

**А. П. Алисейчик**, atooxa@gmail.com, **И. А. Орлов**, i.orlov@keldysh.ru,  
**Е. Ю. Колесниченко**, decstrela@mail.ru, **В. Е. Павловский**, vlpavl@mail.ru,  
**В. В. Павловский**, vlpavl2000@mail.ru, **А. К. Платонов**, akp31mail@gmail.com,  
 Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН<sup>1</sup>

## Реабилитационный экзоскелет БиоМех: модели, управление, конструкция, эксперименты

*Рассматривается техническая роботизированная система поддержки нейрореабилитационных процедур — реабилитационный экзоскелет БиоМех.*

*Аппарат является развитием первых версий [8, 9]. Обсуждаются задачи теоретико-механического описания роботизированных экзоскелетов нижних конечностей, динамического моделирования таких систем, создания систем управления ими. Для рассматриваемой двуногой системы исследуются следующие проблемы: кинематический синтез ходьбы на основе технологии видеозахвата движения, решение прямой и обратной динамических задач для нахождения управляющих моментов сил, синтез полной системы управления, верификация найденных решений с помощью физического и натурного моделирования, построение адекватной системы управления приводами для реализации заданного движения. Поставленные задачи исследованы в рамках создания биомехатронного комплекса для нейрореабилитации двигательного аппарата нижних конечностей человека.*

**Ключевые слова:** экзоскелет, биомехатроника, реабилитационно-исследовательский комплекс, вертикализатор, импульсное управление, пневмопривод, электропривод, гибридный привод

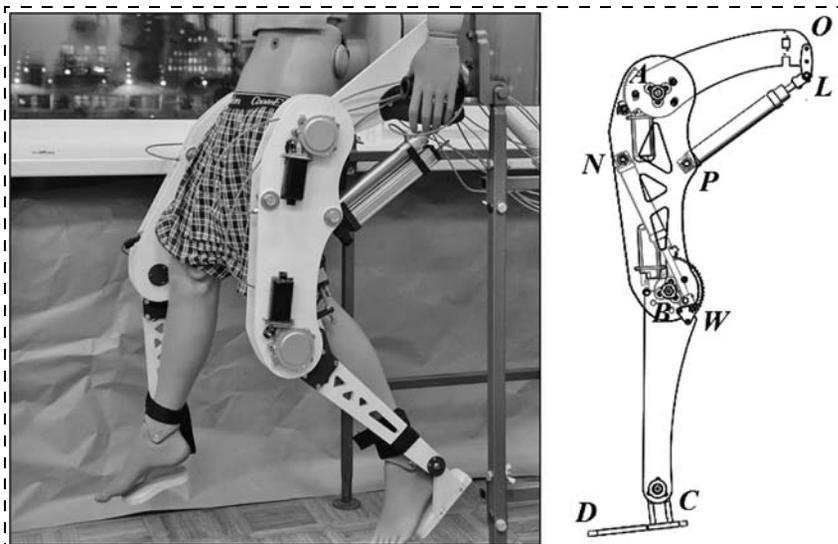
### Введение

В работе рассматривается двуногая система, называемая экзоскелетом (рис. 1), предназначенная для восстановления двигательной функции у людей, которые долго находились без движения и не могут управлять ногами. Медицинские исследования показывают, что если ноги пациента будут повторять движения, аналогичные ходьбе (даже механически исполнять шагательные паттерны), то есть шанс восстановить нужные нейронные связи, в результате чего человек снова может получить способность ходить. Этот факт определяет актуальность данного исследования.

Для решения поставленной задачи прежде всего требуется найти закон, описывающий движения человека. Для этого применяется система видеозахвата, состоящая из нескольких видеокамер и компьютера. Комплекс алгоритмов компьютерного зрения решает задачи обнаружения частей тела, а также определения положения и ориентации частей тела во время движения. Результатом работы алгорит-

мов является полная кинематическая схема движения, строго повторяющая ходьбу человека. С использованием найденной кинематической схемы далее решается обратная динамическая задача для определения необходимых управляющих моментов сил.

В реальной системе нужно корректировать управление, чтобы устранить влияние возникающих погрешностей, например таких, как неточное задание начальных условий в динамических уравнениях или неточная передача вращающего управляющего момента. В системе имеются датчики уг-



**Рис. 1.** Общий вид экзоскелета БиоМех (с манекеном) и кинематическая схема одной ноги

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 11-01-12060-офи-м-2011 в 2011–2012 гг., развита при поддержке грантов РФФИ 13-01-12037-офи-м, 16-29-08406-офи-м.

лов, с помощью которых отслеживается реальное положение многозвенника. На основе этой информации и программного движения работает следящая система, корректирующая управление экзоскелетом. Полученное управление первоначально проверяется в программной среде "Универсальный Механизм". Модель многозвенника подчиняется заданному управлению. Показано, что моделируемое движение, как свободное, так и при воздействии возмущений, выходит на программную траекторию.

Возможность 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 вегетативных функций. Соединение таких модулей с механизмом для принудительного движения опорно-двигательного аппарата ноги человека позволяет 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, 2].

Подобные комплексы в настоящее время разрабатываются в целом ряде лабораторий технически развитых стран и коммерческими фирмами. Они являются более или менее сложными устройствами с ручным управлением (которое осуществляет врач или сам пациент) или имеют в своем составе достаточно изолированные системы компьютерного мехатронного управления. Основные типы используемых устройств для стимуляции нижних конечностей опорно-двигательного аппарата человека — стимуляторы стопы для имитации прессурных 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 [3—11].

