

УДК 16:796/799

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МЕХАТРОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ С НАРУШЕНИЯМИ ДВИГАТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

¹Яцун С.М., ¹Лулева Н.В., ¹Соколова И.А., ²Яцун А.С.

¹ФГБОУ ВПО «Курский государственный университет», Курск, e-mail: mbd155@mail.ru;

²ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», Курск, e-mail: teormech@inbox.ru

В статье рассмотрены вопросы изучения динамики биомехатронного устройства для реабилитации больных с нарушениями двигательной функции нижних конечностей. Предложена схема устройства для механотерапии, проведено математическое моделирование динамического поведения аппарата, обеспечивающего повышение эффективности программ по реабилитации. В работе использованы методы теоретической и прикладной механики, математического моделирования и управления. В ходе исследования был теоретически обоснован принцип движения реабилитационных устройств, основанный на биомеханических возможностях человека, соответствующий фазам движения конечности. В результате анализа динамической модели мехатронной системы выявлена нелинейная зависимость сил, действующих на нижнюю конечность. Рассматриваемое устройство может быть использовано для реабилитации пациентов в кинезиологии и физиотерапии, так как особенности конструкции устройства позволяют нагружать нижнюю конечность посредством упражнений, стимулирующих мышечную активность, улучшая функции и предотвращая неблагоприятные эффекты от вынужденной длительной гиподинамии.

Ключевые слова: мехатронное устройство, реабилитация, нижние конечности, нарушение двигательных функций

STUDY OF THE DYNAMICS OF MECHATRONIC DEVICES FOR REHABILITATION OF PATIENTS WITH MOTOR DISORDERS OF THE LOWER EXTREMITIES

¹Yatsun S.M., ¹Luneva N.V., ¹Sokolova I.A., ²Yatsun A.S.

¹Kursk State University, Russia, Kursk, e-mail: mbd155@mail.ru;

²South-West State University, Russia, Kursk, e-mail: teormech@inbox.ru

The paper deals with the study of the dynamics of biomechatronic device for rehabilitation of patients with impaired motor function of the lower extremities. Presents the scheme of the device mechanotherapy, the mathematical model of the dynamic behavior of the device, providing efficiency of the rehabilitation. We used the methods of the theoretical and applied mechanics, mathematical modeling and control. In this study was justified theoretically principle of motion rehabilitation based on biomechanical human capabilities, the corresponding phases of movement of the limb. An analysis of the dynamic model of the mechatronic system revealed a nonlinear dependence of the forces acting on the lower extremities. These units can be used for the rehabilitation of patients in kinesiology and physical therapy because this is constructions allow to load the lower limbs exercises by simulating muscle activity, improving function and preventing the adverse effects of prolonged forced inactivity.

Keywords: mechatronic device, rehabilitation, lower limbs of man, mobility impairments

Увеличение продолжительности жизни, урбанизация, изменение характера питания, загрязнение воды и атмосферы – эти и многие другие факторы привели к глубоким изменениям в состоянии популяции. На рубеже второго и третьего тысячелетий инсульт стал одной из основных проблем здравоохранения. Каждый год в мире эта патология поражает около 16 млн человек, из них 5,7 млн умирают, и столько же становятся инвалидами. В Российской Федерации (40–50%) 1-е место в структуре патологии занимает инсульт, являющийся причиной инвалидности. К сожалению, только 20% лиц, перенесших инсульт, возвращаются к труду. При этом потери государства от одного больного, получившего инвалидность, составляют порядка 1247000 рублей в год.

Это обуславливает важность проблемы профилактики данного заболевания и ре-

абилитации больных, перенесших инсульт. Наиболее частым последствием, приводящим к инвалидности, является нарушение двигательных функций. По данным регистра мозгового инсульта НИИ неврологии РАМН, к концу острого периода двигательные нарушения наблюдаются у 81,2% из 100 выживших больных [2].

