

МОДЕЛЬ РЕАБИЛИТАЦИОННОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА С ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-ЭЛАСТИЧНЫМИ МОДУЛЯМИ, ОБУЧАЕМЫМИ НЕЧЕТКО-НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ

А. В. Чигарев¹, М. Г. Ботогова²

^{1,2} *Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

Введение. Реабилитация систем и органов человека, например после инсульта, представляет собой поэтапный процесс, когда восстановление функций движения начинается с восстановления функций стопы, колена, ноги, кисти, руки и т. д. вплоть до восстановления двигательных функций опорно-двигательной системы в целом [1–4]. Это обуславливает разработку модульной структуры экзоскелета, и это означает, что экзоскелет должен быть собран из модулей, с которыми пациент уже тренировался на предыдущих этапах последовательной реабилитации.

Регулирование жесткости звеньев модулей, составляющих экзоскелет, позволяет создать интерфейс устройства, комфортный для реабилитируемого, не только с физиологической точки зрения, но и с технической.

Мягкие роботы и экзоскелеты, их гибриды, незаменимы во многих отраслях промышленности и медицины [6; 7]. Модульная конструкция экзоскелета позволяет использовать при проектировании и изготовлении модулей методы, хорошо работающие в машиностроении при создании разнообразных машин различного назначения. Для стержневой модели экзоскелета базовой задачей является создание стержней конечной длины, жесткость которых может регулироваться от практически нулевой до практически бесконечной. В рамках чисто механической модели такие стержневые структуры актуаторов возможно создать с использованием методов пневмогидравлики, однако мировая практика показывает, что в большинстве машин, не требующих больших усилий, идет замена гидроприводов на электромагнитоприводы, имеющих, как правило, меньшие габариты, экологически и экономически более приемлемые [8; 9]. Известно, что под действием электрического, магнитного поля жесткость магнитных, электроупругих материалов может меняться на порядок и более, что позволяет реально создавать конструктивные элементы экзоскелета с регулируемой жесткостью [10–14]. Регулирование жесткости элементов модулей и управление их перемещениями в автоматическом режиме требует разработки алгоритмов адаптивного типа, использующих информацию, получаемую по обратной связи.

Из этого следует, что нейросетевые алгоритмы самообучения в процессе функционирования являются логически целесообразной частью бионического экзоскелета. В качестве необходимой компоненты экзоскелета

наряду с актуаторной частью необходима сенсорная система с чувствительными датчиками нервно-мышечных импульсов пациента и различных датчиков положения, скорости, ускорения, силы, момента силы экзоскелета [15–18]. В процессе адаптации экзоскелета к конкретному человеку эти данные должны обрабатываться программой идентификации нервно-мышечной-костной системы человека и экзоскелета, а также их совместной модели по схеме модели оператор – машина.

Вертикальное положение экзоскелета является неустойчивым (перевернутый маятник) как и человека. Устойчивость двуногой походки человека [19; 20] в гравитационном поле достигается за счет наличия распределенной сети мотонейронов, обученной и обучающейся в процессе жизнедеятельности. Регулирование перемещения неустойчивой двуногой системы реализуется по схеме конфигурируемого управления [20].

В последние десятилетия интенсивно создаются и исследуются полимерные и композитные материалы, физико-механические свойства которых изменяются под влиянием магнитных, электрических полей. Созданы высокоэластичные (гипоупругие) матрицы с наполнителями из микро наноскопических частиц на основе железа. Они занимают промежуточное положение между твердыми реомагнитными композитами и магнитореологическими жидкостями. При наложении внешнего магнитного поля вследствие поляризации магнитных частиц и взаимодействии индуцированных диполей происходит структурная перестройка, что на макроуровне выражается в увеличении материальных коэффициентов (модулей упругости) в $10\text{--}10^2$ раз и более [10–14].