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

Очевидно, что к таким тренажерным комплексам предъявляются строгие требования безопасности [10], так как 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 мак-

симальные 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]. При настройке описанных аппаратов необходимо учитывать уникальность физиологии пациентов, т.е. 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 полной большой амплитудой, требующих сгибания коленной и активной работы тазобедренного сустава.

#### **Описание реабилитационного комплекса, синтез управления, модели**

В данной работе описывается опытный образец комплекса мехатронных роботизированных устройств для реабилитации широкого круга пациентов и при различной тяжести заболеваний. Комплекс назван БиоМех, версия 3.

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 подробнее опишем экзоскелетный модуль комплекса, так как остальные были представлены в предыдущих публикациях [8, 9].

#### **Видеозахват движения. Синтез походки**

Согласно технологии видеозахвата движения проводится запись и обработка естественной ходьбы человека (оператора). Запись осуществляется с помощью двух и более камер типа Kinect, снимающих движение с разных ракурсов. Комплекс алгоритмов компьютерного зрения решает задачи фильтрации шумов изображения, совмещения информации с разных камер и упомянутые выше задачи обнаружения частей тела, а также определения положения и ориентации частей тела во время движения. Эта часть работы реализуется программными пакетами iPi Recorder и iPi Mocap Studio (от iPi Soft LLC) с авторскими доработками. Результатом работы алгоритмов является антропоморфная кинематическая схема движения [12].

### Кинематическая схема движения

В результате видеозахвата система синтезирует файл со структурой многозвенной модели. В модели выбирается условный центр отсчета — твердое тело (условно — таз человека), для которого записывается его положение в пространстве  $x, y, z$  в неподвижной системе координат и повороты остальных звеньев относительно него в зависимости от времени. Конфигурация каждого следующего звена описывается тремя углами поворота  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$   $i$ -го звена относительно предыдущего звена. Считается, что к тазу прикреплены туловище и два бедра, и их положение определяется тремя углами поворота относительно осей, жестко связанных с тазом. Аналогично к бедрам прикреплены голени, а к ним стопы. Туловище (тело аппарата) может быть закреплено жестко. На основе подобных данных для всех оконечных и промежуточных звеньев с течением времени синтезируется полный кинематический закон движения модели (походка) — полный вектор углов  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ .

В ходе работы было сформировано несколько типов походок, полученных при ходьбе от разных экспериментаторов (рис. 2, 3). Для всех походок построены наборы углов движения звеньев ног  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ .

### Фильтрация данных

Исходные данные после первичной обработки содержат небольшой измерительный шум, который

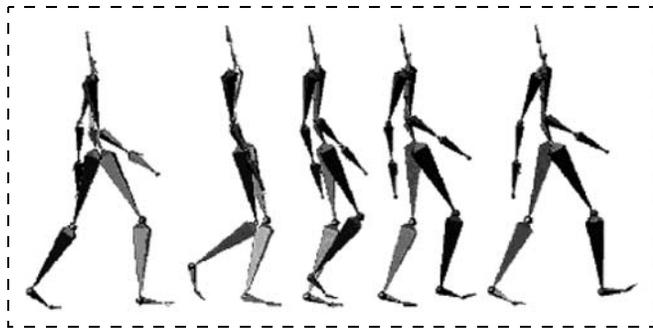


Рис. 2. Найденная видеозахватом походка

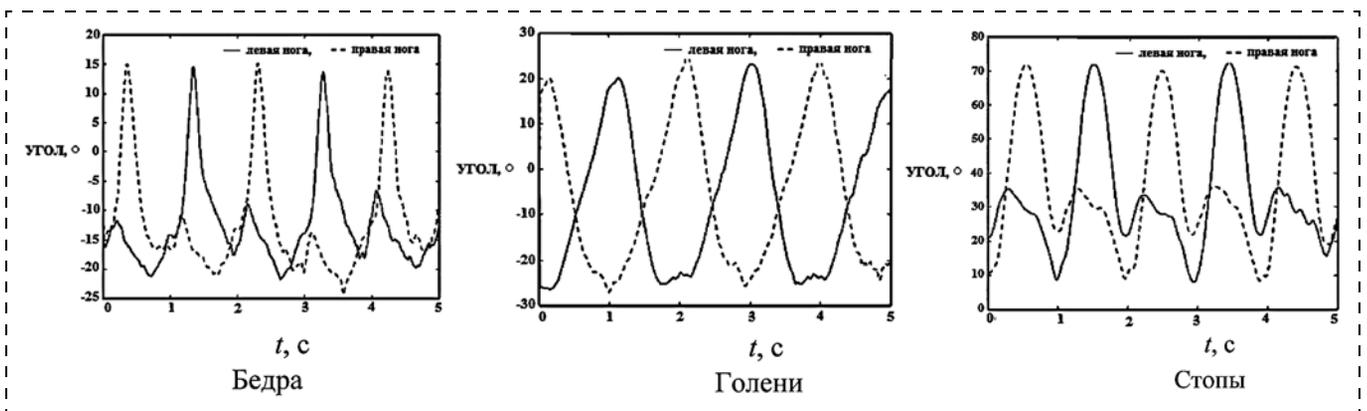


Рис. 3. Законы движения в углах сочленений ног аппарата

при вычислении первой и второй производных (необходимых при решении динамических задач) превращается в шум значительной амплитуды. Здесь в расчете используется специальная фильтрация — оконное преобразование Фурье с функцией окна Ханна, она убирает этот шум:

$$\omega(n) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \right].$$

Фактически, в результате такой фильтрации получаются новые, сглаженные функции углов от времени, которые можно направлять в дальнейшую обработку.

