

**В. Ф. Головин**, канд. техн. наук, зав. лаб. "Робототехника", medicalrobot@mail.ru,

**М. В. Архипов**, канд. техн. наук, доц.,

Московский государственный индустриальный Университет, Москва, Россия,

**В. Е. Павловский**, д-р физ.-мат. наук, проф., vpravl@mail.ru,

Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия

## Особенности проектирования робототехнических систем для восстановительной медицины<sup>1</sup>

*Рассматриваются необходимость применения робототехнических систем для восстановительной медицины и особенности проектирования этих систем. Отмечается приоритет отечественных разработок в области аппаратных средств восстановительной медицины и рост интереса к ним в мире. Подробно описываются технические требования к параметрам и узлам робототехнической системы для восстановительной медицины: рабочей зоне, развиваемым усилиям, скоростям, точности, погрешности, системе управления, интерфейсу управления, инструментам. Отмечается, что при проектировании необходимо учитывать вопросы безопасности, экономической эффективности, взаимодействия робота и человека-пациента и психологического восприятия робота человеком-пациентом. Приводится пример технических требований к разработке робототехнической системы для восстановительной медицины. В заключении суммируются особенности проектирования робототехнических систем для восстановительной медицины.*

**Ключевые слова:** робототехническая система, восстановительная медицина, биомехатронный модуль, технические требования, жизненный цикл, эргономика

### Введение

Чтобы подчеркнуть актуальность и экономические преимущества использования робототехники для восстановительной медицины (ВМ), прежде всего необходимо отметить, что массаж и активные и пассивные движения конечностей в суставах являются проверенными тысячелетиями оздоровительными немедикаментозными средствами и что пока люди пользуются этими средствами в значительно меньшей степени, чем это им необходимо. Многие народы мира веками создавали культуры оздоровления, где ведущую роль и значение имели движение и соответствующие специализированные механические воздействия. К примеру, на Востоке для физической культуры характерно и имеет особое значение чередование нагрузений и разгрузок, концентраций и расслаблений, активного и пассивного отдыха. Для современного человека особенно актуальна такая физическая культура, для которой характерны не только активные волевые движения, но и пассивные движения, включая разнообразный массаж, постизометрическую релаксацию и другие приемы релаксации и мобилизации. Эффективными могут быть новые технологии совместного применения массажа, например, с мелотерапией, термотерапией, ароматерапией, активными движениями [5].

Сказанное приводит к выводу о необходимости создания специфических технических средств для

ВМ, на первый план при этом выходят вопросы создания и использования специализированных роботов.

Вообще проектированию технических систем посвящен ряд специальных работ, существуют ГОСТы на проектирование технических систем, известны конкретные примеры проектирования систем [1]. Подобная информация известна для медицинской техники [2] и робототехники [3, 4]. Основой проектирования как процесса является инновационная деятельность, когда кроме разработки проекта рассматривается доведение изделия до конкурентоспособного вида [1]. Проектирование робототехнических систем (РТС) для ВМ в основном следует принципам и методам проектирования технических систем, но имеет определенные особенности.

Особенности проектирования РТС для ВМ связаны, в первую очередь, с объектом управления — живыми биологическими мягкими тканями человека, их изменяющимися вязко-упругими свойствами, неинвазивным характером механического воздействия, а следовательно, с видами инструментов. Эти особенности проявляются в кинематике манипуляторов и построении их приводов.

Определим класс рассматриваемых далее РТС для ВМ. Это системы управляемого механического неинвазивного взаимодействия роботов с биологическими мягкими тканями (МТ) человека. Взаимодействия могут быть как непосредственными манипуляциями робота на МТ в виде разнообразного массажа [5] или перемещений датчиков вдоль тела пациента во время ультразвуковой диагностики [6], так и косвенными воздействиями, такими как дви-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-2511.2014.8.

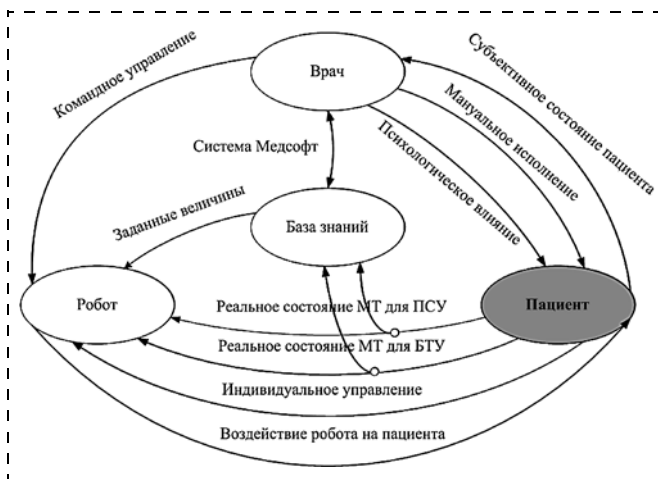


Рис. 1. Взаимодействие между компонентами эргатической системы "врач — робот — пациент"

жения конечностей человека (пациента) в суставах при взаимодействии их с роботом [5]. В основном далее будет рассматриваться проектирование РТС, выполняющих массажные воздействия. Отметим, что массаж, как один из основных элементов ВМ, является эффективным и широкодоступным средством восстановления работоспособности при физическом утомлении и надежным средством профилактики профессиональных заболеваний. Массаж утомленных мышц не только восстанавливает первоначальную мышечную работоспособность, но даже увеличивает ее. Повышение работоспособности утомленных мышц наблюдается и при массаже мышц, не принимавших участия в физической работе.