Установлено, что полученный композитный материал имеет эффективные упругие модули (модуль сдвига), которые при наложении магнитного поля увеличиваются на 1000 % [10]. При снятии внешнего магнитного поля образец возвращался в исходное состояние практически без необратимых деформаций, что является следствием достаточно высокой упругости матрицы, возвращающей конфигурацию частиц в начальное положение (хаотическая ориентация). В качестве элементарного мягкого конструктивного элемента экзоскелета целесообразно взять мембранный элемент типа цилиндрической оболочки, длина которой значительно больше ее ширины, созданного из мягкой прочной ткани. В оболочку помещается другая оболочка, заполненная композитным материалом, заключенным в проволочную катушку, по которой от аккумулятора проходит электрический ток. В результате создается магнитное поле, под действием которого мембранная оболочка, заполненная магнитным полимером, приобретает жесткость, необходимую для использования в конструкции. Эффективные жесткости (упругие модули) такого композита вычисляются каким-либо из известных методов [21]. При наложении внешнего магнитного поля частицы наполнителя упорядочиваются в соответствии с вектором магнитного потока внешнего поля. В случае если матрица жидкая или жидкоподобная, то хаотическое (изотропное) распределение частиц в отсутствие поля

трансформируется при наложении магнитного поля в упорядоченную структуру. Таким образом, имеются композитные материалы, которые могут быть использованы для создания модулей мягкого робота с регулируемой жесткостью.

Соленоидальная модель мягкого стержня с регулируемой жесткостью позволяет конструировать модули экзоскелета, выполняющие определенные реабилитационные функции в рабочем состоянии при наложенном внешнем магнитном поле и при выключении поля становящимися мягкими, не требующими их сжимать. Мягкий экзоскелет в нерабочем состоянии компактный и представляет собой вид одежды, не требующей при ее использовании одевать и снимать многократно. Компоненты скелета конструктивно должны давать возможность создавать из них модули скелета типа кинематических пар реберно-плечевых, ножно-тазовых и других элементов. Использование железных порошков в качестве наполнителя полимеров делает вес экзоскелета достаточно большим, однако в процентном содержании по объему не превышает 30 %. Создание пористых порошков помогает снизить вес модулей экзоскелета. В любом случае экзоскелеты с металлическим каркасом имеют вес и стоимость намного больше. Их комфортность при использовании в реабилитационных процедурах пока далека от идеала [1; 2]. Создание комфортных экзоскелетов разного назначения, в том числе универсальных, возможен на путях использования их в виде мягкой одежды, меняющей свои свойства в процессе использования в зависимости от решаемых проблем (тепловая регуляция, защита от ветра, осадков и т. д.).

Модели управления устойчивостью вертикального положения экзоскелета при циркульной ходьбе. Рассматривается одна из возможных конструкций, а не конкретно разработанная авторами. При включении магнитного поля стержни приобретают жесткость, необходимую для поддержания устойчивости вертикального положения. На рисунке 1 изображена одна из возможных схем конструкции экзоскелета: нижние конечности представляют собой брюки, плотно облегающие ноги и имеющие по 4 магнитореологических стержня. В рабочем состоянии при включенном магнитном поле стержни приобретают жесткость и заменяют кости ног. Вверху стержни крепятся к поясу, а внизу крепятся к двум четырехколесным платформам, на которых они и ступни закрепляются по типу роликовых коньков. Колеса платформы приводятся в движение с помощью электродвигателей от аккумуляторов, закрепленных на платформах.

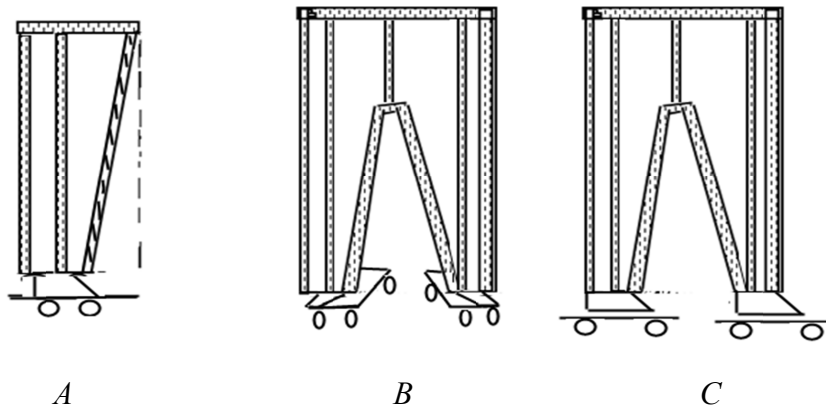


Рис. 1. Схема нижних конечностей для циркульной ходьбы. Штрихованные полосы обозначают электромагнитные стержни в рабочем состоянии:

A – вид сбоку в сагиттальной плоскости; *B* – вид во фронтальной плоскости;
C – вид сбоку для схемы циркульной ходьбы [7]

Три положения экзоскелета, изображенные на рисунке 1, должны обладать устойчивостью и управляемостью в статике и динамике [9].