### Решение динамических задач. Учет динамики приводов

Выпишем базовые уравнения движения звеньев экзоскелета [13—23], из которых определяются управляющие моменты.

#### ▲ Одноногая модель

С точки зрения численных расчетов оказывается более удобной запись уравнений движения в рекуррентной форме типа Ньютона—Эйлера. Рассмотрим  $i$ -е звено и жестко связанную с ним систему координат с началом в начале звена. Введем следующие обозначения:  $a_i$  — ускорение центра масс  $i$ -го звена;  $a_i^e$  — ускорение конца звена;  $r_i$  — радиус-вектор от начала звена к центру масс звена;  $r_i^e$  — радиус-вектор от конца звена к центру масс;  $l_i$  — радиус-вектор от начала звена к концу звена;  $I_i$  — тензор инерции. Пусть  $\omega_i$  — угловая скорость;  $\varepsilon_i$  — угловое ускорение;  $F_i$  — сила, приложенная от  $(i-1)$ -го звена к  $i$ -му звену;  $M_i$  — вращающий момент, приложенный от  $(i-1)$ -го звена к  $i$ -му звену. Выразим  $F_i$  и  $M_i$  соответственно (фактически, запишем уравнения общих теорем динамики):

$$F_i = F_{i+1} + m_i a_i - m_i g, \quad (1)$$

$$M_i = I_i \varepsilon_i + M_{i+1} - F_i \times r_i + F_{i+1} \times r_i^e. \quad (2)$$

Заметим,  $F_{N+1} \equiv 0$  и  $M_{N+1} \equiv 0$ , так как нет сил и моментов, действующих на конец последнего звена, кроме уже учтенных.

Угловая скорость  $\omega_i$ , угловое ускорение  $\varepsilon_i$  выражаются через функции походки, найденные в результате видеозахвата:

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \dot{\alpha}_i e_{xi} + \dot{\beta}_i e_{yi} + \dot{\gamma}_i e_{zi}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i-1} + \dot{\omega}_i + \omega_i \times (\dot{\alpha}_i e_{xi} + \dot{\beta}_i e_{yi} + \dot{\gamma}_i e_{zi}). \quad (4)$$

Ускорения звена  $a_i$  и  $a_i^e$  могут быть вычислены по формуле Ривальса:

$$a_i^e = a_{i-1}^e + \varepsilon_i \times l_i + \omega_i \times (\omega_i \times l_i); \quad (5)$$

$$a_i = a_{i-1}^e + \varepsilon_i \times r_i + \omega_i \times (\omega_i \times r_i). \quad (6)$$

Соотношения (1)–(6) представляют полную систему уравнений движения звеньев аппарата. Функции  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  считаются известными по походке функциями от времени. Массовые и инерционные параметры также считаются известными. Тогда  $\omega_i, \varepsilon_i, a_i^e, a_i$  рассчитываются по приведенным выше формулам. Неизвестными остаются  $F_i$  и  $M_i$ , но система уравнений для них разрешается рекуррентно. Выполняется это следующим образом.

*Первый шаг.* При начальных условиях  $\omega_0 \equiv 0, \varepsilon_0 \equiv 0, a_0^e \equiv 0$  используем формулы (5), (6) в порядке возрастания  $i$  от 1 до  $N$ , находим соответственно  $\omega_i, a_i^e, a_i$ .

*Второй шаг.* Используем (1), (2) в порядке убывания  $i$  от  $N$  до 1, находим искомые вращающие моменты в шарнирах  $M_i$  и силы  $F_i$ .

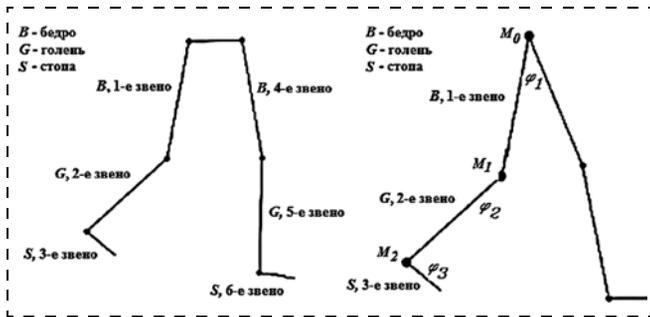


Рис. 4. Структурная модель экзоскелета

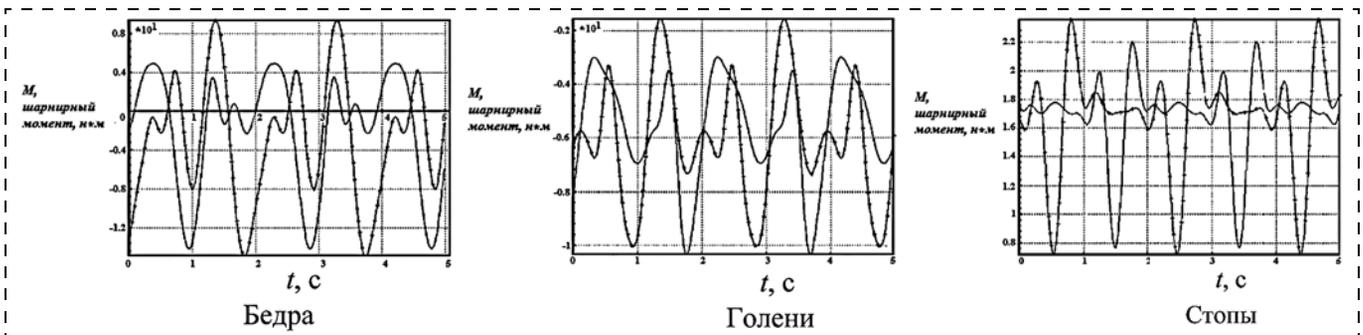


Рис. 5. Управляющие моменты (линия без маркера — для левой ноги; линия с маркером "+" — для правой ноги)