Предполагается, что РТС не только выполняют механические воздействия на пациента, но оценивают взаимодействие с биологическими МТ как объектами жизнедеятельности человека, диагностируя изменения психофизиологического состояния пациента и контролируя процесс [5]. Управление механическими взаимодействиями будет рассматриваться как реализация позиционно-силового управления (ПСУ), а управление психофизиологическим состоянием пациента — как биотехническое управление (БТУ). В целом управление РТС для ВМ является эргатическим в трехкомпонентной системе "врач — робот — пациент", причем пациент, в отличие от технического объекта, над которым проводит манипуляции робот, проявляет свои психофизиологические свойства (рис. 1) [7].

Характерными для проектирования технических систем являются два этапа НИР — разработка технического задания и предварительное проектирование, два этапа ОКР — эскизное и техническое проектирование, затем производство и эксплуатация. То же необходимо и в проектировании РТС для ВМ.

### Основания для разработки РТС для ВМ

Направление разработки РТС для ВМ возникло как естественное развитие систем для замены трудо-

емкой работы массажистов и мануальных терапевтов при массовом обслуживании пациентов. Вместе с тем, русский врач Н. Б. Заблудовский [7] считал необходимым применение аппаратных средств массажа для дозирования массажных воздействий. В настоящее время появляются специализированные аппаратные средства (включая массажные кресла), которые, однако, значительно уступают возможностям человеческой руки [5]. Известны некоторые исследовательские разработки на Западе [3]. Как вывод можно отметить, что необходимы РТС для ВМ, спроектированные с учетом потребностей здравоохранения и возможностей современной робототехники. Государственного заказа на проектирование РТС для ВМ пока нет, но проводятся поисковые работы и создаются необходимые заделы.

Приоритет идеологии разработки универсальных медицинских роботов для ВМ принадлежит России. Существует патент на способ и устройство для выполнения массажа с применением манипуляционного робота [8].

Приведем несколько примеров. Наибольшую заинтересованность к работам по разработке роботов для массажа проявляют ученые из Китая, где методы массажной физиотерапии развиты значительно больше, чем на Западе. Учитывая скорость освоения новой техники и развития промышленного потенциала, можно предположить, что Китай может быть первым производителем роботов для массажа [13]. Такой робот разработан в Бейджинском технологическом институте (рис. 2, см. вторую сторону обложки).

Для совместной работы робота и человека, находящегося в рабочей зоне робота, немецкой компанией Kuka был разработан робот LWR (light weight robot), который по сравнению с другими, имеющими такую же рабочую зону, роботами имеет более легкую руку. При семи степенях подвижности и грузоподъемности, равной 7 кг, робот весит 22 кг. Робот может работать без ограждения, и при прикосновении к нему руки человека он мягко отводит свою руку в сторону [11] (рис. 3, а, см. вторую сторону обложки).

Такой же способностью безопасной работы без ограждения обладают роботы датской компании Universal Robots UR5 (рис. 3, б, см. вторую сторону обложки) и UR10 [12].

Заметим, что в качестве конкурента манипуляционному роботу можно рассматривать уже упомянувшееся массажное кресло — безрукий робот, выполняющий приемы придавливающего массажа [9]. Массажные кресла имеют следующий ряд преимуществ перед манипуляционными роботами:

- большая концентрация необходимых движений в малом объеме рабочей зоны;
- посадка пациента в кресло гарантирует его ориентацию;
- большие усилия за счет малых рычагов в кресле.

Однако недостатки массажных кресел в сравнении с рукой робота существенные:

- меньшие мобильность и разнообразие движений;
- невозможность массажа передней поверхности тела пациента, в том числе лица;
- невозможность смещения точек при точечном массаже;
- невозможность хватных и царапательных приемов;
- невозможность выполнения движений конечностей в суставах;
- ограниченность применения инструментов для массажа.

Существует значительное разнообразие выпускаемых серийно массажных кресел, однако функционально уступающих манипуляционным роботам. Перечислим теперь требования к таким роботам.

### **Функциональные требования. Кинематика, приводы и инструменты манипуляторов для ВМ**

*Кинематические модели манипуляторов.* Поскольку рассматривается класс РТС для ВМ, то технические требования к кинематике манипулятора определяются приближением манипулятора к человеческой руке массажиста или мануального терапевта. Из соображений бионического копирования человеческой руки уместны манипуляторы с ангулярной кинематикой.

