

УДК 62-503.5

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ АППАРАТА ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА ПОСЛЕ ТРАВМ

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

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

Работа посвящена изучению закономерностей управляемого движения аппарата для реабилитации нижних конечностей человека после травм. Обозначена актуальность исследования и проектирования такого рода устройств. Предложена схема аппарата, оснащенного тремя активными шарнирами, позволяющего осуществлять реабилитационные мероприятия в различных режимах работы. Исполнительный механизм, представляющий собой трехзвенную систему, расположен на столе, который под действием электропривода изменяет свое положение, тем самым повышая эффективность работы устройства. Предложена математическая модель объекта, включающая в себя описание принципа работы и конструкции устройства, которая позволяет выявить закономерности движения аппарата. Результаты численного моделирования позволили выявить зависимости изменения управляющих моментов во времени при различных массах звеньев системы. Приведенные закономерности могут быть применены при проектировании различных реабилитационных устройств.

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

SYNTHESIS OF PARAMETERS OF THE DEVICE FOR THE REHABILITATION OF THE LOWER EXTREMITIES OF A PERSON AFTER INJURIES

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

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

The work is devoted to the study of the regularities of the controlled motion of the apparatus for the rehabilitation of the lower extremities of a person after injury. The paper presents the relevance of the research and design of such devices. The article presents the scheme of a vehicle equipped with three active joints, allowing to carry out rehabilitation measures in different modes. The executive mechanism, which is a three-link system is on the table. Table changes its position under the action of the electric drive, so increases the efficiency of 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. These patterns can be applied in designing the various rehabilitative devices.

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

Травмы суставов как верхних, так и нижних конечностей в большинстве случаев приводят к ограничению движений в них. Для лечения этой патологии используется метод иммобилизации конечности с помощью гипса или другого внешнего фиксатора, что неизбежно ведет к ограничению подвижности в суставе и атрофии мышц. Поэтому реабилитация после травмы даже при идеальном первичном лечении необходима для максимального ускорения восстановления. Эту задачу позволяют решать механотерапевтические аппараты, с помощью которых осуществляется разработка суставов и восстановление связочно-мышечного аппарата [1, 4, 6, 7, 8, 9, 10].

Реабилитация конечностей или суставов решает две основные проблемы: восстановление полного объема движений в суставе и наращивание мышечной силы и массы; восстановление правильного стереотипа движений [2, 5].

В настоящее время наибольшее распространение получили двухзвенные си-

стемы с одним активным шарниром. Такие устройства имеют ограниченные функциональные возможности, с целью их расширения появились трехзвенные конструкции аппаратов с несколькими активными шарнирами. Трехзвенная система может иметь пассивный коленный шарнир, а голеностопный шарнир – перемещаться по-ступательно.

Обычно такие устройства представляют собой системы для пассивной реабилитации, действия которых направлены на сгибание и разгибание сустава 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.

Целью данного исследования является изучение закономерностей управляемого движения трехзвенного механизма с тремя активными шарнирами. Для достижения поставленной цели необходимо, используя 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 электроприводами вращательного движения 6–8, фиксаторов 9–13, которые фиксируют ногу человека, электропривода вращательного движения 14, для регулировки положения тела, червячного редуктора 15.

Устройство работает следующим образом: нога человека удерживается в механизме фиксаторами 9–13. Электроприводом 14 регулируется угол наклона тела пациента. Электроприводы 6–8 передают движение ноге пациента.

