



Павловский В.Е., Платонов А.К.,  
Алисейчик А.П., Орлов И.А.,  
Павловский В.В., Птахин А.А.

Биомехатронный комплекс  
нейрореабилитации –  
концепция, конструкция,  
модели и управление

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Биомехатронный комплекс нейрореабилитации – концепция, конструкция, модели и управление / В.Е.Павловский [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. № 111. 19 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-111>

**Ордена Ленина**  
**ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ**  
**имени М.В.Келдыша**  
**Российской академии наук**

В.Е.Павловский, А.К.Платонов, А.П.Алисейчик,  
И.А.Орлов, В.В.Павловский, А.А.Птахин

**БИОМЕХАТРОННЫЙ КОМПЛЕКС НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ –**  
**КОНЦЕПЦИЯ, КОНСТРУКЦИЯ, МОДЕЛИ И УПРАВЛЕНИЕ**

**Москва, 2014 г.**

**УДК 796.012:612.7:531.1**

В.Е.Павловский<sup>1</sup>, А.К.Платонов<sup>1</sup>, А.П.Алисейчик<sup>1</sup>, И.А.Орлов<sup>1</sup>,  
В.В.Павловский<sup>1</sup>, А.А. Птахин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН

<sup>2</sup> Механико-математический факультет МГУ

## **БИОМЕХАТРОННЫЙ КОМПЛЕКС НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ – КОНЦЕПЦИЯ, КОНСТРУКЦИЯ, МОДЕЛИ И УПРАВЛЕНИЕ**

### **АННОТАЦИЯ**

Представлен мехатронный комплекс для нейрореабилитации двигательного аппарата нижних конечностей человека. Представлены структура комплекса, составляющие элементы – тренажеры стопы и голеностопа с прессирующим воздействием на стопы, полукровать-вертикализатор, экзоскелет нижних конечностей для оперирования ими в случае потери их подвижности или для активных тренировок. Комплекс предназначен для выполнения лечебных действий с больными, потерявшими подвижность нижних конечностей, или для работы со спортсменами или космонавтами на этапах реабилитации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 11-01-12060-офи-м-2011 (2011-2012 гг.), проект 13-01-12037-офи-м.

**Ключевые слова:** биомехатроника, реабилитационно-исследовательский комплекс, вертикализатор, экзоскелет, тренажер стопы, тренажер голеностопа, тренажер колена, импульсное управление, пневмопривод

Vladimir E. Pavlovsky<sup>1</sup>, Aleksandr K. Platonov<sup>1</sup>, Anton P. Aliseychik<sup>1</sup>,  
Igor A. Orlov<sup>1</sup>, Vladimir V. Pavlovsky<sup>1</sup>, Aleksandr A. Ptakhin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS

<sup>2</sup> Mechanics and Mathematics Faculty of Lomonosov Moscow State University (MSU)

## **BIOMECHATRONIC NEUROREHABILITATION COMPLEX – CONCEPT, DESIGN, MODELS AND CONTROL**

### **ABSTRACT**

The work presents a mechatronic system for neurorehabilitation of locomotion system of the human lower limbs. It presents the structure of the complex and its components - foot and ankle training device with acupressure effect on the foot, bed - standing frame, lower limb exoskeleton to operate them in case of loss of mobility or for active workouts. The complex is designed for therapeutic action with patients who have lost the mobility of the lower limbs, or to work with athletes or astronauts on stages of rehabilitation.

Work is performed with support of the Russian Foundation for Basic Research, the projects 11-01-12060- офи-м-2011 (2011-2012), the 13-01-12037- офи-м project.

**Key words:** biomechatronics, research rehabilitation complex, standing frame, exoskeleton, foot training device, ankle training device, knee training device, PWM control, pneumatic actuator.

## **Введение**

Возможность поиска и прессового воздействия на биологически активные зоны стопы, голеностопа и конечностей, особенно нижних, позволяет надеяться на улучшение, а возможно и на восстановление нарушенных при спинномозговой травме (или заболеваниях) вегетативных функций. Соединение таких модулей с механизмом для принудительного движения опорно-двигательного аппарата ноги человека позволит сформировать требуемый биомехатронный тренажер, как на базе имеющихся биомеханических тренажеров с тредбаном, так и в варианте кровати-вертикализатора. Этот же тренажер можно использовать и для восстановления в спортивной медицине, для реабилитации космонавтов и в аналогичных приложениях [1].

Подобные комплексы в настоящее время разрабатываются в целом ряде лабораторий технически развитых стран и коммерческими фирмами. Они являются более или менее сложными устройствами, имеют ручное (врачом или самим пациентом) управление или несут в своем составе достаточно изощренные системы компьютерного мехатронного управления. Основные типы используемых устройств для стимуляции нижних конечностей опорно-двигательного аппарата человека – стимуляторы стопы для имитации прессирующих воздействий или реакции опоры, тренажеры разработки голеностопа и других суставов, вертикализаторы, которые часто применяются для пациентов с ограниченными возможностями, поражениями и травмами спинного мозга (эти тренажеры чрезвычайно важны, чтобы начать реабилитацию практически сразу после травмы, и увеличивают не только скорость реабилитации, но и шанс на полное выздоровление), легопуляторы-экзоскелеты.

Передовые современные нейрофизиологические исследования показывают, что задача создания устройств описанного класса чрезвычайно актуальна.

## **Медицинские предпосылки, требования к конструкциям**

**Требования к конструкциям тренажеров.** Очевидно, что к таким тренажерным комплексам предъявляются строгие требования безопасности, т.к. при отсутствии у пациента чувствительности нижних конечностей, невозможно отследить случайно нанесенный аппаратом ущерб. В связи с этим требуется точная настройка аппарата до использования и обязательное присутствие обратной связи. Также важно учитывать оси и максимальные возможности подвижности суставов пациента. Не менее важным вопросом является сохранение правильной походки пациента. К сожалению, для большинства современных реабилитационных аппаратов данная задача пока остается не до конца решенной, вследствие чего многие люди, прошедшие

реабилитацию на локомоторных стимуляторах, имеют неправильную походку (без поворота таза вокруг вертикальной оси тела), что значительно усложняет хождение, а также приводит к постепенной деформации тазобедренного сустава [1-12].