Рассмотрим упрощенную математическую модель модуля нижних конечностей экзоскелета для тренировки циркульной ходьбе [22]: считается, что ноги находятся в одной плоскости, т. е. пространственная 3D модель аппроксимируется 2D моделью; соответственно четырех-стержневые брюки заменены одно-стержневыми, проходящими через центр масс сечения ног; стержни невесомые, жесткие, массы сосредоточены в точках на невесомых стержнях; масса корпуса сосредоточена в точке m_H (рисунок 2); тележки невесомые, их перемещения и фиксация управляются компьютером, закрепленным в точке m_H .

В начальный момент геометрические центры тележек находятся в точке $(0, 0)$ с заблокированными колесами. Затем одна из тележек продвигается на полшага вперед и блокируется, вторая продвигается вперед от нее на полшага и блокируется, первая продвигается на шаг и блокируется. Таким образом, реализуется циркульная ходьба. На рисунке 2 длины ног равны $l = a + b$, где b – расстояние от m_H до m .

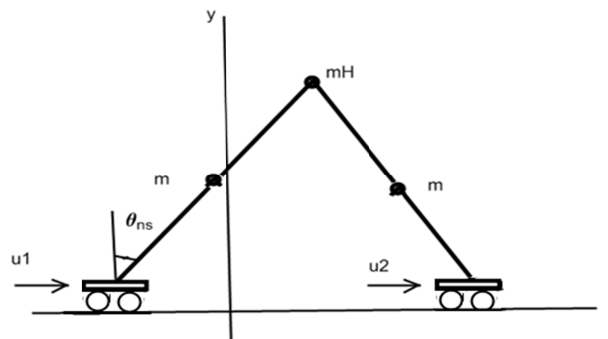


Рис. 2. Схема упрощенной 2D математической модели нижних конечностей экзоскелета

Уравнения динамики получаются с использованием уравнений Лагранжа 2-го рода и имеют вид [22]:

$$\begin{cases} -\ddot{\theta}_{ns} m l b \cos(\theta_s - \theta_{ns}) + \dot{\theta}_{ns}^2 m l b \sin(\theta_s - \theta_{ns}) + \\ + \ddot{\theta}_s (m_H l^2 + m(l^2 + a^2)) - m_H g l \sin \theta_s - m g a \sin \theta_s - m g l \sin \theta_s = u_1, \\ -\ddot{\theta}_{ns} m b^2 - \ddot{\theta}_s m l b \cos(\theta_s - \theta_{ns}) + \dot{\theta}_s^2 m l b \sin(\theta_s - \theta_{ns}) - m g b \sin \theta_{ns} = u_2. \end{cases} \quad (1)$$

Платформы могут быть колесного типа, колесно-шагающего типа, шарового типа. Колесного типа платформы, их конструкция, динамика рассмотрены в [9].

Более подробно рассмотрим вопросы устойчивости модели экзоскелета для колесной платформы. Уравнения динамики платформы нелинейные и их исследование на устойчивость и управляемость отдельно от экзоскелета может быть выполнена методами теории устойчивости движения тележки по плоскости. На основе этих исследований выбираются конструктивные параметры и управляющие алгоритмы [9]. Однако при установке экзоскелета вместе с оператором реабилитируемым на платформы получается система новой конфигурации, для которой вопросы устойчивости и управляемости формулируются заново.

Начало восстановления функций вертикальной циркульной ходьбы с помощью модуля нижних конечностей экзоскелета начинается с восстановления функций мотонейронов совместно с вестибулярной системой. Поддержка вертикального положения за счет управляемых движений изображена на рисунок 3. Эта проблема является обобщением задачи об устойчивости перевернутого маятника на подвижной регулируемой платформе [16].