В последнее время в результате развития вычислительной техники и мехатроники значительно увеличилось число биомехатронных тренажеров для лечебных и реабилитационных целей [1]. Медицинские потребности в таком оборудовании велики. Они связаны с увеличением среднего возраста населения в России и с ростом числа случаев инсульта. Другим источником потребностей в реабилитационных устройствах являются случаи спортивных, автомобильных или военных травм спинного мозга.

Для использования ранних программ реабилитации людей с нарушениями двигательных функций нижних конечностей целесообразно применять современные механотерапевтические устройства, разрабатываемые на основе последних инновационных достижений в области медицины, биоинженерии, мехатроники, компьютерной техники, механики, математики и других фундаментальных дисциплин [5].

Цель: проведение математического моделирования динамического поведения биоинженерного мехатронного устройства, обеспечивающего повышение эффективности реабилитационных программ у больных с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата.

Материалы и методы исследования

Поставленные задачи решаются с применением методов теоретической и прикладной механики, теории робототехнических систем, математического моделирования и систем управления.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследуемое нами устройство для механотерапии нижних конечностей человека с интегрированным в него мехатронным модулем, представляет собой систему, состоящую из шарнирно закреплённых подвижных звеньев, комбинированного привода линейного перемещения с датчиком угла поворота, датчика нагрузки на опорную пятку и концевых предохранительных выключателей. Управление приводами осуществляется посредством микропроцессорного блока [4].

На рис. 1 представлен коленный мехатронный модуль, включающий в себя жесткое основание 1, которое при помощи гибких эластичных ремней (2) крепится к бедру человека. К нижней части основания (1) присоединена с образованием вращательной кинематической пары поворотная пластина (3), которая с помощью гибких эластичных ремней (2) крепится к голени человека. В верхней части основания (1) присоединен привод поступательного движения (4), выходной вал которого соединен с поворотной пластиной (3) при помощи сферического шарнира. В нижней части бедра, в районе медиальной широкой мышцы, крепится датчик биологического сигнала, соединенный с системой компьютерного управления.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Для принудительного совершения движения в коленном суставе из системы компьютерного управления поступает сигнал в виде питающего напряжения, подаваемого на привод поступательного движения (4). Величина напряжения пропорциональна величине требуемого выходного усилия коленного модуля. При этом выходной вал привода (4) совершает поступательное перемещение в необходимом направлении, приводя в движение поворотную пластину (3), которая также совершает угловое перемещение вместе с голенью. Затем, в соответствии с программой управления, выходной вал привода (4) движется в обратном направлении, и поворотная пластина вместе с голенью возвращается в исходное положение. Затем цикл повторяется.



Рис. 1. Коленный мехатронный модуль в составе реабилитационного устройства для механотерапии