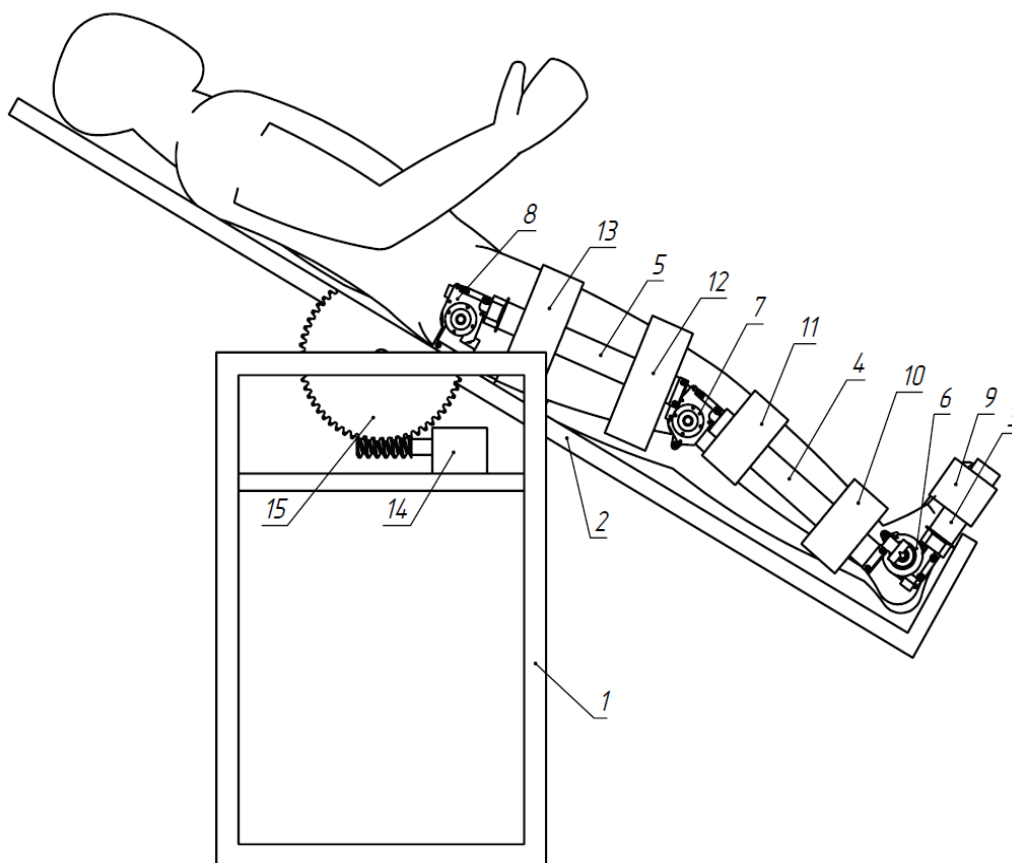


Рис. 1. Схема аппарата для реабилитации нижних конечностей человека после травм

Моделирование движения трехзвенного механизма

Для синтеза основных параметров реабилитационного аппарата крайне важно определить моменты, создаваемые электро-

приводами 6–8, обеспечивающих движение звеньев механизма по заданным траекториям. Будем использовать математическую модель, описанную следующей системой дифференциальных уравнений [10]:

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

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

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

Для решения поставленной задачи зададим законы изменения углов звеньев 1–3, положение которых определяется с помощью углов $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$. Пусть эти углы изменяются по следующим законам: $\varphi_i = k_i \cos \omega_i t$, где k – амплитуда угла, подбирается в зависимости от диапазона его изменения, а ω_i – частота вращения i -го звена.

Углы φ_1 и φ_2 звеньев 1 и 2 будем изменять в диапазоне $\varphi_1^1 \leq \varphi_1 \leq \varphi_1^2$, а угол φ_3 – $\varphi_3^1 \leq \varphi_3 \leq \varphi_3^2$.

Для моделирования движения реабилитационного устройства будем использовать

параметры экспериментального стенда для исследования движения трехзвенного реабилитационного аппарата, показанного на рис. 2. Экспериментальная установка состоит из следующих основных элементов: 1 – стойка, 2 – опорная поверхность, 3 – приводы, 4 – звенья механизма. Звенья экспериментального стенда изготовлены из пластика, массы звена 1 и звена 2 равны. Звенья связаны между собой приводами вращательного движения, которые представляют собой мотор-редукторы с червячной передачей. Весь механизм подвешен на металлическом каркасе.

