}_1^2 \sin(\phi_3 + \phi_1) + 2l_2 \sin(\phi_2 + \phi_3) \dot{\phi}_2^2 + \\
 & \quad + l_3 \sin 2\phi_3 \dot{\phi}_3^2 - 2\ddot{\phi}_1 l_1 \cos(\phi_1 + \phi_3) - 2\ddot{\phi}_2 l_2 \cos(\phi_2 + \phi_3)) + \\
 & \quad + \dot{\phi}_1^2 m_3 \frac{l_1 l_3}{4} \sin(\phi_3 - \phi_1) + \\
 & \quad \left. + \dot{\phi}_2^2 m_3 \frac{l_2 l_3}{2} \sin(\phi_3 - \phi_2) \right) = \begin{pmatrix} -M_{32} + m_3 g \frac{l_3}{2} \cos \phi_3 \end{pmatrix}
 \end{aligned}
 \right\}$$

В САУ аппаратом энкодеры измеряют относительные углы, определяемые по формулам $\varphi_{10} = \varphi_1 - \varphi_0$, $\varphi_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$, $\varphi_{32} = \varphi_3 - \varphi_2$.

Для получения временных зависимостей крутящих моментов зададим законы изменения абсолютных углов звеньев:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= -\frac{\pi}{12} \cos \pi t; & \varphi_2 &= \frac{\pi}{12} \cos \pi t; \\ \varphi_3 &= \frac{\pi}{500} \cos \pi t. \end{aligned} \quad (2)$$

Углы φ_i изменяются в диапазоне $\varphi_i^1 \leq \varphi_i \leq \varphi_i^2$.

φ_i^1, φ_i^2 – это предельные значения соответствующих углов.

В результате расчетов получены временные характеристики идеальных управляющих моментов, точно обеспечивающих заданные законы изменения абсолютных углов звеньев механизмах (2).

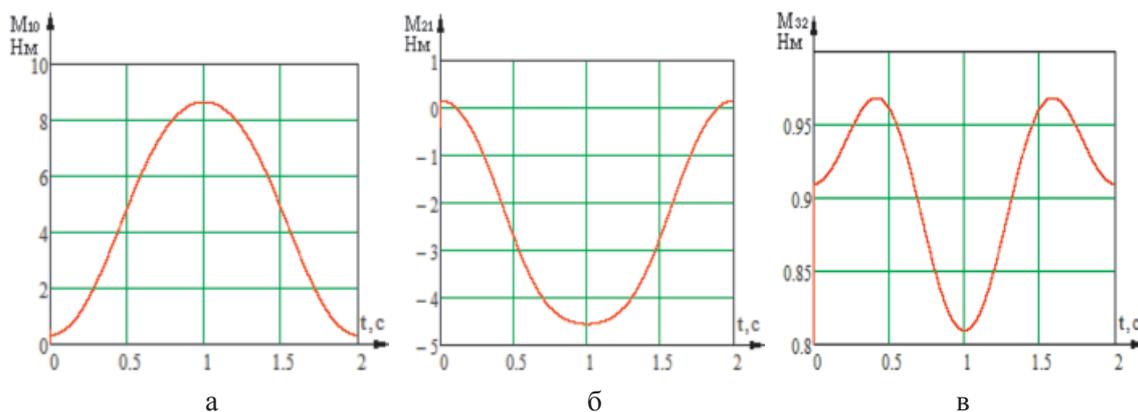


Рис. 3. Временные характеристики изменения идеальных моментов звеньев системы: а – временная характеристика изменения момента M_{10} звена 1; б – временная характеристика изменения момента M_{21} звена 2; в – временная характеристика изменения момента M_{32} звена 3

Для осуществления цифрового (дискретного) управления трехзвенным механизмом посредством полученных моментов, зададим их ступенчато, причем время

дискретизации будем изменять в диапазоне $0,005 \leq \Delta t \leq 0,05$ с. Получим следующие зависимости изменения углов звеньев от времени:

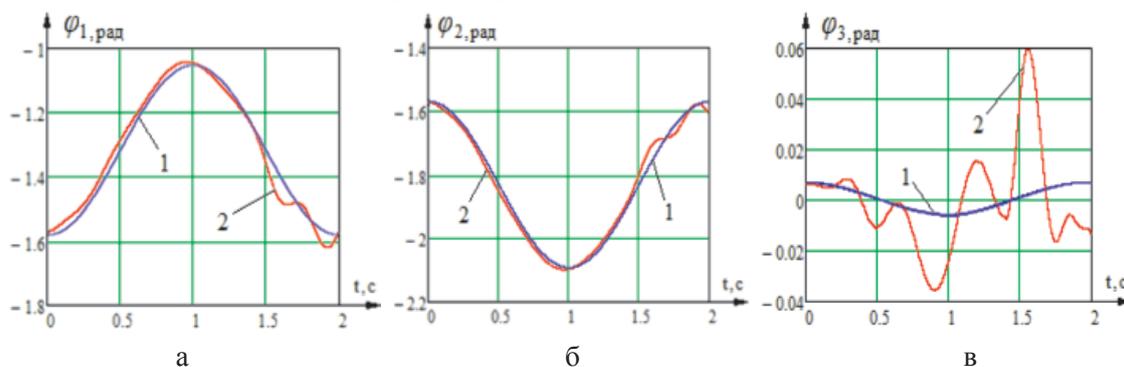


Рис. 4. Временные диаграммы изменения углов звеньев системы при подаче моментов M_{10}, M_{21}, M_{32} : 1 – идеальная характеристика, 2 – полученная при подаче момента M_{10} с шагом дискретизации $\Delta t = 0,05$ с; а – диаграмма изменения угла φ_1 звена 1; б – диаграмма изменения угла φ_2 звена 2; в – диаграмма изменения угла φ_3 звена 3

Как видно из графиков рис. 3, при подаче такого вида сигнала звенья системы не выходят на заданные углы (максимальная абсолютная ошибка угла φ_1 составляет $\xi_1 = 5,8\%$, для угла $\varphi_2 - \xi_2 = 5,7\%$), особенно значительны отклонения угла φ_3 ($\xi_3 = 99\%$), а также имеют место колебательные процессы, которые недопустимы при проектировании такого рода механизмов.

Попробуем улучшить результат, подавая моменты со временем дискретизации $\Delta t = 0,025$ с.

Подавая таким образом моменты, мы получили диаграммы изменения углов звеньев 1 и 2, которые соответствуют заданным законам, угол звена 3 при $\Delta t = 0,025$ с имеет нестабильный колебательный характер и требует уменьшения периода дискретизации управляющих моментов до $\Delta t = 0,005$ с (рис. 5).

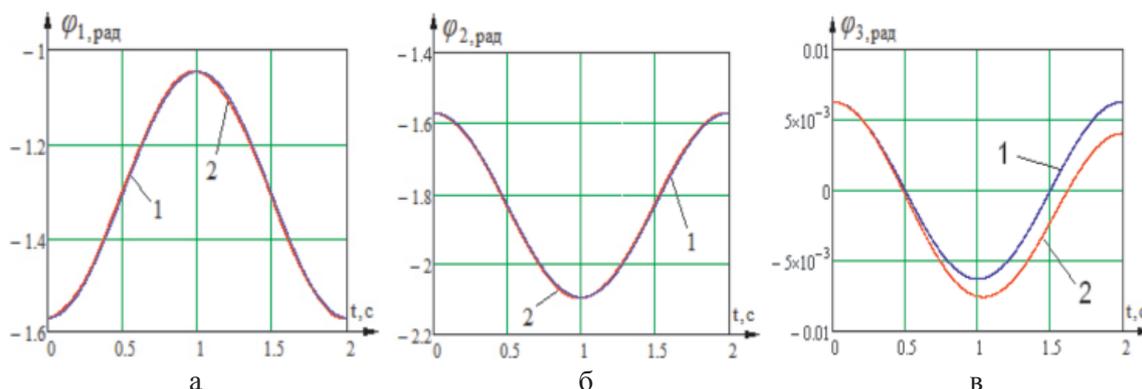


Рис. 5. Временные диаграммы изменения углов звеньев системы при подаче управляющих сигналов: 1 – идеальная характеристика, 2 – полученная при подаче дискретного сигнала; а – диаграмма изменения угла φ_1 звена 1 при подаче момента M_{10} с шагом дискретизации $\Delta t = 0,025$ с; б – диаграмма изменения угла φ_2 звена 2 при подаче момента M_{21} с шагом дискретизации $\Delta t = 0,025$ с; в – диаграмма изменения угла φ_3 звена 3 при подаче момента M_{32} с шагом дискретизации $\Delta t = 0,005$ с

Таким образом мы получили угловые изменения звеньев системы с минимальной ошибкой, которая составляет для углов φ_1 и φ_2 $\xi_2 = 0,5\%$ для угла φ_3 – порядка 25 %.

Заключение

В работе предложена конструкция аппарата для реабилитации нижних конечностей человека, оснащенного тремя управляемыми электромеханическими приводами, движение которого имитирует движение ноги человека. Приведена математическая модель, позволяющая исследовать управляемое движение устройства численным методом.