**Уникальность физиологии пациентов.** При настройке описанных аппаратов необходимо учитывать индивидуальные особенности анатомии и физиологии каждого пациента. Так, например, наличие у пациента какого-либо заболевания, снижающего подвижность суставов, делает для него невозможными шагательные движения с большой амплитудой, требующие сгибания коленей и активной работы тазобедренного сустава.

## **Описание реабилитационного комплекса**

В ИПМ им. М.В.Келдыша РАН создан опытный образец комплекса мехатронных роботизированных реабилитационных устройств для широкого круга пациентов и различной тяжести заболеваний. Для разработки отдельных групп мышц и суставов могут применяться как отдельные устройства, так и весь комплекс. В исходной версии комплекс состоит из следующих устройств: тренажера для разработки голеностопного сустава, модуля для стимуляции стопы, тренажера-вертикализатора и легопулятора (экзоскелета нижних конечностей) человека. В развитой последующей версии к ним добавлен специализированный тренажер ног пациента для легких версий тренажа. В дальнейшем планируется дополнить этот состав экзоскелетом рук человека. Далее описывается каждое устройство.

## **Тренажер голеностопного сустава**

Этот элемент комплекса создан на основе медицинского ортеза, где одна степень свободы реализована на упругом креплении, чтобы обеспечить безопасность и компенсировать несовершенство степени свободы ортеза с реальным, более сложным и в общем случае не цилиндрическим, шарниром голеностопного сустава человека. При этом различия между физиологическими особенностями конкретных людей компенсируются разными специально разработанными вкладышами в ортез. В качестве привода в шарнире используется двигатель постоянного тока с червячным редуктором. Таким образом, максимальный момент в цилиндрическом шарнире сопоставим с моментом, развиваемым при ходьбе здорового человека. Управление роботом реализовано с помощью модульной микроконтроллерной системы "РОБОКОН" управления роботами разработки ИПМ им. М.В.Келдыша РАН [13], в состав системы входит также серийный одноплатный микрокомпьютер формата PC-104. Система имеет обратную связь по углу и может управляться как с компьютера, так и без него, в этом случае управляющая программа находится в памяти контроллера. Предотвращение чрезмерных нагрузок на сустав человека контролируется как программно, так и механически, так как предусмотрена

возможность поставить на аппарат верхний и нижний ограничители по углу вращения. Кроме того, от чрезмерных усилий предохраняет специально разработанная система гибкого крепления привода.

На рис.1 для наглядности приведена основа стимулятора стопы без фиксирующих вкладышей для реабилитации конкретного пациента. В каждом тренажере находятся пневматические стимуляторы опорных зон стоп, описанные ниже. Тренажер голеностопа может быть использован как в комплексе с остальными реабилитационными устройствами, так и отдельно, для лечения более узкого круга заболеваний или для тренировок.



*Рис. 1.* Тренажер голеностопа, стимуляторы, блок управления

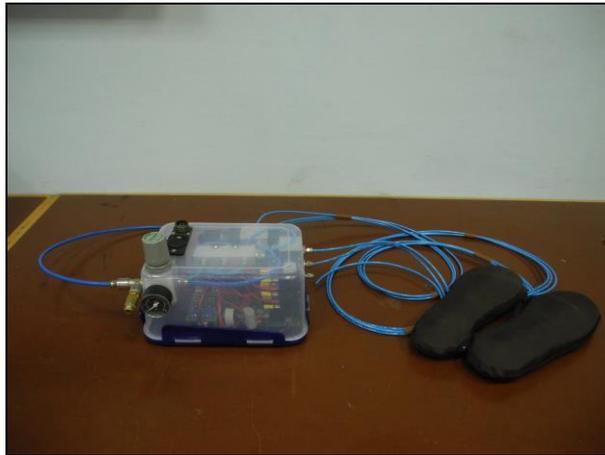
На рис.1 показано устройство в мобильном автономном варианте. Система управления – все силовые электро- и пневмо- модули и электронные модули управления – находятся в блоке, расположенном рядом с тренажером.

## **Стимулятор опорных зон стопы**

Устройство (рис.2) предназначено для стимуляционной реабилитации и профилактики патологий опорно-двигательного аппарата, связанных с болезнями, приведшими к параличу нижних конечностей. Стимулятор опорных зон обеспечивает механическую имитацию опорной нагрузки, запуская при этом синергичные взаимодействия двигательных рефлексов (см. [10-12]).

Принцип работы стимулятора основан на пневматическом давлении на соответствующие зоны (для каждой стопы их три), которое моделирует реальную ходьбу человека. Реализовано давление при помощи специальных пневматических упругих камер, управление которыми происходит путем широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что в свою очередь дает возможность выполнить любую наперед заданную функцию давления, вплоть до удара (имитация прыжка). В отличие от остальных устройств российского производства данного типа стимулятор опорных зон стопы имеет три камеры (для каждой зоны стопы: пяточной, зоны свода и плюсневой), что помогает более достоверно моделировать процесс ходьбы человека.

Блок управления для данного устройства также основан на упомянутой модульной микроконтроллерной системе "РОБОКОН", что позволяет работать со стимулятором стоп и тренажером голеностопного сустава в комплексе, используя один интерфейс. Для безопасности пациентов в модуль включена система *регулятор давления – предохранительный клапан*, которая обеспечивает безопасное давление на стопу человека.



*Рис. 2. Стимуляторы стопы*

Еще одной особенностью данной системы является то, что питать стимулятор можно от стандартного напряжения 12 В, а в качестве компрессора использовать электрический насос (например, автомобильный), что делает модуль весьма мобильным, и соответственно, это может существенно ускорить клиническую реабилитацию пациента.

## **Тренажер-полукровать-вертикализатор**

Для того чтобы начать процесс реабилитации как можно раньше, можно использовать спинной тренажер-вертикализатор. Этот тренажер имеет конструкцию полукровати и имеет модульную схему. На тренажере установлены регулируемые опоры для крепления к полу и ручки для поддержки пациента. Тренажер легко разбирается и помещается в багажное отделение легкового автомобиля, что позволяет использовать его не только в клиниках, но и в иных условиях (например, в мобильных приложениях).

