

На правах рукописи

Архипов Максим Викторович

БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫМ
РОБОТОМ ДЛЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ МЕДИЦИНЫ

Специальность: 05.11.17

«Приборы, системы и изделия медицинского назначения»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2012

Работа выполнена в Московском государственном индустриальном университете на кафедре «Автоматика, информатика и системы управления»

Научный руководитель: Кандидат технических наук,
доцент Головин Вадим Федорович

Научный консультант: Доктор медицинских наук,
академик РАМН РФ
Разумов Александр Николаевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук,
профессор Парашин Владимир Борисович

Кандидат технических наук,
доктор биологических наук,
профессор Лищук Владимир Александрович

Ведущая организация: Государственное научное учреждение "Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики" (ЦНИИ РТК)

Защита состоится «28» марта 2012 года в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 208.001.01 при Всероссийском научно-исследовательском и испытательном институте медицинской техники (ВНИИИМТ) Росздравнадзора по адресу: 129301, г. Москва, ул. Касаткина, д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВНИИИМТ.

Автореферат разослан «18» февраля 2012 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук



Козловский Э.Б.

Общая характеристика работы

Актуальность. В настоящее время в России и за рубежом наблюдается рост числа разработок, направленных на повышение эффективности и безопасности лечебно-профилактических мероприятий в восстановительной медицине (восстановление функциональных резервов человека, повышение уровня его здоровья, качества жизни, повышение работоспособности путем применения преимущественно немедикаментозных методов). Среди множества нелекарственных средств для профилактики и лечения, гармонизации физической и психической деятельности человека наиболее естественными являются механические неинвазивные воздействия на мягкие ткани человека, т.е. разнообразный массаж. Повысить массовость и эффективность этих оздоровительных процедур можно путем использования аппаратных средств массажа, о чем писал русский ученый Н.В. Заблудовский еще в XIX веке. Разработка и применение таких аппаратов позволит освободить врача от рутинной работы при массовом приеме пациентов. В настоящее время известны не только механизированные аппаратные средства массажа, но и автоматизированные средства, например, электровибраторы, массажные кресла. В последнее время наиболее эффективными признаны автоматические аппаратные средства массажа, среди которых наибольшими возможностями обладает манипуляционная робототехника, например, робот для шлейф-массажа, автоматизированная рука фирмы Meilus, робот для массажа лица WAO-1, массажный робот для тела Wheeme. Одной из перспективных разработок в области восстановительной медицины является робот, разработанный в МГИУ, выполняющий приемы механотерапии и массажа.

Опыт применения роботизированного массажа показал, что потенциально робот может воспроизвести как угодно сложные движения и успешно имитировать технику массажиста. Но существующие массажные средства выполняют предписанные механические воздействия на пациента, не оценивая объективно терапевтический эффект. В связи с этим необходимо контролировать параметры пациента, которые зависят от массажа, чтобы оценивать прогресс и эффективно управлять воздействием.

Если параметры состояния пациента измеримы, возникает возможность рационально управлять ими или, например, поддерживать в диапазоне нормы. Такой принцип управления используется в ряде биотехнических систем (биопротезы, искусственное сердце), а также при создании манипуляционного робота для восстановительной медицины. В связи с этим возникает задача разработки биотехнической системы (БТС) управления манипуляционным роботом для восстановительной медицины, которая обеспечит эффективность, безопасность и согласованное взаимодействие врача-оператора, робота и пациента.

Поскольку массажное воздействие является механическим, необходимым условием реализации биотехнического управления является контроль положений и усилий, что обеспечивает внутренний контур биотехнической системы управления – контур позиционно-силового управления (ПСУ).

Объектом исследования в настоящей работе является биотехническая система управления манипуляционным роботом, в первую очередь для оздоро-

вительного массажа на основе информации о мышечном тоне и электрокожном сопротивлении пациента.

Целью работы является повышение эффективности и безопасности оздоровления людей за счет разработки биотехнической системы управления манипуляционным роботом для восстановительной медицины.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **научные задачи**:

1. Провести анализ биотехнических систем в робототехнике и медицине с целью определения возможностей повышения эффективности и безопасности оздоровления людей.

2. Разработать модели, методы и алгоритмы биотехнического управления манипуляционным роботом для восстановительной медицины.