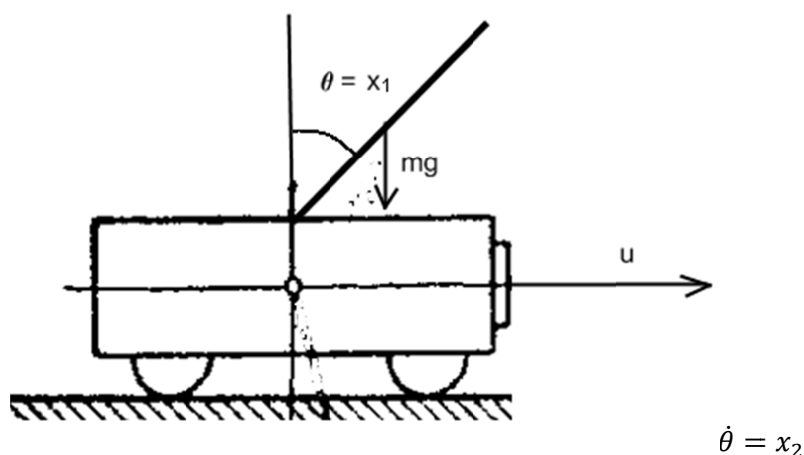


Рис. 3. Схема одной конечности экзоскелета, сохраняющего устойчивость за счет управления тележкой (вертикальный маятник)

Уравнения модели динамики записываются в виде [16]

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= \frac{3 \left[g \sin x_1 (m_c + m) - m l x_2^2 \cos x_1 \sin x_1 + u \cos x_1 \right]}{l (4(m_c + m) - 3m \cos^2 x_1)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения;

m_c – масса тележки;

m – масса маятника;

l – половина длины маятника;

u – управление.

В случае если стержень двухзвенный и имеет соединительный шарнир, то упрощенная 2D модель имеет вид [20]:

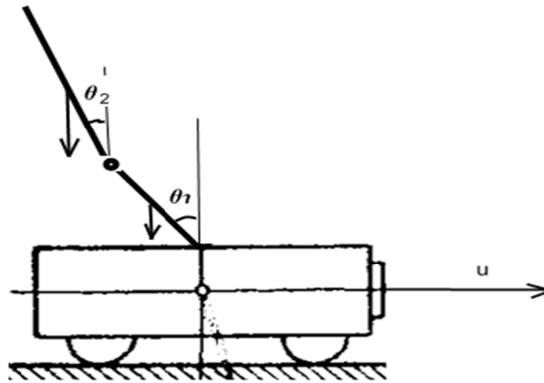


Рис. 4. Схема для управления устойчивостью двухзвенного стержня (конечности) экзоскелета

$$r_3 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) + r_6 \ddot{\theta}_2 - r_3 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + r_3 \ddot{u} \cos(\theta_2) - d_2 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) = r_3 \sin(\theta_2), \quad (3)$$

$$r_3 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + r_4 \ddot{\theta}_1 + r_5 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + r_2 \ddot{u} \cos(\theta_1) + d_2 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + d_1 \dot{\theta}_1 = r_7 \sin(\theta_1)$$

$$r_2 = m_1 l_1 + m_2 l_3, \quad r_3 = m_2 l_2, \quad r_4 = J_1^{(s)} + m_1 l_1^2 + m_2 l_3^2, \quad r_6 = J_2^{(s)} + m_2 l_2^2,$$

$$r_7 = g(m_1 l_1 + m_2 l_2), \quad r_8 = g m_2 l_2, \quad k_v = \dot{u} / v^*,$$

где m_1, m_2 – массы маятников;

l_1, l_2 – расстояния центров масс маятников от осей вращения;

l_3 – расстояния между осями;

$J_1^{(s)}, J_2^{(s)}$ – моменты инерции маятников относительно центров масс;

d_1, d_2 – коэффициенты трения в шарнирах маятников;

k_v – статическое усиление регулирования количества оборотов;

v^* – постоянная во времени регулирования количества оборотов.