### ▲ Двухногая модель

Рассмотрим следующую модель. Каждая нога является плоской и представляет собой трехзвеновик: бедро, голень, стопа. Обе ноги прикреплены к общему неподвижному звену. Решение обратной динамической задачи выполняется на основе уже найденных решений. Структурная схема связей элементов механизма приведена на рис. 4.

Здесь система уравнений движения на основе допущения о закреплении таза в рассматриваемой модели "подвешенного" экзоскелета (экзоскелет не движется свободно в пространстве) распадается на две независимые подсистемы для правой и левой ног, каждая из которых, фактически, совпадает с уравнениями (1)–(6). Их решения  $M_i$  и  $M_i'$  находятся рекуррентно (нештрихованные переменные — для левой ноги, штрихованные — для правой).

Полученные решения приведены на рис. 5.

После решения обратной динамической задачи строится следящая система и тем самым окончательно синтезируется управление приводами аппарата. Однако, предварительно в ряде случаев выполняется пересчет и контроль величин управляющих моментов с использованием моделей приводов экзоскелета [24–31].

### Модели аппаратов и приводов

Реализованы две модели аппаратов. Одна из них (базовая) построена по строго антропоморфной схеме и управляется обычными электроприводами. Вторая является расширенной и построена по специализированной схеме с управлением от пневмоцилиндров [32], ее движение строится по описанной выше схеме на основе модели "вложенного в экзоскелет" антропоморфного аппарата. Схема с пневмоцилиндрами может реализовываться только на основе пневмоуправления или может строиться как гибридная с управлением и от пневмоприводов, и от электроприводов.

В предлагаемой расчетной схеме решения обратных динамических задач использованы соответствующие модели приводов. Выбраны простые модели, чтобы уменьшить объем вычислений. На основе вычисленных выше управляющих моментов сил строятся программы движения приводов.

Электропривод постоянного тока описывается обычным образом, его уравнение имеет вид

$$M = c_1 U - c_2 \dot{\varphi},$$

где  $M$  — развиваемый двигателем момент (его скалярная величина);  $U$  — управляющее напряжение;  $\varphi$  — угол поворота (вращения) вала двигателя;  $c_1, c_2$  — константные паспортные параметры электродвигателя. В этом уравнении не учтено возможное наличие редуктора и соответственное изменение величин  $M$  и  $\varphi$ , однако при необходимости это легко может быть сделано.

Пневмопривод описывается двумя моделями. Эксперименты показали, что при непрерывном управлении пневмопривод на значительной части хода может быть описан простой линейной моделью зависимости развиваемой силы  $F$  от давления  $P$  в цилиндре

$$F = PS - f_1,$$

где  $S$  — некоторая эффективная рабочая площадь цилиндра;  $f_1$  — потери сил в цилиндре, связанные с трением и другими факторами. Параметры  $S$  и  $f_1$  в достаточно широком классе управлений можно считать константами и определять при калибровке привода. Использовался также режим ШИМ управления рабочим клапаном цилиндра. Аналогичные эксперименты показали, что зависимость развиваемой силы  $F$  от коэффициента заполнения сигнала ШИМ  $\mu$  ( $0 < \mu \leq 1$ ) по давлению в этом случае близка к квадратичной:

$$F = s_1 \mu^2 + s_2 \mu + s_3,$$

где  $s_1, s_2, s_3$  — калибруемые коэффициенты модели. Момент  $M$ , развиваемый приводом в сочленениях, зависит от  $F$  и от схемы закрепления привода на аппарате, он определяется "по месту" для конкретных звеньев.

### Полное управление

Далее строится полное управление моделью экзоскелета. Оно включает два базовых элемента — следящую систему и систему отработки шагательных паттернов с расчетом обратной кинематической задачи (ОКЗ) и обратной динамической задачи (ОДЗ). Вообще, в контур полного управления экзоскелетом предполагается включить три контура управления:

- контур геометрического (кинематического) управления;
- контур динамического (силового) управления;
- контур биотехнического управления (управления по биотехническим, физиологическим) датчикам.

Два первых контура включаются традиционно на основе следящих систем.

### Следящая система. Устойчивость

Полное управление строится по классической схеме линейной следящей ПД-системы. Ее уравнение может быть записано в виде разделенного регулятора для управления  $u$  в виде следящей системы с пропорциональным и дифференциальным членами:

$$u = A(\ddot{q}^p + K_v \dot{e} + K_p e) + b + c, \quad (7)$$

где  $q^p$  — вектор программного движения системы;  $e$  — вектор рассогласования программного и истинного движения системы (ошибка системы);  $A$  — матрица, определяемая массами системы;  $K_v, K_p$  — матрицы коэффициентов;  $b, c$  — компонентные векторы следящей системы. Можно показать, что надлежащим выбором  $K_v, K_p$  можно обеспечить и устойчивость построенной системы регулирования, однако лишь в случае, когда приводы имеют достаточный ресурс по управлению. Эксперименты подтвердили достаточность предложенной схемы.