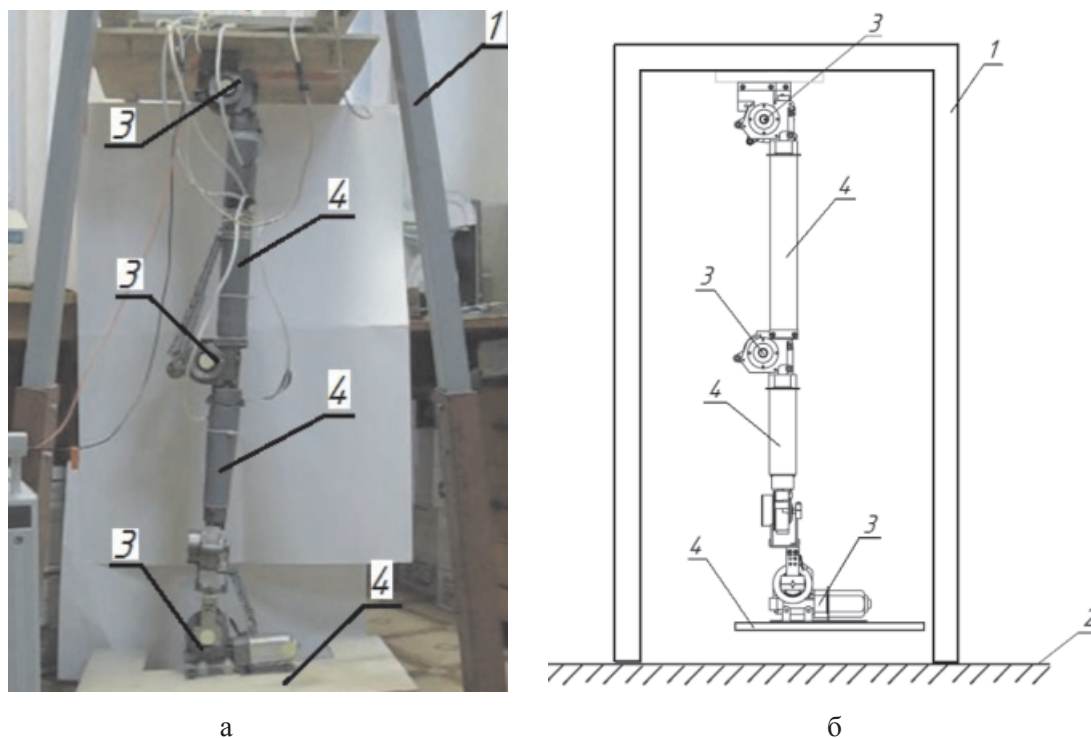


Рис. 2. Общий вид лабораторного стенда:
а – фото; б – схема

Исходные параметры для моделирования: масса звена 1, $m_1 = 2$ кг; масса звена 2, $m_2 = 2$ кг; масса звена 3, $m_3 = 1,3$ кг; длина звена 1, $l_1 = 0,43$ м; длина звена 2, $l_2 = 0,43$ м; длина звена 3, $l_3 = 0,14$ м; угол наклона звена 1, $\varphi_1 = -\pi/2$ рад; угол наклона звена 2, $\varphi_2 = -\pi/2$ рад; угол наклона звена 3, $\varphi_3 = -\pi/2$ рад; угол наклона системы координат относительно горизонта, $\xi = 0$.

Для получения временных зависимостей крутящих моментов зададим законы изменения углов звеньев. Положим, что

$$\varphi_1 = -\frac{\pi}{12} \cos \pi t; \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{24} \cos \frac{\pi}{0,7} t \quad \text{для ин-}$$

$$\begin{aligned} \text{тервала } 0 \leq t \leq 0,7, \quad \varphi_2 &= -\frac{\pi}{8} \cos \frac{\pi}{0,3} t \quad \text{для} \\ \text{интервала } 0,7 \leq t \leq 1; \quad \varphi_3 &= \frac{\pi}{500} \cos \pi t. \end{aligned}$$

Выбор такого движения трехзвенной системы обусловлен биомеханическими возможностями ноги человека и соответствует фазам движения человека [3]. Определим величину управляющих моментов в зависимости от величины массы звеньев механизма.

Получим графики изменения моментов звеньев во времени.