Так как повышенной жесткости и точности роботов для ВМ не требуются, то кинематика руки манипулятора может быть последовательной, и нет необходимости прибегать к манипуляторам с параллельной структурой.

Для роботов, предназначенных для выполнения длинных продольных движений вдоль тела пациента (робот для шлейф-массажа [5]), уместной будет декартовая кинематика.

Гамма РТС для ВМ может охватывать манипуляторы с числом степеней подвижности от одного до семи. К одностепенным манипуляторам относятся простейшие специализированные, например, робот для капиллярного массажа головы, выполняющий поступательные движения в направлении оси инструмента [5].

Двухступенной манипулятор для шлейф-массажа выполняет цикловым способом управляемые движения вдоль тела пациента, прижимаясь пружиной к телу пациента.

Шестистепенные манипуляторы роботов, наиболее распространенных для технологических задач, позволяют в своей рабочей зоне выполнять пространственное позиционирование и ориентацию инструмента. Шестистепенной манипулятор используется как основа прототипа [9]. Однако обеспечение необходимой ориентации в любой точке рабочей зоны требует избыточности манипулятора. Семистепенной манипулятор использован в опытном образце робота для перемещения датчика при ультразвуковой диагностике [6].

Кинематика робота для выполнения движений конечностей в суставах может быть реализована на основе экзоскелетона, когда звенья робота накладываются на конечности пациента и оси суставов робота совпадают с осями суставов пациента. В других кинематических компоновках звенья робота могут располагаться как руки врача, находящегося напротив пациента [5].

Рабочая зона робота зависит не только от размеров участка, на котором выполняются процедуры. Для пациента могут быть необременительными некоторые установочные перемещения даже при использовании универсального робота. Рабочая зона робота может быть увеличена за счет применения подвижного стола, на котором находится пациент, в качестве одной из степеней подвижности робота.

*Приводы робота.* Чтобы обеспечить необходимые скорости и усилия, а также плавность перемещений, предпочтительно проектировать робот с электроприводами. Мощность электроприводов суставов должна быть в пределах 50...100 Вт. Чтобы обеспечить малую инерционность манипуляционной руки, следует располагать электродвигатели приводов не в звеньях манипулятора, а вместе с редукторами на подвижном основании. Связь приводов со звеньями в этом случае осуществляется легкими тросовыми передачами. Конструкции звеньев могут быть трубчатыми.

Для обеспечения плавности подхода инструмента робота к пациенту и мягкого взаимодействия с МТ привод силового модуля может быть пневматическим.

*Инструменты манипуляторов.* Так же как для любой робототехнической системы, исполнительные функции РТС для ВМ определяются инструментами, сменными или закрепляемыми на конечном звене манипулятора. Одним из отличительных требований, предъявляемых к инструментам медицинских роботов, является стерильность. Инструменты должны быть легкоъемными или автоматически заменяемыми с возможностью их стерилизации. Особое внимание этому уделяется в роботах для проведения хирургических и малоинвазивных операций, например в роботе Da Vinci [3]. Хотя РТС для ВМ выполняют неинвазивные процедуры, требования к стерильности сохраняются.

Основной особенностью медицинского робота для мануальной терапии и массажа является механический контакт робота с пациентом. Этот контакт осуществляется через инструмент. Поэтому в техниках, воспроизводящих руки человека, инструмент должен имитировать контактные свойства человеческой руки: упругость, теплоту, влажность, фрикционные свойства (шероховатость, гладкость, скользкость), координационные возможности (многопальцевость, способность захватывать).

Одновременный контакт на большой поверхности тела может обеспечить многорукий робот или робот, имеющий две кисти или несколько пальцев. Возможно применение широкого эластичного, самоустанавливающегося инструмента. Это, в некоторой

степени, имитация работы нескольких массажистов. Также большая поверхность тела подвергается давлению при гидромассаже, например в джакузи. Однако для ряда техник необходима концентрация внимания в небольшой области тела, а поэтому достаточно одной руки и одного инструмента [5].

Примерно половину массажных приемов представляют нажимание на тело, а другую половину — действия с захватом и оттягиванием мягких тканей. Нажимные инструменты робота могут имитировать различные части рук и ног человека: подушечки большого пальца, ребра ладони, плоскости ладони.

В приемах точечного массажа большие значения удельных усилий — давлений — достигаются за счет малой контактной площади инструмента. Таким инструментом пользуется врач, такой же инструмент закрепляется на силовом модуле робота.

Приемы растирания, тракции с большим трением может выполнять инструмент с шершавой поверхностью, приемы с минимальным трением можно выполнять роликами или со смазкой, как в ароматерапии.

Контактную поверхность инструмента следует покрывать материалами со свойствами, близкими к человеческой коже. Определенная комфортность в контакте с человеческим телом может быть достигнута инструментом, подогреваемым током, например, с помощью резистора, вмонтированного в инструмент.