3. Разработать программные и аппаратные средства манипуляционного робота с биотехническим управлением.

4. Провести испытания на моделях, макетах и в медицинских учреждениях с использованием предложенных алгоритмов.

5. Определить требования, предъявляемые к биотехнической системе манипуляционного робота для восстановительной медицины.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложен метод биотехнического управления манипуляционным роботом для восстановительной медицины, позволяющий формировать на основе измеряемых биомедицинских параметров пациента дозированное массажное воздействие в автоматическом режиме.

2. Разработана математическая модель процессов тонизации и релаксации пациента при массажном воздействии, позволяющая провести настройку регулятора биотехнической системы.

3. Разработаны и реализованы алгоритмы биотехнического управления манипуляционным роботом для восстановительной медицины на основе информации об электрокожном сопротивлении и тоне мышц.

4. Сформулированы требования с позиций биотехнического и позиционно-силового управления, предъявляемые к разработке биотехнических систем манипуляционных роботов для задач восстановительной медицины.

Практическая ценность работы.

1. Биотехническая система управления манипуляционным роботом для массажа с внутренним позиционно-силовым контуром управления повышает эффективность и безопасность взаимодействия робота и пациента.

2. Разработанная биотехническая система и алгоритмы биотехнического управления могут быть использованы при управлении универсальными и специализированными роботами и другими аппаратными средствами для массажа.

3. Полученные результаты исследований показывают возможность использования сигналов электрокожного сопротивления и мышечного тона для управления процессами тонизации и релаксации пациента при массаже.

4. Предложенная конструкция силового модуля используется для задач как позиционно-силового, так и биотехнического управления роботом.

5. Проведенные эксперименты и испытания на опытном образце в РНЦ ВМиК подтверждают работоспособность разработанных алгоритмов.

Методы и средства исследований. Для решения поставленных задач используются методы теории автоматического регулирования, теории нечетких вычислений и адаптивного управления. Исследование работоспособности разрабатываемых алгоритмов проводится путем моделирования с использованием математических пакетов MBTU 3.7, Matlab Simulink, а также на модернизированном роботе на базе РМ-01 в РНЦ ВМиК.

Достоверность основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается корректностью разработанных моделей, сопоставлением результатов моделирования с расчетом, результатами вычислительных и медико-биологических испытаний по тестированию созданных алгоритмов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Возможность применения манипуляционной робототехники с биотехническим и позиционно-силовым управлением для задач восстановительной медицины.

- Возможность использования сигналов электрокожного сопротивления и мышечного тонуса для управления процессами тонизации и релаксации пациента при массажном воздействии манипуляционным роботом.

- Математическая модель с переменными параметрами, описывающая процессы тонизации и релаксации при массажном воздействии манипуляционного робота на организм пациента.

- Алгоритмы биотехнического управления манипуляционным роботом для восстановительной медицины.

- Требования, предъявляемые к проектированию биотехнических систем манипуляционных роботов для восстановительной медицины.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации представлены на научных семинарах в МГИУ (Москва 2008, 2009, гг.), на 17-й и 18-й научно-технических конференциях «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2006, 2007 гг.), на Международной конференции UNESCO (Москва, 2007, 2009 гг.), на 7-й Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи НТТМ-2007 (Москва, 2007 г.), на международной выставке «Робототехника» 2007 г., а также легли в основу работ по гранту РФФИ №09-08-00261-А.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 10 научных работах, и патенте РФ на полезную модель «Биоуправляемый массажный робот» № 2011100884 от 16.03.2011.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы, представлена новизна, сформулированы цели и задачи диссертации.

В **первой главе** приводятся данные о необходимости применения восстановительной медицины и её возможностях в решении проблем здоровья здоро-

вых. Проведен анализ методов восстановительной медицины. Показано, что среди множества видов немедикаментозной терапии методы механотерапии и массажа являются наиболее естественным, неспецифическим и доступным средством массового оздоровления людей. Отмечается, что массаж применяют не только для здоровых людей, но и для восстановления нормальной деятельности всего организма при заболеваниях и травмах. Повысить доступность и эффективность массажа могут аппаратные средства – механизированные, автоматизированные, автоматические (в том числе роботы). Показано, что по сравнению с существующими аппаратными средствами, в том числе распространенными массажными креслами, манипуляционная робототехника предоставляет большие возможности за счет высокой степени дозированной воздействия, высокой способности выполнять сложные манипуляции, многократности точных повторений движений, неустойчивости, добросовестности, возможности адаптации к индивидуальности пациента.