В состав комплекса входит также экзоскелет нижних конечностей. На рис.3 изображена полукровать с манекеном и экзоскелетом. На данный момент на полукровати реализованы три степени свободы: две управляемые и одна пассивная – поворот корпуса вокруг вертикальной оси. Подъемная степень управляется электродвигателем и имеет обратную связь по углу. Кроме функции вертикализации, эта степень используется при отработке имитации движений приседания и т. п. Вторая активная степень поворачивает корпус пациента вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной активной наклонной оси.



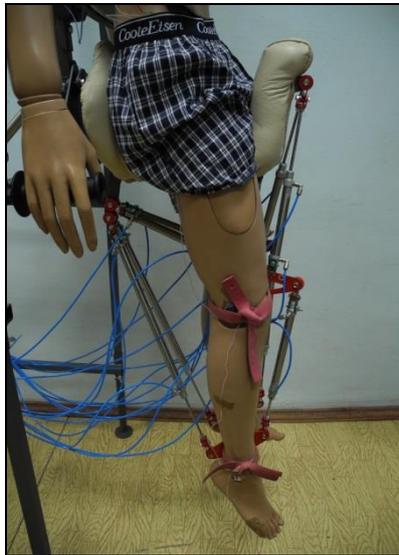
*Рис. 3.* Тренажер-вертикализатор и легопулятор-экзоскелет

Благодаря такой конструкции реализуется кинематика имитации движения таза при ходьбе человека. В дальнейшем все три угловые степени вращения таза будут активными. На корпусе полукровати устанавливается блок управления всем реабилитационным комплексом.

### **Тренажер-легопулятор (экзоскелет ног)**

Для имитации ходьбы человека и разработки нижних конечностей человека создан легопулятор (экзоскелет) ног. Данная конструкция экзоскелета имеет существенные отличия от иностранных [7, 14] и отечественных аналогов с пневмоприводами, так как система не имеет собственных шарниров, имитирующих или повторяющих суставы человека. Благодаря этому проблема повторения точной кинематики конкретного пациента решается, притом программно. Экзоскелет имеет модульную конструкцию, и некоторые шарниры могут быть легко добавлены или удалены для создания более жесткой или плоской конструкции. В базовой сборке экзоскелет состоит из пяти жестких деталей: седла, и креплений к голени и бедру, соединенных между собой пневмоцилиндрами. Большинство пневмоцилиндров крепятся к жестким деталям сборки с помощью двух- или трехступенных шарниров. Таким образом, данная конструкция может иметь шесть степеней свободы у крепления бедра относительно седла и шесть степеней свободы у крепления голени относительно крепления бедра и относительно седла. Таким образом, в данной сборке могут быть реализованы произвольные движения ног человека, ограниченные лишь ходами пневмоцилиндров. На первом этапе для отработки движений на манекене использованы пневмоцилиндры небольшого диаметра, чтобы обеспечить безопасность на рабочем давлении 8 Бар. Пневмоцилиндры также легко заменяются, как на аналогичные с иным ходом, так и на цилиндры

другого диаметра, что позволит легко и быстро адаптировать конструкцию под конкретного пациента.

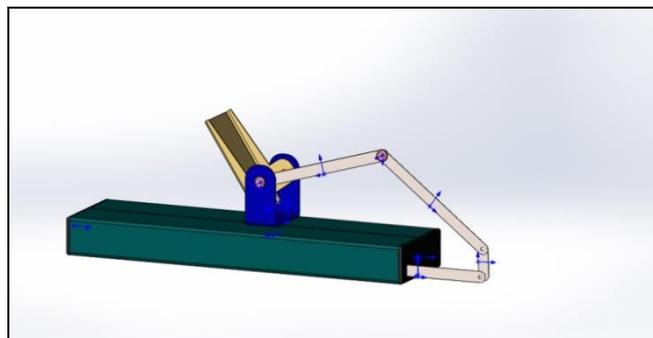


*Рис. 4.* Экзоскелет ног человека

На рис.4 приведен характерный вид экзоскелета, закрепленного на тренажере-полукровати для отработки имитации приседания. В данной сборке аппарат имеет восемь управляемых пневмоцилиндров, остальные степени свободы остаются пассивными, чтобы не причинить вреда походке человека. Шток цилиндра имеет магнит, так что возможно реализовать обратную связь при помощи датчиков Холла. Каждым из восьми цилиндров управляют два нормально-закрытых клапана в режиме широтно-импульсной модуляции на частотах, близких к 50 Гц.

### **Специализированная модель тренажера ног**

Аппарат (модуль) предназначен для пассивной, полуактивной и активной реабилитации коленного сустава и голеностопного сустава. Трехмерная схема модуля приведена на рис.5.



*Рис. 5.* Тренажер коленного и голеностопного суставов

Аппарат, показанный на рис.5, дополняет описываемый комплекс автономной функцией для работы с коленным и голеностопным суставами, при управлении используются паттерны движения этих суставов, расчет которых описывается ниже.

## **Методика синтеза управления комплексом**

Методику управления модулями комплекса покажем на примере легопулятора-экзоскелета, т.к. этот модуль требует наиболее сложного управления. В текущей версии главные приводы модуля – пневматические (см. [15-20]). В созданной системе использовались пневмоприводы и пневмооборудование фирмы Pneumat, Италия [21].

Полный цикл управления экзоскелетом состоит из нескольких фаз, основные из которых следующие две – построение шагательного паттерна и исполнение этого паттерна пневмоприводами модуля.

## **Синтез шагательного паттерна**

Первая фаза – построение схемы движения конечности, т.е. синтез шагательного паттерна.

Шагательный паттерн можно строить для легопулятора несколькими приемами. Были использованы следующие базовые схемы.