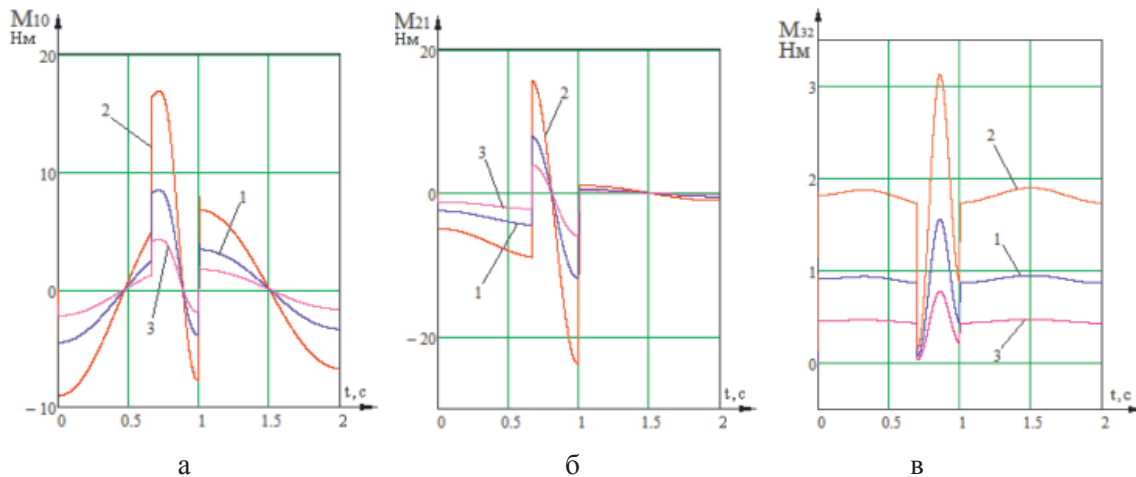


Рис. 3. Временные характеристики изменения управляющих моментов M_{10} звеньев механизма:
 1 – при исходных значениях масс звеньев;
 2 – при $m_1 = 4, m_2 = 4, m_3 = 2,6$; 3 – при $m_1 = 1, m_2 = 1, m_3 = 0,65$;
 а – диаграмма изменения момента M_{10} ; б – диаграмма изменения момента M_{21} ;
 в – диаграмма изменения момента M_{32}

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

$$\phi_1 = -\frac{\pi}{12} \cos \pi t; \quad \phi_2 = \frac{\pi}{12} \cos \pi t;$$

$$\phi_3 = \frac{\pi}{500} \cos \pi t.$$

Ниже приведены графики изменения моментов звеньев во времени.

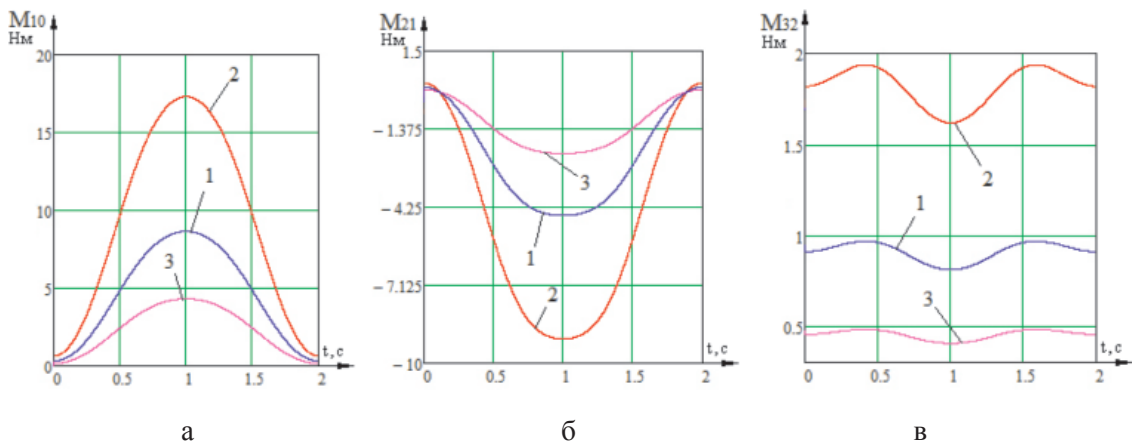


Рис. 4. Временные характеристики изменения управляющих моментов M_{10} звеньев механизма:
 1 – при исходных значениях масс звеньев; 2 – при $m_1 = 4, m_2 = 4, m_3 = 2,6$;
 3 – при $m_1 = 1, m_2 = 1, m_3 = 0,65$;
 а – диаграмма изменения момента M_{10} ; б – диаграмма изменения момента M_{21} ;
 в – диаграмма изменения момента M_{32}