Эффективность выполнения массажа аппаратными средствами может контролироваться путем измерения и коррекции биомедицинских параметров пациента. Это достигается управлением массажным роботом как биотехнической системой. В такой системе управление осуществляется по биомедицинским параметрам состояния, т.е. биотехническое управление (БТУ). Общая классификация систем с биотехническим управлением, в которой определено место данной разработки, приведена на рис. 1.



Рис. 1. Классификация систем БТУ

Примерами таких биотехнических систем являются: биоуправляемые протезы, искусственное сердце, система искусственной вентиляции легких, велотренажер с обратной связью по ЧСС, включающие биологические и технические компоненты.

В процессе анализа выявлено, что существующие методы БТУ в рассмотренных биотехнических системах нельзя реализовать простым переносом в манипуляционных роботах для массажа. Необходимо использовать методы и разработать алгоритмы управления БТС, учитывающие особенности восстановительной медицины.

Во **второй** главе представлена структура биотехнической системы управления манипуляционным роботом для восстановительной медицины, которая включает три активные компоненты: врача-оператора, манипуляционного робота и пациента.

Известны внедрения робототехники в медицину, где помимо робота и оператора, вводится ещё один человек – пациент. Примерами таких биотехнических систем являются хирургический робот Da Vinci, микрососудистый робот разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Принципиально новой задачей для медицинской робототехники является учёт биомедицинских параметров пациента, в которых отражается эффективность массажного воздействия и достигаемый прогресс. Наличие пациента в контуре управления биотехнической системы предъявляет ряд требований, включающих учёт его параметров в процессе массажа, требования к параметрам массажного воздействия по скорости и усилию, требования к эргономике и безопасности.

Контролировать эффективность выполнения процедур с помощью оценки работоспособности и самочувствия пациента для БТУ затруднительно. Чтобы обозначить критерии эффективности для БТУ рассматриваются количественные оценки результатов физиотерапевтических процедур, т.е. определяются физические измеримые биомедицинские параметры и требуемые диапазоны их изменения при массаже.

Впервые установлено, что, в сравнении с другими параметрами (артериальное давление, частота сердечных сокращений), в наибольшей степени массажное воздействие проявляется в электрокожном сопротивлении (ЭКС) $R(t)$ и мышечном тоне (ТМ) $K(t)$, отражая процессы тонизации и релаксации. Эти два физиологических показателя выступают в качестве регулируемых величин. В других биомедицинских параметрах пациента, таких как артериальное давление $P(t)$, систолическое (СД) и диастолическое (ДД), частота сердечных сокращений (ЧСС) $f(t)$, в меньшей степени проявляется массажное воздействие; эти параметры могут использоваться для повышения безопасности как сигналы прекращения массажа в случае, если они превышают нормативный диапазон. Таким образом, вектор реальных биомедицинских параметров определяется как: $\mathbf{B}(t)=(R(t), K(t), f(t), P(t))$.

В таблице 1 приведены численные показатели колебаний отмеченных биомедицинских параметров во время одного из сеансов массажа. Для сопоставления все измеряемые показатели приводятся в единую систему измерений.

Наибольшие отклонения наблюдаются у параметров ЭКС и ТМ, что отражает их информативность и большую степень зависимости от массажа.

Таблица 1.

Амплитуда колебаний параметров пациента при массажном воздействии

Параметры состояния	Отклонение от минимального	
	Абсолютные единицы	%
СД, мм.рт.ст.	20	15
ДД, мм.рт.ст.	22	15
ЧСС, уд./мин.	21	30
ЭКС, кОм	551	41
ТМ, Н/мм	0,6	75

Изменение состояния пациента в процессе массажного воздействия может проявляться в виде «тонизации» (B_e) и «релаксации» (B_r). Эти два процесса противоположны по действию: тонизация связана с возбуждением нервной системы и активацией общего состояния, релаксация же направлена на глубокое мышечное расслабление, сопровождающееся снятием психофизиологического напряжения.