Описан принцип работы устройства и приведена система автоматического управления, представляющая собой многоканальную систему, выбор которой обусловлен необходимостью обеспечения заданного движения звеньев системы с минимальными отклонениями, а так же предотвращения возможных травм пациента при выполнении упражнений на устройстве. Приведенные закономерности могут быть применены при проектировании различных реабилитационных устройств.

Список литературы

1. Аппараты механотерапии при реабилитации после травм / А.Ф. Бобрин, Н.Г. Гончаров, А.Г. Гудков, А.Е. Девис, В.Ю. Леушин, Н.Г. Назаров, Д.И. Цыганов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2010. – С. 58–62.
2. Довгань В.И., Темкин И.Б. Механотерапия // Медицина. – 1981. – С. 128.
3. Дубровский В.И., Федорова В.Н. Биомеханика // Владос-пресс. – 2003. – С. 551.
4. Устройство для пассивного, этапного восстановления движений в крупных суставах нижней конечности при контрактурах / М.А. Магарамов, А.А. Раджабов, А.П. Огурлиев, З.А. Дыдымов // Травматология и ортопедия России. – С. 99–101.
5. Пашаева И.Г., Свиягина Е.В. Особенности реабилитации спортсменов после травм опорно-двигательного аппарата // Труды дальневосточного государственного технического университета. – 2004. – С. 124–126.
6. Яцун С.Ф., Тарасова Е.С. Механотерапевтическое устройство для реабилитации локтевого сустава // Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технологии. – 2012. – № 1 – С. 42–47.
7. Яцун С.Ф., Тарасова Е.С. Особенности системы управления механотерапевтического устройства для реабилитации локтевого сустава // Известия ЮЗГУ. – 2012. – № 2 ч.1 – С. 172–179.

8. Яцун С.Ф., Рукавицин А.Н. Разработка биоинженерного мехатронного модуля для экзоскелета нижних конечностей человека // Известия самарского научного центра российской академии наук. – 2012. – С. 1351–1354.

9. Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Понедельченко М.С. Математическое моделирование движения аппарата для реабилитации нижних конечностей человека после травм [Электронный ресурс] / С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, М.С. Понедельченко // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/111-10061>.

References

1. Bobrihin A.F., Goncharov N.G., Gudkov A.G., Devis A.E., Leushin V.Ju., Nazarov N.G., Cyganov D.I. Apparaty mehanoterapii pri rehabilitacii posle travm // Biomeditsinskaja radioelektronika. 2010. pp. 58–62.
2. Dovgan' V.I., Temkin I.B. Mehanoterapija // Medicina. 1981. pp. 128.
3. Dubrovskij V.I., Fedorova V.N. Biomehanika // Vladospress. 2003. pp. 551.
4. Magaramov M.A., Radzhabov A.A., Ogurlijev A.P., Dydymov Z.A. Ustrojstvo dlja passivnogo, jetapnogo vosstanovlenija dvizhenij v krupnyh sustavah nizhnjej konechnosti pri kontrakturah // Travmatologija i ortopedija Rossii. pp. 99–101.
5. Pashaeva I.G., Sviagina E.V. Osobennosti rehabilitacii sportsmenov posle travm oporno-dvigatel'nogo apparata // Trudy dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2004. pp. 124–126.
6. Jatsun S.F., Tarasova E.S. Mehanoterapevtičeskoe ustrojstvo dlja rehabilitacii loktevnogo sustava // Izvestija JuZGU. Serija Tehnika i tehnologii. 2012. no. 1 pp. 42–47.
7. Jatsun S.F., Tarasova E.S. Osobennosti sistemy upravlenija mehanoterapevtičeskogo ustrojstva dlja rehabilitacii loktevnogo sustava // Izvestija JuZGU. 2012. no. 2 ch. 1 pp. 172–179.
8. Jatsun S.F., Rukavicin A.N. Razrabotka bioinženernogo mehatronnogo modulja dlja jekzoskeleta nizhnih konechnostej čeloveka // Izvestija samarskogo nauchnogo centra rossijskoj akademii nauk. 2012. pp. 1351–1354.
9. Jatsun S.F., Loktionova O.G., Ponedel'chenko M.S. Matematičeskoe modelirovanie dvizhenija apparata dlja rehabilitacii nizhnih konechnostej čeloveka posle travm [Jelektronnyj resurs] / S.F. Jacun, O.G. Loktionova, M.S. Ponedel'chenko // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2013. no. 5. Rezhim dostupa: <http://www.science-education.ru/111-10061>.

Рецензенты:

Кобелев Н.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, ЮЗГУ, г. Курск;

Игнатенко Н.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ЮЗГУ, г. Курск.

Работа поступила в редакцию 20.09.2013.