Во-первых, использовалась технология, аналогичная методам захвата движения (motion capture в англоязычной литературе). Эта технология основана на наблюдении и видеосъемке технической зрительной системой специальных маркеров, расположенных на теле человека-оператора (экспериментатора). Последующая обработка видеопоследовательности таких кадров дает траектории характерных точек-маркеров, по которым строится паттерн движения человека. Эта технология в начальных экспериментах была существенно упрощена, количество маркеров было сведено к минимальному числу (вплоть до 3-4 маркеров на одну ногу экспериментатора).

На рис.6 показан типовой кадр видеопоследовательности, полученной для построения траекторий движения характерных точек ноги человека. Этот кадр – правый на приведенном поле экрана.

В качестве базовой точки для расчета шагательного паттерна была принята некоторая средняя точка голеностопного сустава, ее положение могло варьироваться, и это вызывало небольшие флуктуации траекторий шагания, они, однако, не влияли существенно на общий синтез управления. В качестве дополнительной точки шагательного паттерна принята средняя точка коленного сустава. Эти точки в окне на рис.6 показаны яркими точками В и С (в них находились светодиодные маркеры). Собственно, их траектории и были приняты за шагательный паттерн.

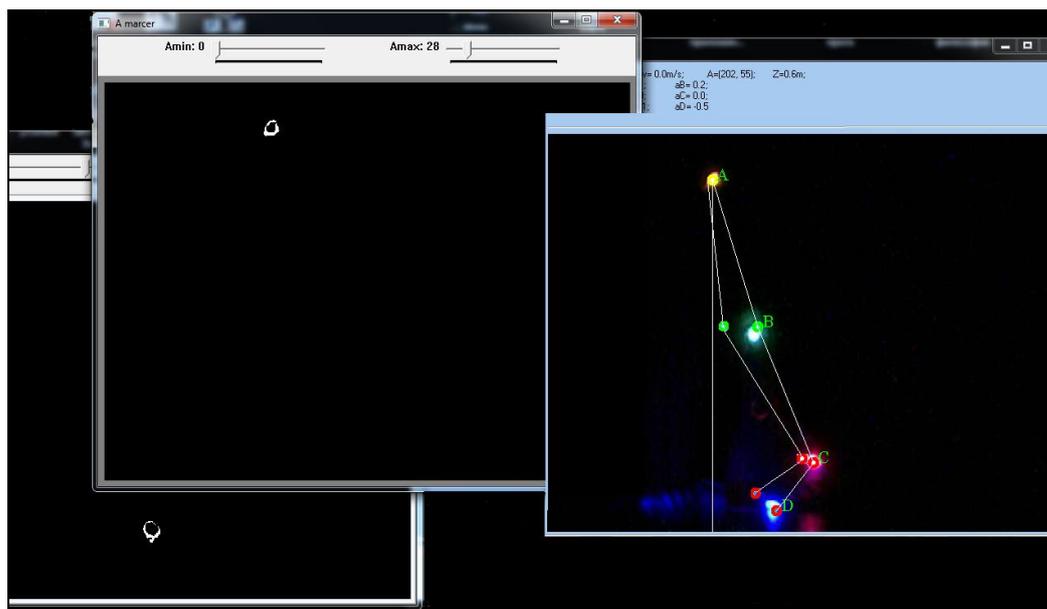


Рис. 6. Видеосъемка реальной ходьбы оператора

Другой (второй) вариант получения таких паттернов – использование видеосенсоров Kinect Microsoft, эта технология реализуется в комплексе в настоящее время. Представляемая технология имеет два преимущества. Во-первых, она позволяет записать и построить пространственную, а не плоскую ходьбу человека. Во-вторых, в этой технологии захвата движения (motion capture) производится запись и обработка естественной ходьбы человека.

Запись производится с помощью двух и более камер, снимающих движение с разных ракурсов. Комплекс алгоритмов компьютерного зрения (computer vision) решает задачи фильтрации шумов изображения, совмещения информации с разных камер, обнаружения частей тела, а также определения положения и ориентации частей тела во время движения. Результатом работы алгоритмов является полная кинематика движения, полностью повторяющая ходьбу человека. Схема видеоустановки приведена ниже на рис.7. На схеме показан вид сверху на видеоустановку.

Полученная на построенной установке схема реального движения человека приведена на "раскадровке" на рис.8.