### 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 сложности его кинематической схемы [33].

Для полного расчета ОКЗ и ОДЗ для контроля усилий, развиваемых силовыми цилиндрами, реализована полная динамическая модель комплекса в программном пакете "Универсальный Механизм", объединенном со средствами пакета *MATLAB-Simulink* [34—35].

Программное обеспечение комплекса использует систему на базе модульной микроконтроллерной системы "РОБОКОН" (на основе микроконтроллеров PIC) управления роботами авторской разработки ИПМ им. М. В. Келдыша РАН [26, 27]. 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 телеметрию.

### Вычислительная нагрузка

Основная проблема реализации следящего управления в бортовом варианте заключается в сложной вычислительной нагрузке, которая ложится на бортовой микрокомпьютер. В данной задаче требуются постоянные вычисления матрицы  $A$  и векторов  $b$  и  $c$  в соотношении (7).

Оценка показывает, что для этого в момент времени  $t$  при заданных  $q$  потребуется не более 500 арифметических операций с плавающей точкой. Считается, что для точного управления моделью достаточно корректировать управление примерно 100...200 раз в секунду. Следовательно, суммарное число арифметических операций в секунду достигнет приемлемых 50 000...100 000.

### Заключение

Реализован комплекс решений для задачи управления биомехатронным экзоскелетом с учетом кинематики и динамики аппарата. На основе технологии видеозахвата строятся кинематические схемы походок, набор походок можно расширять.

Обоснована вычислительная эффективность выбора схемы управления для следящей системы при реализации на управляющих микрокомпьютерах. Построены схемы расчета с выбором параметров для следящей системы. Рассмотрен вопрос выбора параметров следящей системы. В программной среде *"Универсальный Механизм"* проверено, что выбранное управление эффективно реализует заданное программное движение при воздействии внешних возмущений.

Выполненные эксперименты (пример приведен на рис. 1) показали адекватность созданного комплекса поставленной задаче. Сформированные численно-аналитические модели позволяют эффективно рассчитывать законы управления приводами комплекса. В настоящее время подготавливается серия конкретных натуральных экспериментов на комплексе.

В целом можно сказать, что предлагаемая работа как биомехатронное исследование объединила в разработке реабилитационных комплексов существенные задачи механики, информатики, биомедицины, электроники. В работе показаны способы их решения.

### Список литературы

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-Митутцева Л., Никитин О. А., Сербенюк Н. С., Трифионов О. В., Ярошевский В. С. Биомехатронные элементы стимулятора стопы человека // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 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. P. 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 // Proc. of Inter. Conf. "PRAKTRO 2007", 12—15 June 2007. Varna, 2007. P. 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. 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. 2012. № 12. С. 37—45.

9. Алисейчик А. П., Орлов И. А., Дейнего В. Ю., Павловский В. Е., Платонов А. К. Биомехатронный исследовательский комплекс для двигательной нейрореабилитации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 12. С. 53—58.

10. Головин В. Ф., Павловский В. Е. Новые направления в медицинской и сервисной робототехнике: по материалам международной конференции MESROB 2013 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 10. С. 15—21.

11. 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 // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2014. № 111. 19 с.

12. Павловский В. Е., Птахин А. А. Обратная динамическая задача двуногой ходьбы на основе видеозахвата движения // Тез. Научной конференции "Ломоносовские Чтения. Секция механики". 14—23 апреля 2014 года. Москва, ИМ МГУ. М.: ИМ МГУ, 2014. С. 116—117.

13. Павловский В. Е., Платонов А. К., Алисейчик А. П., Орлов И. А., Павловский В. В., Птахин А. А. Нейрореабилитационный комплекс: структура, управление движением экзоскелетных модулей // Тр. Конференции "Вибрация—2014". Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины. 14—16.05.2014. Курск, ЮЗГУ. Т. 2. С. 312—322.

14. Павловский В. Е., Платонов А. К., Алисейчик А. П., Орлов И. А., Птахин А. А. Биомехатронный нейрореабилитационный комплекс для лечебных и исследовательских задач // Тр. второй Междунар. конф. "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений" (Proc. ITIDS + RRS'2014), 18—21 мая 2014, Уфа, Россия. Т. 2. С. 221—227.

15. Павловский В. Е., Платонов А. К., Алисейчик А. П., Орлов И. А. Биомехатронный комплекс нейрореабилитации — конструкция, модели и управление // Тр. XII Всеросс. совещания по проблемам управления. 16—19 июня 2014. ИПУ РАН. С. 3671—3680.

16. Алисейчик А. П., Орлов И. А., Павловский В. Е., Платонов А. К., Птахин А. А. Синтез антропоморфной ходьбы для специальных экзоскелетов // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. "Экстремальная робототехника" (2014). 2014. С. 116—120.

17. Aliseychik A. P., Orlov I. A., Pavlovsky V. E., Platonov A. K., Ptakhin A. A. Anthropomorphic Walking Design for Special Exoskeletons // Тр. Международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника" (2014) / Proc. of the International Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics". Изд-во "Политехника-Сервис", 2014. С. 121—125.

18. Orlov I. A., Aliseychik A. P., Platonov A. K., Ptakhin A. A., Pavlovsky V. E. Biomechatronic Neurorehabilitation Complex Design, Models and Control // Proc. 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics. 791—796. 2014. August 12—15, Sao Paulo, Brazil.