Таким образом, в принципе возможно построение математических моделей для решения задач устойчивости и управления, а также разработки на их основе алгоритмов и программ обучения мотонейронов человека при реабилитации двигательных способностей к циркульной ходьбе.

Одной из задач, которой должен быть обучен реабилитируемый пациент – это построение и реализация траектории движения к выбранной цели. Эта задача известна как задача парковки грузовиков. Она также может быть решена на основе построения модуля нейро-нечеткого управления, причем в этом случае требуется использовать уравнения динамики грузовика на плоскости xoy (рисунок 5)

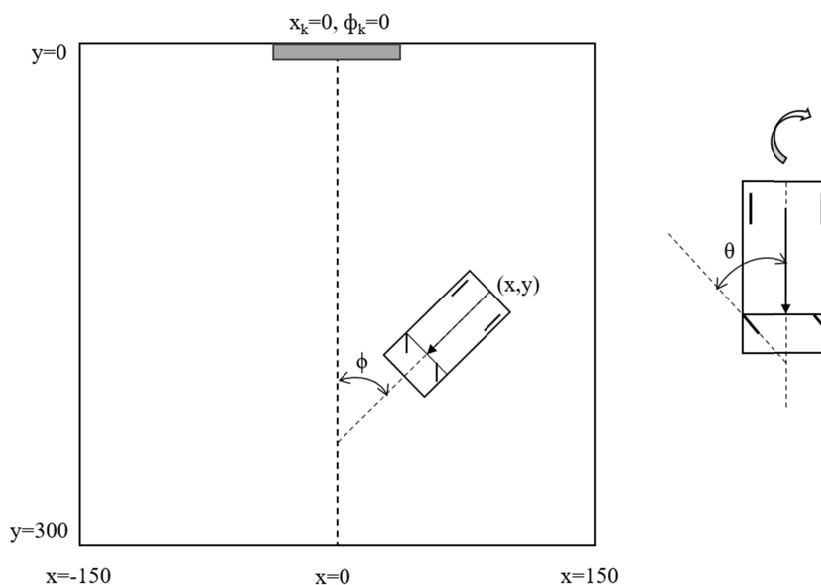


Рис. 5. Схема управляемого движения тележки к заданной локации

Уравнения движения могут быть записаны в виде безразмерной системы нелинейных уравнений, отнесенных к длине платформы [19]

$$\begin{aligned} x(t+1) &= x(t)[1 + \sin[t+1] - \sin t \cdot \cos t], \\ y(t+1) &= y(t)[1 - \cos[t+1] - \sin t \cdot \sin t]. \end{aligned} \quad (4)$$

В случае экзоскелета задача естественно усложняется, т. к. эта задача будет парковки двух грузовиков, которые могут двигаться в различном режиме по параллельным траекториям.

Применение нечетко-нейронных алгоритмов в экзоскелете. Математическое моделирование, дает, как правило, достаточно надежные инструменты изучения различных явлений. Это относится в первую очередь к моделям, полученным на основе вариационных принципов. Полученные нелинейные модели вызывают известные трудности при их применении. Во многих случаях оказывается эффективным применение методов эвристического моделирования [23], а также гибридных подходов, сочетающих применение на начальных этапах решения эвристического моделирования

с разработкой математических моделей на этапах детализации, конкретизирующих решения задачи.

Однако, возможны другие подходы к решению задачи, не требующие создания математических моделей. Например, возможно создание модулей нечетко-нейронного управления [19; 23], сочетающих достоинства нейронных сетей: а именно обучения и адаптации с системами управления, использующими нечеткую логику, что характерно для реальных объектов, в первую очередь биологических.

Для модели модуля нижних конечностей экзоскелета естественным является применение искусственных нейронных сетей, в качестве систем управления, которые могут обучаться и обучать мотонейроны реабилитируемого пациента, поддержанию вертикального положения, циркульной походке, перемещению к заданной локации и т. д.

Известные достоинства нейросетевого программирования – это их обучение и адаптация, для которых не требуется полная информация об объекте управления (например, как математическая модель).