Часть приемов массажа и движений конечностей связана с захватыванием или участков мягких тканей, или конечностей. Среди массажных приемов это ординарное разминание, двойной гриф, двойное кольцевое зажимание. Инструмент робота для воспроизведения этих приемов может представлять двухпальцевый захват с контролем усилия прижатия пальцев, например, через программно устанавливаемое давление в пневмоцилиндре схвата.

Конкурентоспособность медицинского робота в сравнении с известными аппаратными средствами может быть достигнута за счет универсальности, многофункциональности, в том числе, за счет навешивания на робот в качестве инструмента серийно выпускаемых фирменных насадок. Это всевозможные вибраторы, ролики, игольчатые инструменты, оптические излучатели, диагностические приборы, например, по системе Фолля, измеряющие кожное сопротивление, и др. Все перечисленные насадки должны прижиматься силовым модулем робота к телу пациента с заданным усилием.

### Технические требования к РТС для ВМ

Как правило, для технических систем требования охватывают габаритные размеры, массу, точность, надежность, энергопотребление [1]. Для РТС к этим требованиям добавляются следующие: кинематическая модель манипулятора, рабочая зона манипулятора, число степеней подвижности манипулятора, типы приводов манипулятора, развиваемые манипулятором усилия, скорости перемещения инструмента

манипулятора, способы управления манипулятором и системой управления РТС в целом, способы обучения. Специфическими требованиями к РТС для ВМ являются: развиваемые манипулятором усилия, число управляемых силовых компонент, погрешность воспроизведения силовых компонент, инструменты для взаимодействия с пациентом, вид диагностики психофизиологического состояния пациента, усиленные требования безопасности.

Далее рассмотрим технические характеристики, свойственные РТС для ВМ.

*Задаваемые усилия.* Значения задаваемых усилий зависят от вида процедуры и массогеометрических параметров пациента, его психофизиологического состояния. При выжимании и разминании мышц, например спортсменов, прикладывается усилие порядка 200...500 Н, при поглаживании усилие не должно превышать 1 Н. Погрешность воспроизведения заданных усилий при выполнении приемов общеукрепляющего гигиенического массажа может составлять 15... 30 % от задаваемых усилий.

Точность воспроизведения заданной траектории при заданном усилии может обеспечиваться существующими серийно выпускаемыми роботами, имеющими погрешность позиционирования  $\pm 0,1$  мм. В этом случае для организации ПСУ достаточно модернизации программного обеспечения. В другом более дешевом варианте позиционный робот может иметь пониженную точность порядка  $\pm 1,0$  мм.

*Развиваемые скорости.* Движения робота при выполнении процедур ВМ должны быть плавными, что требует контурного управления. Максимальные скорости движений руки при механотерапии не превышают 0,5 м/с. При выполнении релаксационных приемов, как правило, скорости меньше, чем при выполнении возбуждающих приемов.

*Система управления.* Для обеспечения наибольшей эффективности выполнения процедур ВМ необходима эргатическая система управления, учитывающая психофизиологические свойства пациента-человека. Чтобы обеспечить заданные усилия, перемещения и скорости, необходимо ПСУ с участием силового обучения, например, с использованием силового модуля.

Для реализации БТУ необходимы измерители параметров психофизиологического состояния — электрокожного сопротивления и мышечного тонуса, в которых в наибольшей степени проявляется действие механотерапии.

*Интерфейс оператора.* Необходимые усилия и скорости в первую очередь программно устанавливает и при необходимости изменяет врач, пользуясь опытом предыдущих сеансов с данным пациентом. Врач может пользоваться "советами" диагностической системы робота. На некоторых этапах отлаженных процедур врач может полностью доверять роботу, переключая его в автоматический режим работы. В автоматическом режиме робот поддерживает те усилия и скорости, которые рекомендует диагностический блок, анализирующий психофи-

зиологическое состояние пациента. Для удобства настройки и эксплуатации робота должен быть разработан эргономичный оконный интерфейс по аналогии с окнами программ в ОС MS Windows. Разработка интуитивно понятного интерфейса является задачей эргономики. Интерфейс должен предоставлять возможность пользователю в графическом режиме настраивать следующие параметры процедур: скорость выполнения, усилия взаимодействия, число повторений, переключение в автоматический режим работы и др. Необходимо предусмотреть вывод на монитор текущих и предыдущих параметров психофизиологического состояния. Пульт обучения и управления должен содержать элементы позиционного и силового обучения и управления роботом.

### Пример технических требований при построении РТС для ВМ

**Назначение:** РТС предназначена для автоматического выполнения приемов оздоровительного массажа для населения в клиниках, фитнес-центрах, велнес-центрах, в домашних условиях.

**Выполняемые приемы оздоровительного массажа:** поглаживание, выжимание, разминание, растирание, зашипывание, вибрации с использованием сменных насадок-инструментов.