19. Ptakhin A., Aliseychik A., Orlov I., Pavlovsky V. Anthropomorphic Walking Design for Special Exoskeletons // Proceedings of the RAAD 2014 — 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, September 3—5, 2014, Smolenice Castle, Slovakia.

20. Sokolov S. M., Platonov A. K., Boguslavskiy A. A., Triphonov O. V. Computer Vision System as Part of Bio-mechatronic Rehabilitation Simulator // Robot Intelligence Technology and Applications 2 (Springer Series: Advances in Intelligent Systems and Computing), Ed. Kim J.-H. et al. Vol. 274. 2014. P. 647—656.

21. Соколов С. М., Платонов А. К., Богуславский А. А., Трифионов О. В. Система технического зрения в составе биомехатронного тренажера // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2014. № 42. 19 с.

22. Комплекс для локомоторной тренировки РООИ "ОРБИТА". URL: <http://orbital-rt.ru/index.php/kompleks>

23. 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 РАН, ISSN 2071—2898 (печатная версия). 2012. № 16. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-16>

24. Гурфинкель В. С., Левик Ю. С., Казенников О. В., Се-  
лионов В. А. Существует ли генератор шагательных движений у  
человека? // Физиология человека. 1998. Т. 24. № 3. С. 42.

25. 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.

26. Павловский В. Е., Павловский В. В. Модульная микро-  
контроллерная система управления роботами РОБОКОН-1.  
Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, ISSN 2071–2898  
(печатная версия). 2012. № 86. 32 с. URL: [http://library.keldysh.ru/  
preprint.asp?id=2012-86](http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-86)

27. Павловский В. Е., Павловский В. В. Масштабируемая  
система управления роботами РОБОКОН-1 // Информационно-  
измерительные и управляющие системы. 2013. № 4. С. 80–92.

28. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные  
механизмы. М.: Мир, 1976.

29. Москаленко В. В. Электрический привод. М.: Академия,  
2007. 368 с.

30. Башта Т. М., Руднев С. С., Некрасов Б. Б. и др. Гидрав-  
лика, гидравлические машины и гидравлические приводы /  
Под ред. Т. М. Башты. М.: Машиностроение, 1970. 504 с.

31. Схиртладзе А. Г., Иванов В. И., Кареев В. Н. Гидравли-  
ческие и пневматические системы. М.: ИЦ МГТУ "Станкин",  
"Янус-К", 2003. 544 с.

32. URL: <http://www.pneumax.ru/>

33. Дубровский В. И., Федорова В. Н. Биомеханика: Учеб.  
для сред. и высш. учеб. заведений. М.: Изд-во ВЛАДОС-  
ПРЕСС, 2003. 672 с.

34. Погорелов Д. Ю. О численных методах моделирования  
движения систем твердых тел // Журнал вычислительной мате-  
матики и математической физики. 1995. № 4. С. 501–506.

35. Simulink R2012b Documentation [Online]. URL: [http://  
www.mathworks.com/help/physmod/sdl/ref/genericengine.html](http://www.mathworks.com/help/physmod/sdl/ref/genericengine.html)

## BioMech Rehabilitation Exoskeleton: Models, Control, Design, Experiments

A. P. Aliseychik, atooxa@gmail.com, I. A. Orlov, i.orlov@keldysh.ru,  
E. Yu. Kolesnichenko, decstrela@mail.ru, V. E. Pavlovsky, vlpavl@mail.ru✉,  
V. V. Pavlovsky, vlpavl2000@mail.ru✉, A. K. Platonov, akp31mail@gmail.com,  
Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow, 125047, Russian Federation

Corresponding author: Pavlovsky Vladimir E., D. Sc., Leading Researcher,  
Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow, 125047, Russian Federation,  
e-mail: vlpavl@mail.ru

Received on May 25, 2016

Accepted on June 04, 2016

*The work presents a technical robotized system for support of the neurorehabilitation procedures — BioMech rehabilitation exoskeleton. The device is an improvement of the first versions published in [8, 9]. The work presents the tasks of the theoretical-mechanical description of the robotized exoskeletons of the lower extremities, dynamic modeling of such systems, and development of the control systems. For the considered biped system the following problems were investigated: kinematic synthesis of walking on the basis of the technology of video capture of the motion, solution of the direct and inverse dynamic tasks for finding of the operating torques of forces, synthesis of a full control system, verification of the found solutions by means of physical and natural modeling, creation of an adequate control system of drives for realization of the set movement. The objectives were investigated within the framework of development of a biomechatronic complex for neurorehabilitation of the motive device of human lower extremities.*

**Keywords:** exoskeleton, biomechanics, rehabilitation and research complex, verticalizer, pulse control, pneumatic actuator, electric drive, hybrid drive

**Acknowledgements:** The work was performed as part of the grant RFBR № 11-01-12060-ofi-m-2011 in 2011-2012., Developed with the support of RFBR grant 13-01-12037-ofi-m, 16-29-08406-ofi-m  
For citation:

Aliseychik A. P., Orlov I. A., Kolesnichenko E. Yu., Pavlovsky V. E.,  
Pavlovsky V. V., Platonov A. K. BioMech Rehabilitation Exoskeleton:  
Models, Control, Design, Experiments, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 670–677.