Искусственная нейронная сеть обучается управлять объектом на основе заданных (эталонных) и входных сигналов. Этот процесс подобен функционированию естественной нейронной сети. Мотонейроны человека в процессе его обучения двуногой ходьбе функционируют подобным образом. В настоящее время уровень знаний о том, как устроена и функционирует естественная сеть, во многом интуитивен. То же самое можно сказать об искусственных нейронных сетях, так как неизвестны алгоритмы расчета числа слоев сети и числа нейронов в слое необходимых для решения данной задачи.

Накопленные искусственной нейронной сетью знания (компетенции) распределены между всеми ее элементами (искусственными нейронами) и таким образом недоступны для наблюдения. Аналогично обстоит дело и в естественных нейронных сетях. Тем не менее, искусственные нейронные сети, спроектированные эвристическими методами так же как естественные (эволюция) позволяют решать многие практические задачи, которые не поддаются решению с помощью хорошо спроектированных систем на основе надежных математических моделей. Особенно это имеет место для естественных, в частности, биологических объектов. С другой стороны, применение систем управления с нечеткой логикой, как правило, не требуют полных точных знаний о входных и выходных сигналах, т.е. математической модели, а базируются на оценках экспертов. В отличие от стандартных модулей управления в них используется не количественная (сколько?), а качественная (как?) информация [19; 23].

Объединение методов искусственных нейронных сетей с методами систем управления с нечеткой логикой позволяет внести в гибридную систему управления способность к обучению искусственных нейросетей и одновременно усилить интеллектуальные возможности искусственных

нейронных сетей, придав им свойства нейронных сетей человека с нечеткими правилами выработки решений.

Экзоскелеты представляют собой машины, сочетающие механику, физику, химию, кибернетику, программирование, обучающиеся и обучающие реабилитируемого оператора.

Создание математических моделей оператора-машины реализуется на различных подходах, используемых в задачах идентификации [24–29].

Динамике и статике опорно-двигательного аппарата человека посвящено большое число работ, в том числе в связи с робототехникой и созданием экзоскелетов различного назначения [29]. Проектирование, конструирование, изготовление оптимальных экзоскелетов составляет важную часть процесса киборгетизации современного этапа развития цивилизации. Процесс сравнительно простого (механического) протезирования повсеместно переходит в бионическое протезирование (мехатронное). Формируется дисциплина киборгетика как отдельная научная область знания и инженерии, в которой уже выделяются такие направления как медицинская киборгетика, военная киборгетика, космическая киборгетика и т. д. Занимая промежуточное положение между биомеханикой, биофизикой, биохимией с одной стороны кибернетикой и робототехникой, информатикой с другой, киборгетика имеет свои общие требования, которым должны удовлетворять киборгетические системы. Киборгетические системы в широком смысле – это любые системы, сочетающие взаимодействия естественных свойств человека и искусственных систем типа протезов, различных устройств, временно или постоянно взаимодействующих с человеком.

Проводится большое число исследований с целью получения биометрической информации о человеке на различные тестирующие сигналы. На основе полученных статистических данных рассчитаны различные средние характеристики человека, позволяющие проектировать машины с учетом реакции людей-операторов, управляющих ими.

Модель экзоскелета-оператора может быть получена методом синтеза двух моделей: оператора и экзоскелета с учетом перекрестных связей и воздействий, что выражается во взаимной адаптации экзоскелета и оператора. В случае реабилитационного экзоскелета оператором является человек, которым по своим характеристикам отличается от среднего здорового, поэтому модель пациента, как правило, может быть получена уже в процессе реабилитации. Таким образом, построение модели оператора в случае реабилитации имеет особенности индивидуальной идентификации, проводимой в процессе тренировок. Таким образом, применение методов математического моделирования может оказаться слишком грубым, т. к. математические модели оперируют с величинами, пригодными для некоторого множества средних здоровых людей. Это касается не только детерминированных, но и стохастических моделей [28].

Более адекватным и эффективным подходом к эксплуатации экзоскелета является использование методов адаптации, основанных на примене-

нии нейро-нечетких модулей, реализующих решение задач устойчивости, идентификации, управления.

Заключение.