**Состав комплекса:** манипулятор, кушетка, набор сменных инструментов, пульт управления и обучения, электронный блок приводов, персональный компьютер с терминалом, блок биотехнического управления, блок пневмопитания.

#### Технические требования

Развиваемые манипулятором усилия . . . . .	70 Н
Рабочая зона манипулятора . . . . .	Сфера радиусом 1000—2000 мм
Число степеней подвижности манипулятора . . . . .	6
Погрешность позиционирования манипулятора . . . . .	0,1 мм
Макс. скорость инструмента . . . . .	0,5 м/с
Масса руки манипулятора (без привода 1-го сустава) . . . . .	3 кг
Приводы манипулятора . . . . .	С тросовыми передачами, приводы 2...6 суставов установлены на подвижном основании, мощность электродвигателей: 1...3 суставов — 40 Вт, 4...6 суставов — 20 Вт
Датчик усилия . . . . .	Трехкомпонентный
Инструменты . . . . .	Набор сменных стерильных инструментов для каждого приема массажа
Управление робота . . . . .	Позиционно-силовое и биотехническое
Обучение робота . . . . .	С помощью силовых точек
Время проведения массажа . . . . .	15...60 мин
Диагностика . . . . .	По электро-кожному сопротивлению
Электропитание . . . . .	220 В, 50 Гц
Требования безопасности . . . . .	Повышенные
Программное обеспечение . . . . .	Специализированное на базе современных операционных систем
Эргономика . . . . .	Работа с учетом взаимодействия трех компонент эргатической системы

### Условия эксплуатации

РТС имеет явные преимущества перед ручной человеческой работой как неутомимая система. Заменяя массажиста или мануального терапевта, РТС для ВМ должна обеспечивать непрерывную безотказную работу, такую же, как промышленные роботы, — по крайней мере 20 ч в сутки. Ресурс работы такой же, как у промышленных роботов.

Климатические условия эксплуатации определяются как домашние условия или условия стационаров клиник.

### Безопасность робототехники для восстановительной медицины

В медицинской робототехнике требования к безопасности являются наиболее строгими, так как в большей степени относятся не к оператору, профессионально взаимодействующему с роботом, а к пациенту, который должен быть уверен, что о его безопасности позаботятся без его участия [5].

Наиболее опасной является инвазивная медицинская робототехника, например, хирургическая робототехника, где исполнительный элемент робота выполняет пункции, резекции по программным траекториям [3]. Здесь фатальной может быть ошибка на уровне составления программы или ошибка оператора при дистанционном проведении операции. В этом случае безопасность в большей степени зависит не от робота, а от мастерства, обученности оператора, на которого возлагается ответственность.

Структура робота содержит три контура с обратными связями по положению, усилию, биомедицинским переменным. Поэтому источниками опасных сбоев системы управления этого робота будут, в первую очередь, разрывы замыканий указанных контуров, отказы датчиков обратных связей. Другим источником опасных ситуаций может быть неправильная оценка задания параметров процедуры.

Возможными средствами предотвращения опасности могут быть следующие:

- 1) отключение приводов или отведение руки робота по сигналу датчика максимального усилия, который может подключаться через позиционно-силовую систему управления или непосредственно к питанию приводов;
- 2) отключение приводов или отведение руки робота по биомедицинским сигналам;
- 3) проверка приводов в начале процедур, а также силового датчика в программных контрольных точках;
- 4) выполнение первых движений с минимальными усилиями;
- 5) размещение двигателей приводов не в руке робота, а на платформе, что обеспечит малую инерционность и легкость руки;
- 6) мягкое неэлектропроводное покрытие руки и расположение на кисти и руке робота тактильных датчиков касания;

7) использование системы технического зрения для сравнения текущего изображения траектории инструмента с образцовым;

8) виртуальное планирование процедуры;

9) применение упругих суставов.

Необходимо выводить на монитор текущие значения механических и биомедицинских переменных и выделять область отклонений, предупреждающую звуковыми и световыми сигналами о подходе к зоне опасности.

Некоторые связи между компонентами системы образуют замкнутые петли (кольца). Поэтому необходимо обеспечить устойчивость этих контуров.

Рассмотренные требования обеспечения безопасности следует учитывать при разработке аппаратного интерфейса между врачом, пациентом и роботом, а также при разработке языка.

Если следовать бионическому подходу в проектировании роботов для ВМ, то, в первую очередь, следует стараться воспроизвести тактику врача и движения его рук при выполнении механотерапевтических процедур. Вместе с тем, робот может выполнять ряд новых приемов, несвойственных человеку.

При разработке первого универсального робота, выполняющего комплексы движений массажа и мануальной терапии, уместно в качестве основы воспользоваться серийно выпускаемыми роботами немедицинского назначения. Расширение сервиса, необходимого при обучении робота, а также повышение безопасности взаимодействия робота с врачом и особенно с пациентом на первых этапах разработки возможны с применением в качестве базового промышленных роботов типа UR-10 (стоимость робота €25.000) или Kuka LWR (стоимость робота €100.000).