Для первого режима работы диаграммы изменения моментов звеньев имеют немонотонный характер. Пиковые значения моментов возникают на интервале $0,7 \leq t \leq 1$ с, в это время механизм испытывает особо сильные нагрузки. Для второго режима характерно плавное изменение характеристики – моменты имеют сину-

соидальный вид. При росте масс звеньев наблюдается тенденция к увеличению значений моментов.

В ходе экспериментальных исследований также были получены зависимости изменения управляющих моментов от времени для второго режима работы устройства (рис. 5).

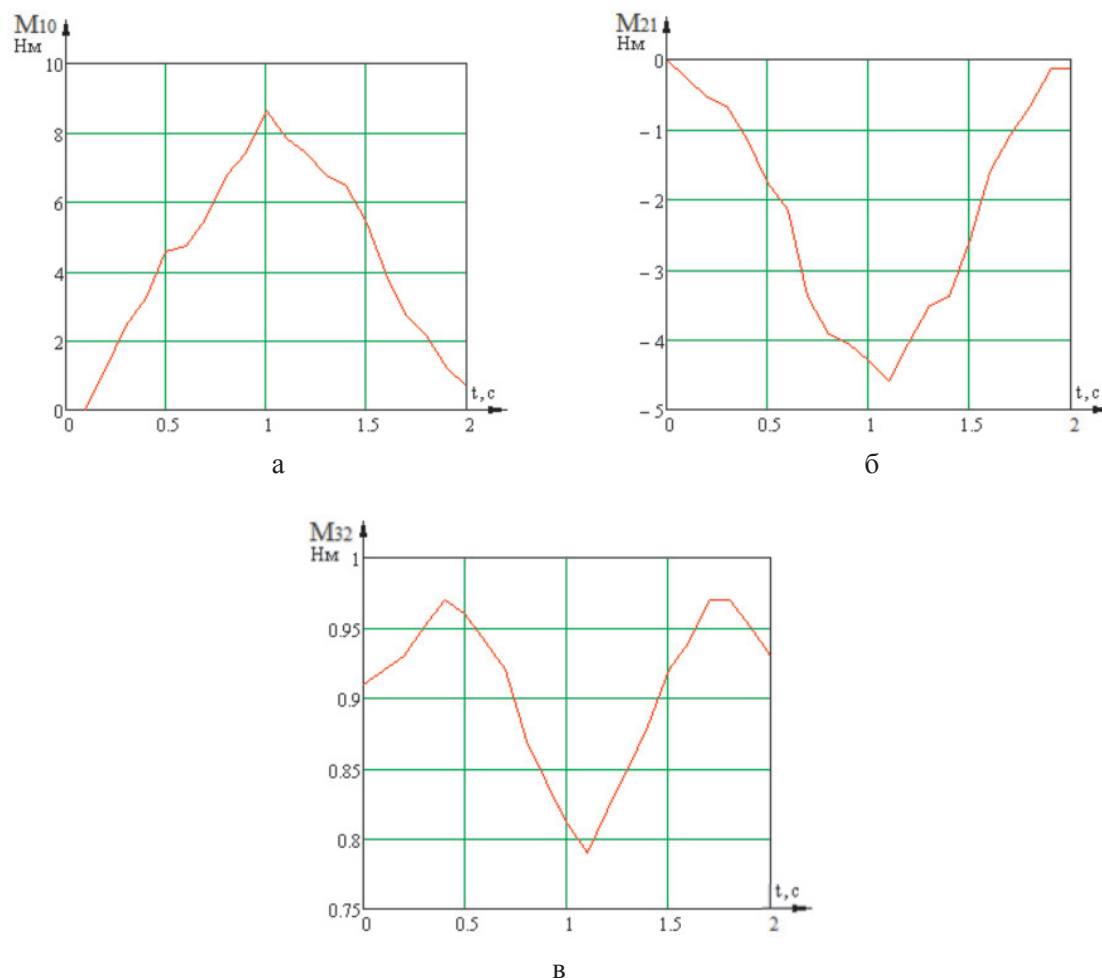


Рис. 5. Временные характеристики изменения управляющих моментов звеньев механизма, полученные экспериментальным путем:

- а – временные характеристики изменения управляющих моментов M_{10} ;
 б – временные характеристики изменения управляющих моментов M_{21} ;
 в – временные характеристики изменения управляющих моментов M_{32}

Отклонение экспериментальных данных от значений, полученных в ходе математического моделирования, составляет в среднем 8–10%.

Заключение

В работе предложена схема аппарата для реабилитации нижних конечностей человека, оснащенного тремя управляемыми электромеханическими приводами, движение которого имитирует движение ноги человека. Приведены расчетная схема и математическая модель, позволяющая исследовать управляемое движение устройства численным методом. В результате моделирования выявлены зависимости управляющих моментов от массы звеньев системы.

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., Свягина Е.В. Особенности реабилитации спортсменов после травм опорно-двигательного аппарата // Труды дальневосточного государственного технического университета. – 2004. – С. 124–126.

6. Рябчиков И.В., Панков И.О., Рябчикова Е.Н. Пассивная механотерапия в реабилитации пациентов с повреждениями крупных суставов нижних конечностей // Бюллетень восточно-сибирского научного центра СО РАМН. – 2011. – С. 94.