DOI: 10.17587/mau/17.670-677

### References

1. *Tsentr aviakosmicheskoi meditsiny* (Center of Aerospace Medicine), available at: <http://amc-si.com/index.php?thread=24>

2. *Imitator opornoi nagruzki podoshvennyi "Korvii"* (Load Simulator supporting plantar "Corvo"), available at: <http://diasled.ru/korvit>

3. Platonov A. K., Gerasimenko Yu. P., Ilieva-Mitutseva L., Nikitin O. A., Serbenyuk N. S., Trifonov O. V., Yaroshevskii V. S. *Biomekhatronnye elementy stimulyatora stopy cheloveka* (Bioelectronic elements of the human foot stimulator), Preprinty IPM im. M. V. Keldysha RAN, 2011, no. 38, 32 p., available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-38>

4. Platonov A., Mitutseva L., Delchev K., Vitkov V., Chavdarov I., Latkovski V., Yaroshevsky V., Nikitin O. Development of a mecha-

tronic system "GAITSIM" for biomechanical rehabilitation of patients paraplegics, *Engineering Mechanics*, 2007, vol. 14/4, pp. 249–258.

5. Platonov A., Ilieva-Mitutseva L., Nikitin O., Chavdarov I., Delchev K., Vitkov V., Yaroshevsky V., Serbenyuk N., Gerasimenko Y. Design of mechatronic system for foot receptor activation intended to improve rehabilitation of paraplegic patients, *Proc. of Inter. Conf. "PRAKTRO 2007"*, 12–15 June 2007, Varna, 2007, pp. 19–24.

6. *Kompaniya ORMED*, available at: [http://www.djoglobal.de/  
arzt/artromot-kl.html](http://www.djoglobal.de/arzt/artromot-kl.html)

7. *Trenazher LOCORMAT*, available at: [http://www.hocoma.com/  
products/lokomat/](http://www.hocoma.com/products/lokomat/)

8. Grishin A. A., Gerasimenko Yu. P., Moshonkina T. R., Pavlovskii V. E., Platonov A. K., Serbenyuk N. S. *Biomekhatronika i lechebno-issledovatel'skie trenazhery: kontseptual'nye i mediko-biologicheskie osnovy* (Mechatronics and medical research simulators: conceptual and biomedical bases), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 12, pp. 37–45.

9. Aliseychik A. P., Oplov I. A., Deinego V. Yu., Pavlovskii V. E., Platonov A. K. *Biomekhatronnyi issledovatel'skii kompleks dlya dvigatel'noi neipopeabilitatsii* (Biomechatronny research facility for motor neypopeabilitatsii), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 12, pp. 53–58.

10. Golovin V. F., Pavlovskii V. E. *Novye napravleniya v meditsinskoj i servisnoj robototekhnike: po materialam mezhdunarodnoi konferentsii MESROB 2013* (New trends in medical and service robotics:

materials of an international conference in 2013 MESROB), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 10, pp. 15–21.

11. **Pavlovskii V. E., Platonov A. K., Aliseichik A. P., Orlov I. A., Pavlovskii V. V., Ptakhin A. A.** *Biomekhatronnyi kompleks neuroreabilitatsii — kontseptsiya, konstruktziya, modeli i upravlenie* (Bio mechatronic complex neurorehabilitation — concept, design, and management model), *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha RAN*, 2014, no. 111, 19 p.

12. **Pavlovskii V. E., Ptakhin A. A.** *Obratnaya dinamicheskaya zadacha dvunogoi khod'by na osnove videozakhvata dvizheniya* (Contact dynamic problem biped walking based on motion capture), *Tez. Nauchnoi konferentsii "Lomonosovskie Chteniya. Sektsiya mekhaniki"*, 14–23 april 2014, Moscow, IM MGU, 2014, pp. 116–117.

13. **Pavlovskii V. E., Platonov A. K., Aliseichik A. P., Orlov I. A., Pavlovskii V. V., Ptakhin A. A.** *Neiroreabilitatsionnyi kompleks: struktura, upravlenie dvizheniem ekzoskeletnykh modulei* (Neuroreabilitatsionny complex: structure, motion control modules exoskeletal), *Tr. Konferentsii "Vibratsiya—2014". Vibratsionnye tekhnologii, mekhatronika i upravlyaemye mashiny*, 14–16.05.2014, Kursk, YuZGU, 2014, 2, pp. 312–322.

14. **Pavlovskii V. E., Platonov A. K., Aliseichik A. P., Orlov I. A., Ptakhin A. A.** *Biomekhatronnyi neuroreabilitatsionnyi kompleks dlya lechebnykh i issledovatel'skikh zadach* (Bioelectronic rehabilitation center for teaching and research tasks), *Tr. vtoroi Mezhdunar. konf. "Informatsionnye tekhnologii intellektual'noi podderzhki prinyatiya reshenii" (Proc. ITIDS + RRS'2014)*, 18–21 maya 2014, Ufa, Rossiya, vol. 2, pp. 221–227.

15. **Pavlovskii V. E., Platonov A. K., Aliseichik A. P., Orlov I. A.** *Biomekhatronnyi kompleks neuroreabilitatsii — konstruktziya, modeli i upravlenie* (Bio mechatronic complex neurorehabilitation — design model and management), *Tr. XII Vseross. soveshchaniya po problemam upravleniya. 16–19 iyunya 2014*, IPU RAN, pp. 3671–3680.

16. **Aliseichik A. P., Orlov I. A., Pavlovskii V. E., Platonov A. K., Ptakhin A. A.** *Sintez antropomorfnoi khod'by dlya spetsial'nykh ekzoskeletonov* (Synthesis anthropomorphic exoskeleton walk for special), *Tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Ekstremal'naya robototekhnika"*, 2014, pp. 116–120.