При оценке стоимости работ на НИОКР по проекту "Робототехника для восстановительной медицины" можно выделить следующие особенности в порядке их значимости по этапам проектирования [14]:

- основанием для бюджетного финансирования разработки робота для ВМ является социально значимая проблема общества — поддержание здоровья населения;
- начало финансирования работ зависит от положительности экспертных оценок разработки робота в виде патентов, "ноу-хау";
- прототип робота с демонстрационными функциями может быть реализован на базе универсального робота немедицинского назначения и покупаемых датчиков (многокомпонентного силового, биомедицинских параметров);
- дальнейшие вложения в совершенствование товарного вида робота для ВМ превращают его в коммерческий продукт, который может быть предметом для перехода к передаче технологии на стадию производства.

### **Примеры разработки биомехатронных модулей РТС для ВМ и специализированных медицинских роботов для ВМ**

В качестве возможных вариантов ниже рассматриваются примеры разработки биомехатронных силовых модулей РТС для ВМ и разработка специализированных медицинских роботов для ВМ. Эти исследования и разработки выполнены в Московском городском индустриальном университете.

Чтобы дополнять серийно выпускаемые роботы немедицинского назначения до роботов, выполняющих процедуры ВМ, предложен силовой биомехатронный модуль (рис. 4, см. вторую сторону обложки), содержащий датчик усилия, компенсатор и сменный инструмент [5].

Компенсатор необходим для демпфирования динамических перегрузок при взаимодействии робота с МТ пациента. Датчик усилия используется для позиционно-силового управления и как измеритель мышечного тонуса для диагностирования психофизиологического состояния пациента и БТУ.

В конструкции пассивного силового модуля механическая пружина выполняла роль компенсатора с постоянной податливостью. Для изменения податливости силового модуля и, следовательно, податливости манипулятора был предложен активный силовой биомехатронный модуль.

Конструкция активного силового модуля включает линейный привод, изменение коэффициента усиления которого вызывает изменение его податливости. Тензодатчик используется как чувствительный элемент систем позиционно-силового и биотехнического управления.

Многосуставный робот может выполнять массаж на нескольких участках тела и перемещать конечности вокруг нескольких осей. Значительно дешевле роботы с малым числом суставов, особенно одноприводные роботы, однако они обладают меньшими возможностями, могут обслуживать лишь отдельные участки и только определенные конечности вокруг одной оси. Остальные установочные движения выполняет пациент, перемещая новый участок тела в рабочую зону робота.

Несмотря на свою ограниченность, как автоматические приборы они будут более эффективны, чем распространенные аппаратные средства механизации. Эффективность таких роботов можно повысить при использовании в них диагностических средств, мехатронного подхода, ПСУ, БТУ, нестандартных датчиков и двигателей.

Возможные конструкции таких роботов описаны в монографии [5], примерами являются робот для косметического точечного массажа лица, робот с упругим проволочным инструментом для капиллярного массажа поверхности головы (рис. 5, см. вторую сторону обложки), робот для шлейф-массажа поверхности спины, робот-маятник для выжимания длинных мышц спины, робот для выполнения пассивных со стороны пациента движений руки в целях разработки контрактур.

## Заклучение

## Список литературы

РТС для ВМ в зависимости от задач представляют широкий класс, в котором универсальные и специализированные роботы входят как некоторые отдельные группы.

Развитие робототехники для ВМ в мире в настоящее время подтверждается серийными выпусками специализированных роботов для ВМ.

Основанием для бюджетного финансирования разработки РТС для ВМ является социально значимая проблема общества — поддержание здоровья населения.

Для РТС для ВМ требования безопасности в значительной степени решаются построением управления, позволяющего роботу работать без ограждения.

На первом этапе разработки РТС для ВМ в качестве базовых могут быть использованы импортные роботы немедицинского назначения Kuka LWR или UR-10.

Если в основу проектирования РТС для ВМ предлагается в качестве базового серийно выпускаемый робот, то основным аппаратным дополнением будет биомехатронный силовой модуль, необходимый и для ПСУ, и для БТУ.

Одним из дополнительных требований перспективного технического задания является разработка специальных автоматически заменяемых и стерильных инструментов.

Предложенные в статье требования к проектированию роботов для ВМ могут быть основой для составления технических заданий на разработку.

Для уточнения технического задания необходимо совместное участие в НИР технических и медицинских специалистов.