1. Предложена новая концепция проектирования и создания реабилитационного экзоскелета с регулируемой жесткостью конечностей и корпуса, изготавливаемых в виде эластичной оболочки, армированной стержнями из электромагнитных полимерных материалов.

2. Рассмотрен модульный принцип проектирования и изготовления мягкого эластичного экзоскелета с целью последовательного восстановления функций отдельных частей тела по алгоритмам усложнения. Например, восстановление функций нижних конечностей последовательно начинается с модуля стопы, затем обучения циркулярной ходьбе ног и т. д.

3. Рассмотренные модели армирующих стержней, меняющих свою жесткость под действием магнитного поля, основаны на использовании магнитоупругих материалов типа полимеров.

4. На основе осредненных (эффективных) моделей экзоскелета в виде стержневых систем рассмотрены математические модели устойчивости вертикального положения, движения к заданной локации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Borisov, A. V. Mathematical models of exoskeleton. Dynamics, strength, control / A. V. Borisov, A. V. Chigarev. – Springer, 2022. – 271 p.

2. Dynamic model of a humanoid exoskeleton of a lower limb with hydraulic / S. Glowinski, M. Obst, S. Makdanik, B. Patacka-Banas // Sensors. – 2021. – Vol. 21(10). – 3432. <https://doi.org/10.3390/s21103432>.

3. Stroke survivor perceptions of using an exoskeleton during acute gait rehabilitation / C. McDonald, C. Fingleton, S. Murghy, O. Lennon // Scientific reports. – 2022. – Vol. 12(1). – 14185. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18188-7>.

4. Gait Deviation Correction method for gait rehabilitation with a lower limb exoskeleton robot / S. Zhang, X. Guan, J. Ye [et al.] // IEEE Transactions on medical. – 2022. – Vol.4. – P. 754–763. <https://doi.org/10.1109/tmr.2022.3194360>.

5. Kadriquer, J. F. A feasibility study of exoskeleton with a passive magnetic spring support exoskeleton to reduce workers physical strain / J. F. Kadriquer, E. Castilio-Castafieda, G. Carbone // Proceedings of the 4-th international conference of IFTOMM. Italy, Advances in Italian Mechanism Science, Springer. – 2022. – Vol. 122. – P. 463–470. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10776-4_53.

6. Acute stroke rehabilitation for gait training with cyborg type robot hybrid, Assistive limb: a pilot study / C. Yokota [et al.] // J. Neurol Sci. – 2019. – Vol. 404. – P. 11–15. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2019.07.012>.

7. Bira, N. A review of Magnetic Elastomers and Their Role in Soft Robotics / N. Bira, J. R. Davidson // Front Robot. AI. – 2020. – Vol. 7. – 588391. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.588391>.