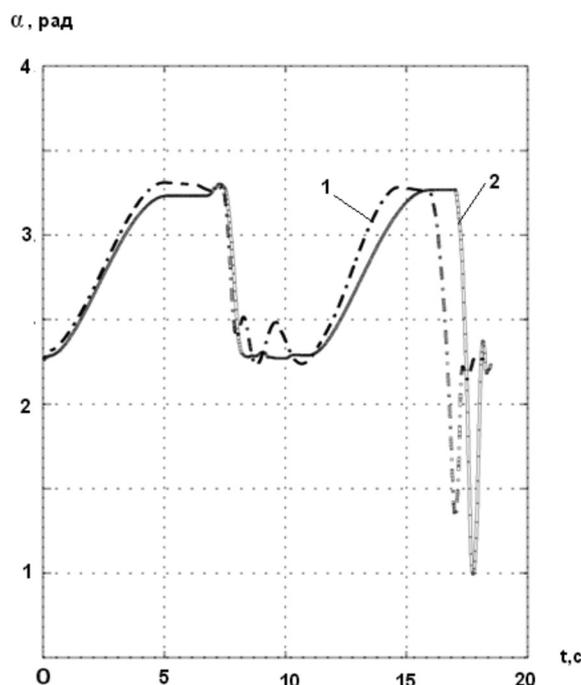


Рис. 2. График изменения межзвеного угла

Данный модуль позволяет реализовать только двумерное движение в сагиттальной плоскости. В устройстве используется комбинированный привод линейного перемещения LAS-1-1-150-12GE с электродвигателем постоянного тока и преобразователем движения – шариковинтовой передачей. Путём математического моделирования были выбраны параметры макета (размеры, массы, моменты инерции звеньев) [3]. Мехатронный модуль оснащен импульсным датчиком, измеряющим угол α . Угловые скорости вычисляются на основе информации об угловых положениях. Датчик крепится к оси мотора и «выдаёт» 2000 импульсов на оборот. Вычисление управляющего сигнала происходит через каждые 5 мс (200 Гц). В программном обеспечении используется язык C++.

Модуль позволяет осуществлять принудительное сгибание-разгибание нижней конечности в коленном суставе, обеспечивая постоянный контроль естественных движений. В ходе исследования была проведена оценка конструктивных решений мехатронного модуля с целью оптимизации по весовым, энергетическим, эргономическим и другим эксплуатационно-техническим показателям, обеспечивающим выполнение заданных требований. Были выявлены значения показателей, полученные в ходе исследования, и осуществлен прогноз их изменения в процессе эксплуатации.

На рис. 2 представлен график изменения межзвеного угла α , полученный при

математическом моделировании 1 и в экспериментах 2.

Во время экспериментов, представленных на рис. 2, максимальная скорость перемещения нижней точки поворотной пластины составляет примерно 25 мм/с, что несколько меньше (12%), чем при математическом моделировании этого процесса. Уменьшив продолжительность фазы двойной опоры, можно увеличить скорость перемещения исполнительного звена мехатронного модуля.

В процессе передвижения учитывалась деформируемость звеньев (костей), из которых состоит опорно-двигательный аппарат. Максимальные ускорения звеньев снижаются почти на порядок, так как при ходьбе происходит рекуперация энергии. Кинетическая энергия движения при постановке ноги не полностью диссипатирует, а частично переходит в потенциальную энергию упруго деформирующихся звеньев, которая, в свою очередь, при смене опорной ноги частично преобразуется в кинетическую энергию при отталкивании.

Особенности конструкции устройства позволяют нагружать нижнюю конечность посредством упражнений, стимулирующих мышечную активность, улучшая функции и предотвращая неблагоприятные эффекты от вынужденной длительной гиподинамии. Программное обеспечение контролирует пациента и оптимизирует прогресс физиотерапии. Предусмотрен широкий набор физических упражнений с различными

уровнями сложности для оптимизации индивидуальной нагрузки. Разновариантные комплексы упражнений позволяют существенно расширить доступный объем движений. Разработанное программное обеспечение регистрирует движения нижней конечности, позволяя врачу в реальном времени контролировать состояние пациента и процесс механотерапии.

Разработанный мехатронный коленный модуль может применяться отдельно для восстановления функции тугоподвижных суставов. При этом используется методика статического прогрессивного вытяжения. В основе методики лежит механическое растяжение тугоподвижного сустава и его последующая релаксация, чередуемые каждые 5–8 минут в течение 30–40 минут. В отличие от динамического вытяжения с помощью других методик данный модуль позволяет получать эффективные результаты. Методика проста в использовании: пациент имеет возможность самостоятельно регулировать нагрузку, ориентируясь на свои ощущения. Разработанный биоинженерный мехатронный модуль может использоваться в суставах с ограниченным уровнем подвижности в тех случаях, когда невозможно пассивное движение – в том числе при болезненных движениях в суставах.