1. Юревич Е. И. Основы проектирования техники: учеб. пособие. СПб.: Изд. СПбГТУ, 2001.
2. Лоццлов В. И., Шукин С. И. Принципы анализа и синтеза биотехнических систем. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1987. 67 с.
3. Tavakoli M., Patel R. V., Moallem M., Aziminejad A. Haptics for teleoperated surgical robotic systems. Monograph series in the World scientific publishing under the title "New frontiers in robotics". Singapore: World Scientific Publishing Company, 2003, 290 p.
4. Саврасов Г. В. Медицинская робототехника: состояние, проблемы и общие принципы проектирования // Вестник МГТУ им. Баумана Н. Э. Спецвыпуск "Биомедицинская техника и технология. Сер. "Приборостроение". 1998. С. 35—50.
5. Golovin V., Zhuravlev V., Arkhipov M. Robotics in Restorative Medicine. LAP LAMBERT Academic Publishing, GmbH & Co. KG, 2012. 270 с
6. Golovin V., Arkhipov M., Juravlev V. Force Training for Position/Force Control of Message Robots. Mechanisms and Machine Science. New Trends in Medical and Service Robots. Springer International Publishing. Switzerland. 2014. Vol. 20. P. 95—109.
7. Заблудовский В. И. Материалы к вопросу о действии массажа на здоровых людей": дис. ... докт. мед. наук. СПб.: 1982. С. 33—37.
8. Головин В. Ф., Саморуков А. Е. Способ массажа и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2145833, 08.05.1998.
9. Массажные кресла. URL: <http://www.discountleatherchair.com/osaki-massage-recliners.html> (дата обращения: 22.01.2015).
10. Массажеры для головы и тела. URL: <http://www.massagerell.ru> (дата обращения: 22.01.2015).
11. Роботы Kuka. URL: [http://www.kuka-labs.com/en/medical\\_robotics/lightweight\\_robotics/](http://www.kuka-labs.com/en/medical_robotics/lightweight_robotics/) (дата обращения: 22.01.2015).
12. Роботы UR. URL: <http://fam-robotics.ru/product/ur5> (дата обращения: 22.01.2015).
13. Робот для массажа Бейджингского технологического института. URL: <http://www.youtube.com/watch?v=8LBFUaylbnc&t=40> (дата обращения: 22.01.2015).
14. Колобов А. А., Кочетов В. В., Омельченко И. Н. и др. Экономика инновационной деятельности наукоемких предприятий. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2007. 383 с.

## Specific Features of Designing of the Robotic Systems for the Restorative Medicine

V. F. Golovin, [medicalrobot@mail.ru](mailto:medicalrobot@mail.ru)✉, M. V. Arkhipov,

Moscow State Industrial University, Moscow, 115280, Russian Federation,

V. E. Pavlovskiy, [vlpavl@mail.ru](mailto:vlpavl@mail.ru), Institute of Applied Mathematics, Moscow, 125047, Russian Federation

Corresponding author: Golovin Vadim F., Chief of Robotics Laboratory, Moscow State Industrial University, Moscow, 115280, Russian Federation, e-mail: [medicalrobot@mail.ru](mailto:medicalrobot@mail.ru)

Received on April 30, 2015

Accepted on May 15, 2015

*The topic of this article is the role of the robotic systems in the restorative medicine and specific features of designing of such systems. The authors note the priority of the domestic developments in the area of the restorative medicine and the growing interest to them in the world. The specific features of the design of robotic systems for the restorative medicine are connected, first of all, with the live biological human soft tissues, their variable viscous-elastic properties, non-invasive nature of the mechanical influence, and various tools. Presently the robotic systems appear, which encourages development of the service systems of the public health care. The theoretical value of the work consists in presentation of the robotic systems for the restorative medicine with three components of the ergotic system, of which two components — physician and patient — are not technical objects but live intelligent subsystems. In this work the technical requirements for the parameters and units of the robotic systems for the restorative medicine are described, including the working area, developed efforts, speeds, accuracy, control systems, interface and tools. It is necessary to take into account the problems of safety, economic efficiency, interaction of robots and human-patients. The authors provide examples of technical requirements to the development of the robotic systems for the restorative medicine. In conclusion, they summarize the specific features of the robotic systems for the restorative medicine.*

**Keywords:** robotic system, restorative medicine, bio-mechatronic modules, technical requirements, life cycle, ergonomics

**Acknowledgements:** This work was supported by the grant of the President of the Russian Federation MK-2511.2014.8

For citation:

**Golovin V., Arkhipov M., Pavlovskiy V.** Specific Features of Designing of the Robotic Systems for the Restorative Medicine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 664–671.

DOI: 10.17587/mau.16.664-671

#### References

1. **Jurevich E. I.** *Osnovy proektirovaniya tehniki* (Basics of technical systems designing), SPb., Publishing house of SPbGTU, 2001 (in Russian).
2. **Loshhilov V. I., Shukin S. I.** *Principy analiza i sinteza biotekhnicheskikh sistem* (The principles of analysis and synthesis of biotechnical systems), Mocsow, Publishing house of MVTU im. N. Je. Baumana, 1987, 67 p. (in Russian).
3. **Tavakoli M., Patel R. V., Moallem M., Aziminejad A.** Haptics for teleoperated surgical robotic systems, Monograph series in the World scientific publishing under the title "New frontiers in robotics", Singapore, World Scientific Publishing Company, 2003, 290 p.
4. **Savrasov G. V.** *Medicinskaja robototekhnika: sostojanie, problemy i obshhie principy proektirovaniya* (Medical robotics: state, problems and general design principles), *Vestnik MGTU im. Baumana N. Je., Specvyпуск "Biomedicinskaja Tehnika i Tehnologija, Ser. "Priborostroenie"*, 1998 (in Russian).
5. **Golovin V. F., Zhuravlev V. E., Arkhipov M. V.** Robotics in Restorative Medicine, LAP LAMBERT Academic Publishing, GmbH & Co. KG, 2012, 270 c.