7. Яцун С.Ф., Тарасова Е.С. Механотерапевтическое устройство для реабилитации локтевого сустава // Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технологии. – 2012. – № 1 – С. 42–47.

8. Яцун С.Ф., Тарасова Е.С. Особенности системы управления механотерапевтического устройства для реабилитации локтевого сустава // Известия ЮЗГУ. – 2012. – № 2. – ч.1 – С. 172–179.

9. 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.

10. 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., Denis A.E., Leushin V.Ju., Nazarov N.G., Cyganov D.I. Apparaty mehanoterapii pri rehabilitacii posle travm // Biomedicinskaja radiojelektronika. 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 vosstanov-

lenija dvizhenij v krupnyh sustavah nizhnej konechnosti pri kontrakturah // Travmatologija i ortopedija Rossii. pp. 99–101.

5. Pashaeva I.G., Svijagina E.V. Osobennosti rehabilitacii sportsmenov posle travm oporno-dvigatel'nogo apparata // Trudy dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2004. pp. 124–126.

6. Rjabchikov I.V., Pankov I.O., Rjabchikova E.N. Pассивная механотерапия в реабилитации пациентов с повреждениями крупных суставов нижних конечностей // Бюллетень восточно-сибирского научного центра СО РАМН. 2011. pp. 94.

7. Jacun S.F., Tarasova E.S. Mehanoterapevtičeskoe ustrojstvo dlja rehabilitacii loktevoogo sustava // Izvestija JuZGU. Serija Tehnika i tehnologii. 2012. no. 1 pp. 42–47.

8. Jatsun S.F., Tarasova E.S. Osobennosti sistemy upravlenija mehanoterapevtičeskogo ustrojstva dlja rehabilitacii loktevoogo sustava // Izvestija JuZGU. 2012. no. 2 ch.1 ppp. 172–179.

9. 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.

10. Jatsun S.F., Loktionova O.G., Ponedel'chenko M.S. Matematičeskoe modelirovanie dvizhenija apparata dlja rehabilitacii nizhnih konechnostej čeloveka posle travm [Elektronnyj resurs] / S.F. Jatsun, 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:

Савин Л.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Мехатроника и МИ», ФГОУ ВПО «Госуниверситет УНПК», г. Орел;

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

Работа поступила в редакцию 16.09.2013.