Приводы мехатронных модулей разработанного реабилитационного устройства обладают стабильной угловой скоростью, которая предотвращает адгезии и контрактуры. Особенности конструкции устройства минимизируют переднее большеберцовое смещение и обеспечивают минимальную нагрузку на коленный сустав, осуществляя его синхронную разработку, а также поддерживает регулировку движений голеностопного сустава для полного пассивного восстановления подвижности нижней конечности.

Меры безопасности включают контроль всех операций блоком управления, который изменяет направление движения при выключении и включении, а также изменяет нагрузку при сопротивлении пациента движениям аппарата или когда движение устройства по каким-либо причинам затруднено. Данное устройство реализует принудительное движение.

Выводы

Таким образом, в ходе исследования был теоретически обоснован принцип движения реабилитационных устройств, основанный на биомеханических возможностях человека и соответствующий фазам движения конечности. В результате проведенного анализа динамической модели мехатронной системы выявлена нелинейная зависимость сил, действующих на нижнюю конечность человека, и установлены законы управляю-

щего напряжения, позволяющие уменьшить ускорение и снизить уровень негативного влияния на состояние пациента. Отклонение экспериментальных данных от значений, полученных в ходе математического моделирования, связано с погрешностью измерений и составляет в среднем 8–10%.

Полученные результаты экспериментов подтверждают правильность предложенной математической модели, воспроизводящей динамику системы «реабилитационное устройство – нога человека», что может быть использовано при отработке различных программ реабилитации в кинезиологии и физиотерапии.

Работа выполнена в рамках Гранта РНФ № 14-39-00008.

Список литературы

1. Головин В.Ф., Архипов М.А., Журавлев В.В. Биомехатроника в медицинской робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 12. – С. 45–48.
2. Кичайкина Н.Б. Биомеханика физических упражнений / Н.Б. Кичайкина, И.М. Козлов, А.В. Самсонова: учебно-методическое пособие. – СПб, 2008. – 164 с.
3. Понедельченко М.С. Разработка и проектирование конструкции шагающего робота // Управляемые вибрационные технологии и машины: сборник научных статей X научно-технической конференции Вибрация-2012. – Ч. 2. – С. 134–144.
4. 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>.
5. Yatsun S. Development bioengineering mechatronic module for exoskeleton human leg / S. Yatsun, A. Rukavitsyn // Nauka i Studia, 2013. – NR 17 (85), Przemysł (Польша). P. 39–46.

References

1. Golovin V.F., Arhipov M.A., Zhuravlev V.V. Biomechanika v medicinskoj robototekhnike // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. 2012. no. 12. pp. 45–48.
2. Kichajkina N.B. Biomehanika fizicheskih uprazhnenij / N.B. Kichajkina, I.M. Kozlov, A.V. Samsonova: uchebno-metodicheskoe posobie. SPb, 2008. 164 p.
3. Ponedelchenko M.S. Razrabotka i proektirovanie konstrukcii shagajushhego robota // Upravljajemye vibracionnye tehnologii i mashiny: sbornik nauchnyh statej H nauchno-technicheskoi konferencii Vibracija-2012. Ch. 2. pp. 134–144.
4. Jacun S.F., Loktionova O.G., Ponedelchenko M.S. Matematicheskoe modelirovanie dvizhenija apparata dlja rehabilitacii niznih konechnostej cheloveka posle travm [Elektronnyj resurs] / S.F. Jacun, O.G. Loktionova, M.S. Ponedelchenko // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2013. no. 5. Rezhim dostupa: <http://www.science-education.ru/111-10061>.
5. Yatsun S. Development bioengineering mechatronic module for exoskeleton human leg / S. Yatsun, A. Rukavitsyn // Nauka i Studia, 2013. NR 17 (85), Przemysł (Pol'sha). pp. 39–46.

Рецензенты:

Савин Л.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Мехатроника и международный инжиниринг», ФГБОУ ВПО «Государственный университет – ГНПК», г. Орел;

Шевякин В.Н., д.т.н., профессор, профессор кафедры механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ «Юго-Западный государственный университет», г. Курск.