6. **Golovin V. F., Arkhipov M. V., Zhuravlev V. E.** Force Training for Position/Force Control of Message Robots. Mechanisms and Machine Science, New Trends in Medical and Service Robots, Springer International Publishing, Switzerland, 2014, vol. 20, pp. 95–109.

7. **Zabludovskij V. I.** *Materialy k voprosu o dejstvii massazha na zdorovyh ljudej* (Materials for the issue of the effect of massage for healthy people), Phd theses, SPb., 1882 (in Russian).

8. **Golovin V. F., Samorukov A. E.** *Sposob massazha i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija* (Massage method and device for its implementation), Ros.patent № 2145833 ot 08.05.1998 (in Russian).

9. **Massazhnye kresla** (Massage Chairs), available at: <http://www.discountleatherchair.com/osaki-massage-recliners.html> (data of access: 22.01.2015).

10. **Massazherij dlja golovy i tela** (Massage for the head and the body), available at: <http://www.massagerell.ru> (data of access: 22.01.2015).

11. **Roboty Kuka** (Robots Kuka), available at: [http://www.kukalabs.com/en/medical\\_robotics/lightweight\\_robotics/](http://www.kukalabs.com/en/medical_robotics/lightweight_robotics/) (data of access: 22.01.2015).

12. **Robots UR**, available at: <http://fam-robotics.ru/product/ur5> (data of access: 22.01.2015).

13. **Robot dlja massazha Bejdzhingskogo tehnologicheskogo institute** (Robot massage Bejdzhing Institute of Technology), available at: <http://www.youtube.com/watch?v=8LBFUaylbcn#t=40> (data of access: 22.01.2015).

14. **Kolobov A. A., Kochetov V. V., Omel'chenko I. N.** *Jekonomika innovacionnoj dejatel'nosti naukoemkih predpriyatij* (The economy of innovation high-tech enter), Moscow, Publishing house of MGTU im. Baumana, 2007 (in Russian).

УДК 621.865.8

DOI: 10.17587/mau.16.671-678

**Д. Р. Богданов**, науч. сотр., [dr\\_bog@mail.ru](mailto:dr_bog@mail.ru), **О. В. Даринцев**, д-р техн. наук, зав. лаб., [ovd@uimech.org](mailto:ovd@uimech.org),  
Институт механики им. П. П. Мавлютова Уфимского научного центра РАН, г. Уфа

## Кинематика манипулятора с управляемым изгибом на базе твердых элементов со сферической поверхностью

*Рассматривается новый класс манипуляторов, построенных на базе звеньев с управляемым изгибом, формируемых из твердых элементов со сферической поверхностью. Описана методика построения полной кинематической модели звена подобного манипулятора. Приводятся результаты компьютерного моделирования движения манипулятора (прямая задача кинематики), построенного на базе одного, двух, трех и четырех звеньев, которые подтверждают адекватность построенных математических моделей с учетом принятых допущений. Получено решение обратной задачи кинематики для рабочей точки звена с учетом его положения в рабочем пространстве.*

**Ключевые слова:** манипулятор с управляемым изгибом, кинематика, кинематический анализ, прямая и обратная задачи

### Введение

В последнее время значительно расширяются области применения роботов. Так, ускорились работы в сервисной и социальной робототехнике, отмечается увеличение числа тем по роботам двойного назначения, не осталась без внимания исследователей также тема спецтехники. Общей чертой вышеперечисленных направлений является необходимость разработки новых манипуляционных схем, лишенных основного недостатка промышленных манипуляторов — жесткости конструкции. Одним из представителей семейства нетипичных конструкций манипуляторов являются плоские и пространственные механизмы, постро-

енные на базе звеньев с управляемым изгибом [1]. Пример одного из последних на сегодняшний день решений по созданию такого манипулятора можно увидеть в работе зарубежных ученых [2]. Вопросы управления подобными манипуляторами освещены в отечественной и зарубежной литературе не в полной мере, так как синтез систем управления достаточно сложен и обусловлен многообразием конструкторских решений таких манипуляторов, специфичностью базовых перемещений и средств их реализации. Особый интерес представляет использование гибких манипуляторов в микроробототехнике, но такой вариант использования еще более усложняет проблему синтеза, поскольку значительно увеличивается возмущающее воздействие среды на