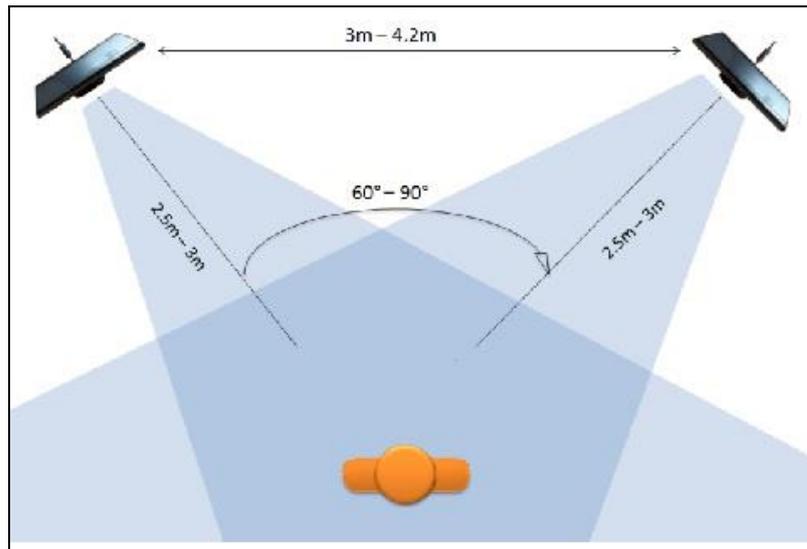


Рис. 7. Схема видеозахвата движения объекта

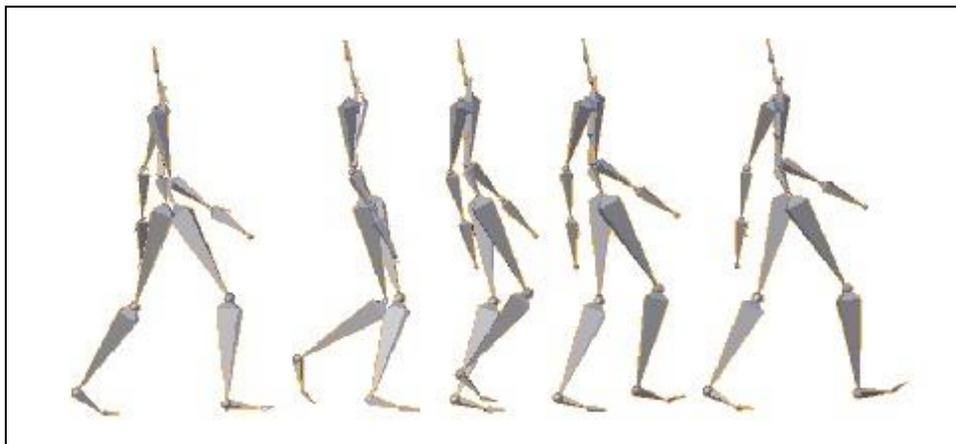


Рис. 8. Схема движения объекта

Наконец, третий вариант – непосредственное построение траекторий выбранных точек конечности по модельным физиологическим данным [22]. Следует заметить, что эти данные являются весьма приблизительными, но все-таки дают общую картину движения с приемлемой точностью.

### **Отработка паттерна шагания в комплексе**

После того, как характерные траектории паттерна и законы движения изображающих точек по ним построены, выполняется их пересчет в законы движения приводных цилиндров аппарата. Этот пересчет выполняется на основании циклического расчета обратной кинематической задачи (ОКЗ) для легопулятора, которая для него не является тривиальной в силу избыточности и сложности его кинематической схемы.

Для полного расчета и ОКЗ, и обратной динамической задачи (ОДЗ), для контроля усилий, развиваемых силовыми цилиндрами, реализована полная

динамическая модель комплекса в программном пакете УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ, объединенном со средствами пакета MATLAB-SIMULINK [23-24]. На рис.9 проиллюстрирована раскадровка одного шагательного цикла для легопулятора. В качестве шагательного цикла рассматривается эллипс вида:

$$\begin{cases} x = x_0 + a \cos(T_0 t), \\ y = y_0 + b \sin(T_0 t). \end{cases}$$

Здесь  $x_0, y_0$  – центр эллипса в системе координат, связанной с сиденьем легопулятора,  $2a$  – длина шага,  $2b$  – высота шага,  $T_0$  – параметр, задающий время одного шагательного цикла.

Такая форма траектории была выбрана не случайно, эксперименты по видеозахвату движения показали, что в первом приближении шагательный цикл возможно описать эллипсовидной траекторией.

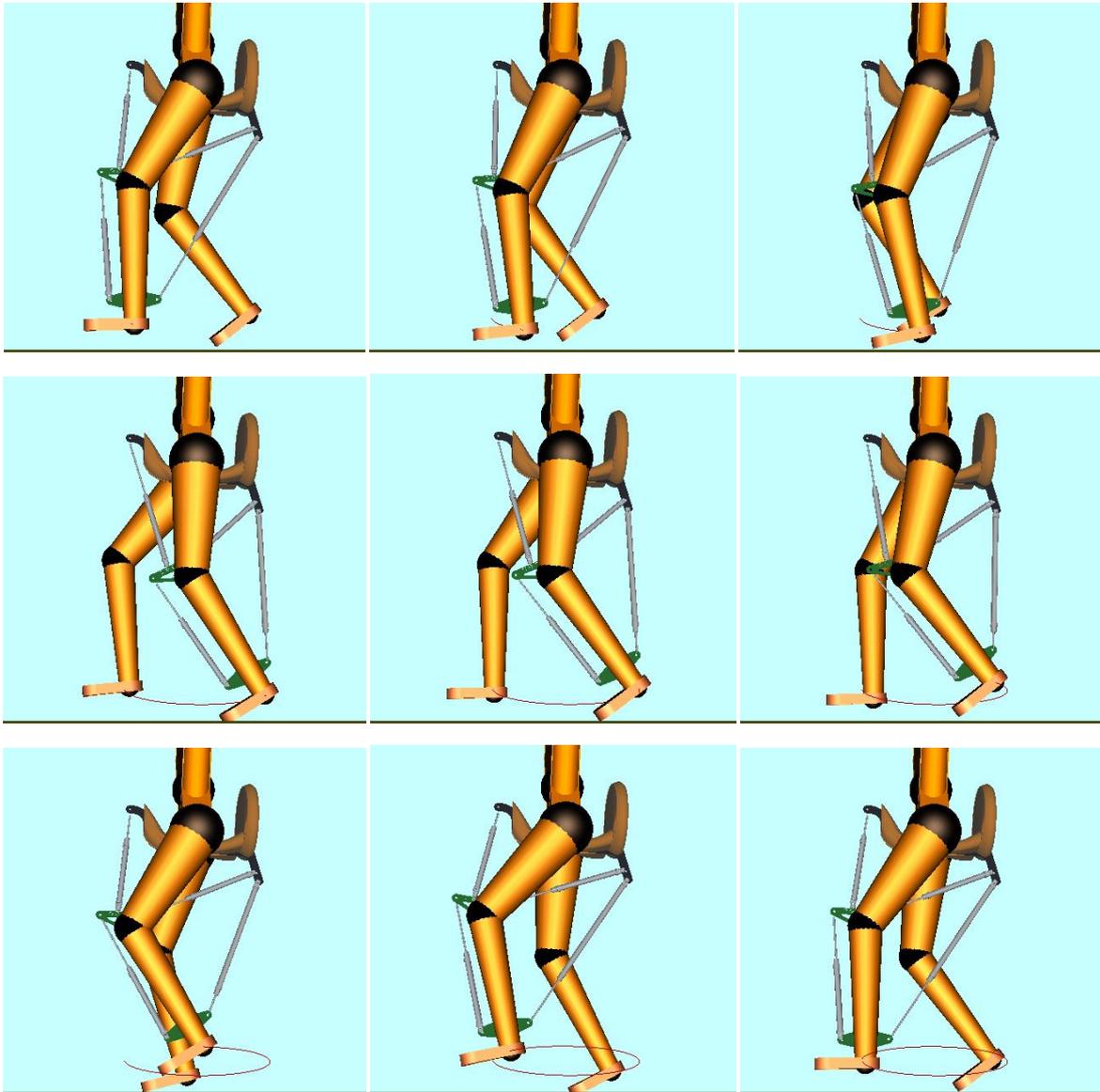


Рис. 9. Раскадровка шагательного цикла для легопулятора

Ниже на рис. 10-12 приведены зависимости от времени различных параметров системы (результаты моделирования в ПК УМ): угловые зависимости в бедренном и коленном суставах левой ноги, зависимости от времени длин цилиндров легопулятора для левой ноги, скорости движения штоков цилиндров легопулятора для левой ноги – для следующих параметров шагательного цикла:

$$2a = 0,4 \text{ м}; \quad 2b = 0,08 \text{ м}, \quad T_0 = 2.$$

Задача ОДЗ решается пакетом моделирования параллельно с решением кинематической задачи.

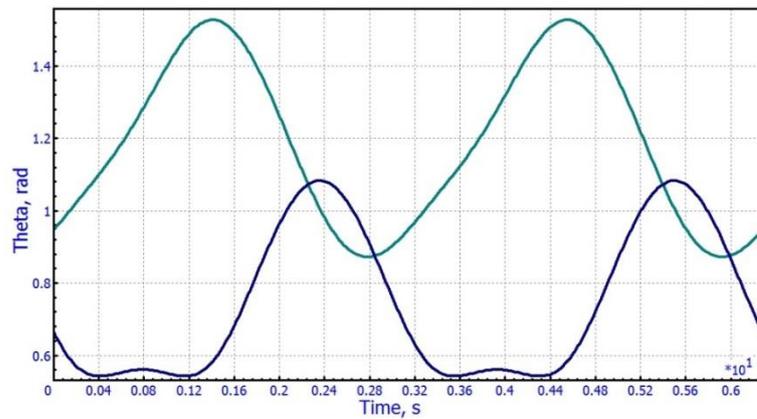


Рис. 10. Угловые зависимости от времени в бедренном и коленном суставах левой ноги

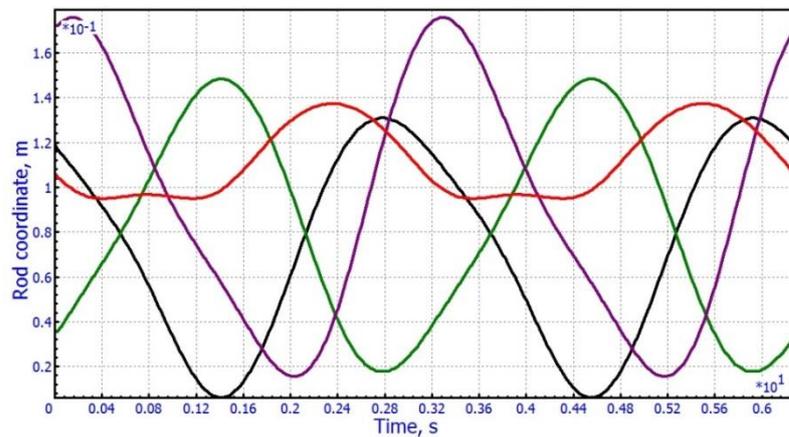


Рис. 11. Зависимости от времени ходов цилиндров легопулятора для левой ноги

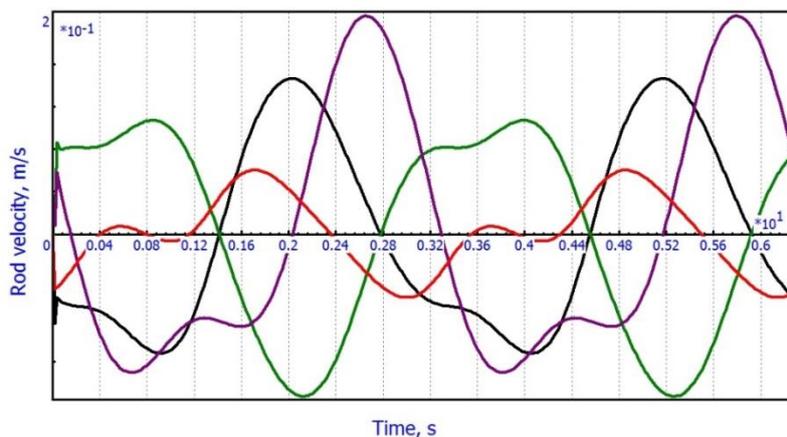


Рис. 12. Скорости движения штоков цилиндров легопулятора для левой ноги

На рис.13 показано решение ОДЗ, полученное в ПК УМ для данной траектории.

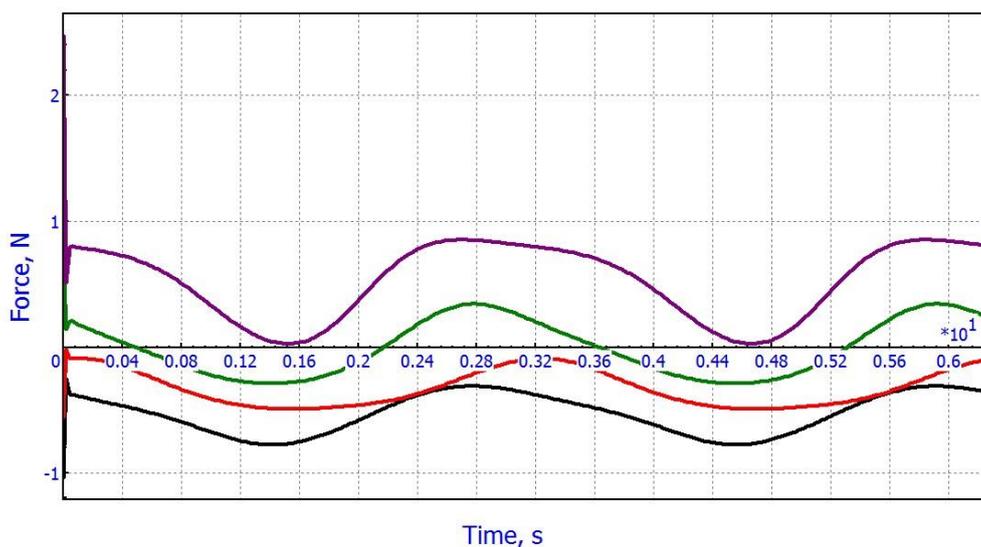


Рис. 13. Усилия, необходимые в реализации в цилиндрах легопулятора для левой ноги