8. Hernander-Ramos, M. A. Design of a Biomechatronic Device for Upright Mobility in People with SCI Using an Exoskeleton Like a Stabilization System / M. A. Hernander-Ramos, J. J. A. Flores-Cuatle // *Appl. Sci.* – 2022. – Vol. 12(16). – 8098. <https://doi.org/10.3390/app12168098>.
9. Чигарев, А. В. Мехатроника и динамика микророботов / А. В. Чигарев. – Минск, БНТУ. – 2018. – 500 с.
10. Влияние однородного магнитного поля на механическое поведение мягких магнитных эластомеров при сжатии / С. С. Абрамчук, Д. А. Гришин, Е. Ю. Краморенко [и др.] // *Высокомолекулярные соединения. Серия А.* – 2006. – Т. 48 (32). – С. 245–253.
11. Расчет жесткости композита с учетом изгибных деформаций наполнителя сжатии / А. А. Берлин, В. Г. Ошмян, С. А. Патлажан [и др.] // *Высокомолекулярные соединения. Серия А.* – 2006. – Т. 48 (32). – С. 316–325.
12. Nadzharyan T. A. Fractional rheological models of dynamic mechanical behavior of magnetoactive elastomers in magnetic fields / T. A. Nadzharyan, S. A. Kostrov, G. V. Stepanov // *Polymer.* – 2018. – Vol. 142. – P. 316–329.
13. Mikhasev, G. Theory of thin adaptive laminated shells based on magnetorheological materials and its application in problems on vibration suppression / G. Mikhasev, M. Botogova, E. Korobko // *Shell-like Structures: Non-classical Theories and Applications.* Springer. – 2013. – P. 727–750.
14. Михасев, Г. И. Анализ свободных колебаний сэндвич-панели с электрореологическим слоем на основе двух моделей слоистых оболочек / Г. И. Михасев, М. Г. Ботогова, А. П. Михиевич // *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика.* – 2020. – Т. 3. – С. 51–59.
15. Compact Maximum Correntropy-Based Error State Kalman Filter for Exoskeleton Orientation Estimation / S. Li, P. Duan, D. Shi, [et al.] // *IEEE Transaction on Control Systems Technology.* – 2022. – Vol. 3. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/TCST.2022.3193760>.
16. Rurtkowska, D. *Sienci neuronowe, algorytmy genetyczne, systemy rozmyte* / D. Rurtkowska, M. Pilinnski, L. Rutkowski // *Warszawa-Lodz.* – 1999. – 383 s.
17. Baoding, Liu. *Theory and Practice of Uncertain Programming* / Liu Baoding // *Physical-Verlag A Springer-Verlag Company.* – 2004. – 416 p.
18. Ma Z. Humanoid control of lower limb exoskeleton robot based on human gait data with sliding mode neural network / Z Ma // *CAAI Transactions on Intelligence Technology.* – 2022. – Vol. 7. – P. 606–616. <https://doi.org/10.1049/cit2.12127>.
19. Heimann, B. *Mechatronik. Komponenten-Methoden-Beispiele* / B. Heimann, W. Gerth, K. Popg // *Carl Hanser Verlag.* – 2001. – 374 p.
20. Исии, Т. Мехатроника / Т. Исии, И. Симояма, Х. Иноуэ [и др.] // *Москва, Мир.* – 1988. – 314 с.
21. Чигарев, А. В. *Стохастическая и регулярная динамика неоднородных сред* / А. В. Чигарев – Минск : Технопринт. – 2000. – 425 с.

22. Чигарев, А. В. Биомеханика : учебник / А. В. Чигарев, Г. И. Михасев, А. В. Борисов. – Минск : Изд-во Гревцова. – 2010. – 284 с.

23. A mathematical model, heuristic, and simulation study for a basic data staging problem in a heterogeneous networking environment / M. Tan, D. Mitchell, J. Howard [et al.] // 7th IEEE Heterogeneous Computing Workshop (HCW '98). – 1998. – P. 115–129.

24. Hetsov, N. V. Identification of Human Operator Model Parameters in System with Saturated Actuator / N. V. Hetsov, A. M. Popov // 13th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, including Biosystems DYCOPS 2022, 14–17 June. – 2022. – P. 526–531.

25. Pilot induced oscillation suppression controller design via nonlinear optimal output regulation method / A. Tran, N. Sakamoto, Y. Kikuchi, K. Mori // Aerospace Science and Technology. – 2017. – Vol. 68. – P. 278–286.

26. Hodgkin-Huxley revisited: reparametrization and identifiability analysis of the classic action potential model with approximate Bayesian methods / C. A. Daly, D. Gavaghan, C. Holmes, J. Cooper // Royal Society Open Science. – 2015. – Vol. 2 (12). – 150499. <https://doi.org/10.1098/rsos.150499>.

27. Variable stiffness wires based on magnetorheological liquid metals / X. Zhou, J. Shu, H. Jin, [et al.] // International Journal of Smart and Nano Materials. – 2022. – Vol. 13(2). – P. 232–243.

28. Hybrid Half-Gaussian Selectively Adaptive Fuzzy Control of an Actuated Ankle-Foot Orthosis / H. Moon, R. Maiti, K. Sharma [et al.] // IEEE Robotics and Automation. – 2022. – Vol. 7(4). – P. 9635–9642.

29. De Andrade, R. M. Design and testing a highly backdrivable and kinematic compatible magneto-rheological knee exoskeleton / R. M. de Andrade, P. H. Fabríz Ulhoa, Fragozo Dias // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2023. – Vol. 34 – P. 653–663.

Поступила: 12.04.2024