17. **Aliseychik A. P., Orlov I. A., Pavlovskiy V. E., Platonov A. K., Ptakhin A. A.** *Anthropomorphic Walking Design for Special Exoskeletons*, *Proc. of the International Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics"*, Politehnika-Servis, 2014, pp. 121–125.

18. **Orlov I. A., Aliseychik A. P., Platonov A. K., Ptakhin A. A., Pavlovskiy V. E.** *Biomechatronic Neurorehabilitation Complex Design, Models and Control*, *Proc. 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 791–796, 2014, August 12–15, Sao Paulo, Brazil.

19. **Ptakhin A., Aliseychik A., Orlov I., Pavlovskiy V.** *Anthropomorphic Walking Design for Special Exoskeletons*, *Proceedings of the RAAD 2014 — 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region*, September 3–5, 2014, Smolenice Castle, Slovakia.

20. **Sokolov S. M., Platonov A. K., Boguslavskiy A. A., Triphonov O. V.** *Computer Vision System as Part of Bio-mechatronic Rehabilitation Simulator*, *Robot Intelligence Technology and Applications 2*

(*Springer Series: Advances in Intelligent Systems and Computing*), Ed. Kim J.-H. et al. 2014, vol. 274, pp. 647–656.

21. **Sokolov S. M., Platonov A. K., Boguslavskii A. A., Trifonov O. V.** *Sistema tekhnicheskogo zreniya v sostave biomekhatronnogo trenazhera* (vision system composed bioelectronic simulator), *Preprint IPM im. M. V. Keldysha RAN*, 2014, no. 42, 19 p.

22. **Kompleks dlya lokomotorni trenirovki ROOI "ORBITA"** (Complex for locomotor training ROOI "ORBIT"), available at: <http://orbita-rt.ru/index.php/kompleks>

23. **Platonov A. K., Pavlovskii V. E., Serbenyuk N. S., Grishin A. A., Gerasimenko Yu. P., Moshonkina T. R.** *Biomekhatronika lechebno-issledovatel'skogo trenazhera-krovati* (Mechatronics medical research simulator beds), *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha RAN*, ISSN 2071–2898 (pechatnaya versiya), 2012, no. 16, 32 p. available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-16>

24. **Gurfinkel' V. S., Levik Yu. S., Kazennikov O. V., Selionov V. A.** *Sushchestvuet li generator shagatel'nykh dvizhenii u cheloveka?* (There Generator stepping movements in man?), *Fiziologiya Cheloveka*, 1998, vol. 24, no. 3, pp. 42.

25. **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, vol. 101, pp. 2847.

26. **Pavlovskii V. E., Pavlovskii V. V.** *Modul'naya mikrokontroller'naya sistema upravleniya robotami ROBOKON-1*. *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha RAN, ISSN 2071-2898 (pechatnaya versiya)* (Modular control system microcontroller robots ROBOKON-1. Preprints IPM RAS Keldysh, ISSN 2071-2898 (printed version)), 2012, no. 86, 32 p., available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-86>

27. **Pavlovskii V. E., Pavlovskii V. V.** *Masshtabiruemaya sistema upravleniya robotami ROBOKON-1* (Scalable Control System robot Robocop-1), *Informatsionno-Izmeritel'nye I Upravlyayushchie Sistemy*, 2013, no. 4, pp. 80–92.

28. **Vukobratovich M.** *Shagayushchie roboty i antropomorfnye mekhanizmy* (Walking robots and anthropomorphic mechanisms), Moscow, Mir, 1976.

29. **Moskalenko V. V.** *Elektricheskii privod* (Electric drive), Moscow Akademiya, 2007, 368 p.

30. **Bashta T. M., Rudnev S. S., Nekrasov B. B.** i dr. *Gidravlika, gidravlicheskie mashiny i gidravlicheskie privody* (Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic actuators), Moscow, Mashinostroenie, 1970, 504 p.

31. **Skhirtladze A. G., Ivanov V. I., Kareev V. N.** *Gidravlicheskie i pnevmaticheskie sistemy* (Hydraulic and pneumatic systems), Moscow, ITs MGTU "Stankin", "Yanus-K", 2003, 544 p.

32. Available at: <http://www.pneumax.ru/>

33. **Dubrovskii V. I., Fedorova V. N.** *Biomekhanika: Ucheb. dlya sred. i vyssh. ucheb. zavedenii* (Biomechanics: Proc. for medium and higher. Textbook, institutions), Moscow, VLADOS-PRESS, 2003, 672 p.

34. **Pogorelov D. Yu.** *O chislennykh metodakh modelirovaniya dvizheniya sistem tverdykh tel* (On numerical methods of solid bodies system motion simulation), *Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki*, 1995, no. 4, pp. 501–506.

35. **Simulink R2012b Documentation** [Online], available at: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sdl/ref/genericengine.html>



С 16 по 18 ноября 2016 г. в г. Тула на базе Тульского ГУ состоится  
Международная научно-техническая конференция

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ (Интеллект 2016)



### ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ, ПЛАНИРУЕМЫЕ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ

- Интеллектуальные системы поддержки принятия решений.
- Управление параллельными и распределенными информационными процессами.
- Методы цифровой обработки сигналов и изображений.
- Системы классификации и распознавания образов.
- Когнитивные технологии.
- Роевые технологии.

Подробную информацию о конференции см. на сайте:  
<http://tsu.tula.ru/science/conferences/>