Программное обеспечение комплекса использует систему на базе модульной микроконтроллерной системы "РОБОКОН" (на основе микроконтроллеров PIC) управления роботами разработки ИПМ им. М.В.Келдыша РАН [13]. Эта система имеет полные библиотеки нижнего уровня для управления приводами и ввода показаний аналоговых и цифровых датчиков. Программы верхнего уровня исполняются на внешнем компьютере, который управляет комплексом и отображает получаемую с него телеметрическую информацию.

## Заключение

Разработана система программного траекторного управления реабилитационным тренажером для нижних конечностей (экзоскелетом) на основе аналитического решения обратной задачи кинематики для данного аппарата. Проведены эксперименты в программном комплексе «Универсальный Механизм», получены силовые зависимости от времени, возникающие в пневмоцилиндрах при отработке заданных траекторий.

Разработана система управления для реализации шагательных паттернов в реабилитационном тренажере для нижних конечностей человека на основе компьютерного моделирования. В качестве траектории некоторой точки голеностопа человека выбирается дуга эллипса, аппроксимирующая фазу шага и отрезок, соответствующий фазе касания поверхности. В программном комплексе «Универсальный Механизм» рассчитаны функции  $l_k(t)$  – зависимость длины хода  $k$ -того пневмоцилиндра от времени. Полученные функции реализованы ШИМ-управлением на пневматических клапанах.

Разработаны методики определения траектории некоторой точки голеностопа человека для реализации на устройстве. Системы основаны на визуальном контроле маркеров и компьютерном анализе серии изображений, получаемых с камеры/камер. Эти же системы используются для корректировки реализуемой траектории во время настройки параметров системы для реабилитации конкретного пациента. Таким образом, комплекс не требует никакой механической настройки под конкретного пациента (в том случае, когда имеется возможность выполнить заранее вышеописанный алгоритм).

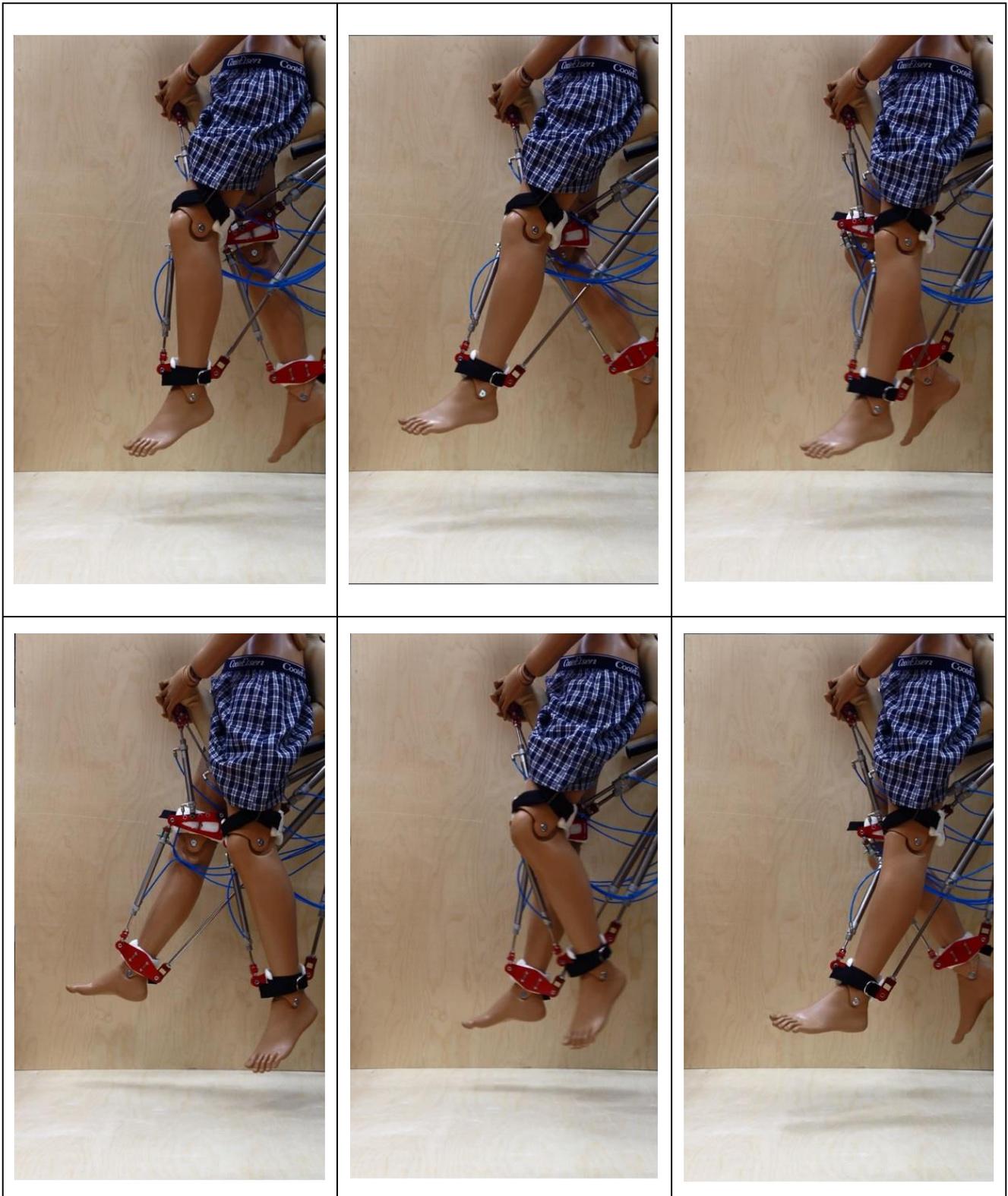
Переработана механика реабилитационного комплекса для увеличения гладкости движения при отработке реализуемых траекторий.

Разработана и изготовлена электронная часть схемы управления. Построена система взаимодействия комплекса с компьютером, разработано программное обеспечение для реализации управления.

Ниже на рис.14 показана раскадровка нескольких фаз движения экзоскелета с манекеном человека в реальном эксперименте на комплексе.

Резюме можно сделать следующее. Выполненные на созданном комплексе эксперименты показали его успешность и адекватность поставленной задаче. Созданные численно-аналитические модели позволяют эффективно рассчитывать законы управления аппаратурой (приводами) комплекса. В настоящее время подготавливается серия конкретных физиологических экспериментов на комплексе.

В целом можно сказать, что предлагаемая работа представляет новое мехатронное направление – биомехатронику, в нем разработка реабилитационных комплексов рассматривается как важная задача механики, информатики, биомедицины, электроники.



*Рис.14.* Кадры нескольких фаз движения экзоскелета  
в реальном эксперименте

## Библиографический список

1. Центр авиакосмической медицины.  
URL: <http://amc-si.com/index.php?thread=24>
2. Имитатор опорной нагрузки подошвенный "Корвит".  
URL: <http://diasled.ru/korvit>
3. Платонов А.К., Герасименко Ю.П., Илиева-Митуцева Л., Никитин О.А., Сербенюк Н.С., Трифонов О.В., Ярошевский В.С. Биомехатронные элементы стимулятора стопы человека. // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. 2011. № 38. 32 с.  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-38>
4. Platonov A., Mitutsova L., Delchev K., Vitkov V., Chavdarov I., Latkovski V., Yaroshevsky V., Nikitin O. Development of a mechatronic system "GAITSIM" for biomechanical rehabilitation of patients paraplegics. // Engineering mechanics, 2007, 14 / 4, 249-258.
5. Platonov A., Ilieva-Mitutsova L, Nikitin O, Chavdarov I., Delchev K., Vitkov V., Yaroshevsky V., Serbenjuk N, Gerasimenko Y. Design of mechatronic system for foot receptor activation intended to improve rehabilitation of paraplegic patients. // Proceed. of Inter. Conf. "PRAKTRO 2007", 12 – 15 June 2007, Varna, 2007, 19-24.
6. Компания ORMED. URL: <http://www.djoglobal.de/arzt/artromot-k1.html>
7. Тренажер LOCOMAT. URL: <http://www.hocomat.com/products/lokomat/>
8. Комплекс для локомоторной тренировки РООИ «ОРБИТА».  
URL: <http://orbital-rt.ru/index.php/kompleks>
9. Платонов А.К., Павловский В.Е., Сербенюк Н.С., Гришин А.А., Герасименко Ю.П., Мошонкина Т.Р. Биомехатроника лечебно-исследовательского тренажера-кровати. // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. 2012. № 16. 32 с.  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-16>
10. Гришин А.А., Герасименко Ю.П., Мошонкина Т.Р., Павловский В.Е., Платонов А.К., Сербенюк Н.С. Биомехатроника и лечебно-исследовательские тренажеры: концептуальные и медико-биологические основы. // Мехатроника. Автоматизация. Управление. ISSN 1684-6427. № 12, 2012. с. 37-45. URL: <http://novtex.ru/mech/mech2012/annot12.html#7>
11. Гурфинкель В.С., Левик Ю.С., Казенников О.В., Селионов В.А. Существует ли генератор шагательных движений у человека? // Физиология человека. 1998. Т. 24. № 3. С. 42.
12. Selionov V.A., Ivanchenko Y.P., Solopova I.A., Gurfinkel V.S. Tonic central and sensory stimuli facilitate involuntary airstepping in humans // J. Neurophysiol. 2009. V. 101. P. 2847.
13. Павловский В.Е., Павловский В.В. Модульная микроконтроллерная система управления роботами РОБОКОН-1. Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. 2012. № 86. 32 с.  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-86>

14. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы. М., 1976.
15. Википедия. Электрический привод.  
URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Электропривод>
16. Москаленко В.В. Электрический привод. — 2-е изд. — М.: Академия, 2007. — 368 с.
17. Википедия. Гидравлический привод.  
URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Гидропривод>
18. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы: [Учебник для машиностроит. специальностей вузов] / Под ред. Т.М. Башты. — М.: Машиностроение, 1970. — 504 с.
19. Википедия. Пневматический привод.  
URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Пнеumoпривод>
20. Схиртладзе А.Г., Иванов В.И., Кареев В.Н. Гидравлические и пневматические системы. — Москва: ИЦ МГТУ «Станкин», «Янус-К», 2003. — 544 с.
21. ПНЕВМАКС. Компоненты для автоматизации производства.  
URL: <http://www.pneumax.ru/>
22. Дубровский В.И., Федорова В.Н. Биомеханика: Учеб. для сред. и высш. учеб. заведений. — М.: Изд-во ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. - 672 с.
23. Погорелов Д.Ю. О численных методах моделирования движения систем твёрдых тел. // Журнал вычислительной математики и математической физики, № 4, с. 501-506, 1995.
24. Simulink R2012b Documentation [Online].  
URL: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sdl/ref/genericengine.html>

## Оглавление

	стр.
Введение .....	3
Медицинские предпосылки, требования к конструкциям .....	3
Описание реабилитационного комплекса .....	4
Тренажер голеностопного сустава .....	4
Стимулятор опорных зон стопы .....	5
Тренажер-полукровать-вертикализатор .....	6
Тренажер-легопулятор (экзоскелет ног) .....	7
Специализированная модель тренажера ног .....	8
Методика синтеза управления комплексом .....	9
Синтез шагательного паттерна .....	9
Отработка паттерна шагания в комплексе .....	11
Заключение .....	15
Библиографический список .....	17