На рис. 2а схематично показана биофизическая модель измерения ЭКС. Определяющим фактором его изменения является активность секреции эккринных потовых желез, сосредоточенных, в основном, на ладонях. Величину ЭКС определяют измеряя напряжение U_{AB} , возникающее вследствие контактной разности потенциалов E_- и E_+ , между электродами и раствором NaCl выделяемого потовыми железами на поверхность внутренней стороны ладоней. Экспериментально показано, что можно пренебречь приэлектродной поляризацией E_p и упростить электрическую схему (рис. 2б).

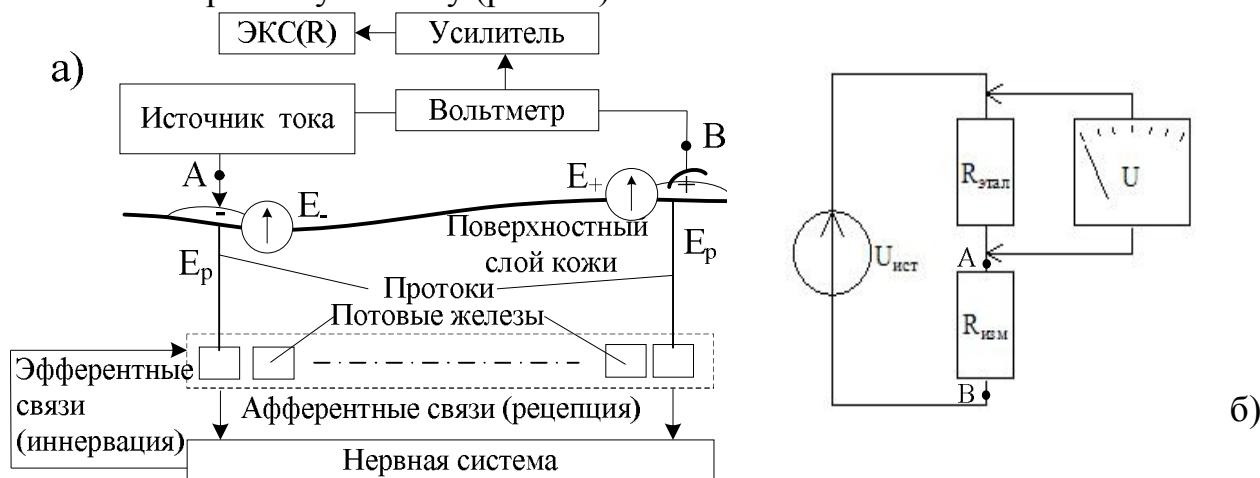


Рис. 2. Биофизическая модель измерения ЭКС и электрическая схема

В схеме измерительного устройства используется подстраиваемый активный внешний источник $U_{ист}$ (метод Фере). Зная эталонное сопротивление $R_{этал}$ и напряжение U на нём, а также напряжение U_{AB} , вычисляется $R_{изм}$:

$$R_{изм} = R_{этал} \cdot ((U_{ист}/U) - 1) \quad (1)$$

Анализ приборов, измеряющих ЭКС, использующихся в настоящее время в различных прикладных областях (в детекции лжи, обучении с биологической обратной связью, аутотренингах), определяет оптимальные технические характеристики измерительных схем (табл. 2), в том числе для системы «Альфаритмика», используемой в данных исследованиях.

Таблица 2.

Технические характеристики измерения ЭКС

Напряже- ние, В	Ток, мкА	Количество электричества, мкА·с	Мощность, мкВт	Работа, мкВт·с	Плотность то- ка, мкА/см ²
9	2	2	18	18	0,8

Помимо ЭКС, массажное воздействие проявляется и в изменении свойств МТ, включающей мышцы, фасции, кожу, жировую прослойку, связки и пр.

На рис. 3а приводится биофизическая модель, отражающая рефлекторные процессы в МТ. Для определения ТМ используется метод статической оценки установившихся значений усилия (F) и деформации (Δ) при перемещении мио-тонометра с пружинным компенсатором на величину x . Сигнал напряжения на катушке, эквивалентный зависимости $F(\Delta)$, характеризует тонус мышц, отражающий степень напряжения МТ. При медленно меняющемся характере $F(\Delta)$ оценка ТМ может проводиться дискретно.

Поскольку величины деформаций для мягких тканей составляют единицы и десятки миллиметров, измерительная схема может быть упрощена (рис. 3б).

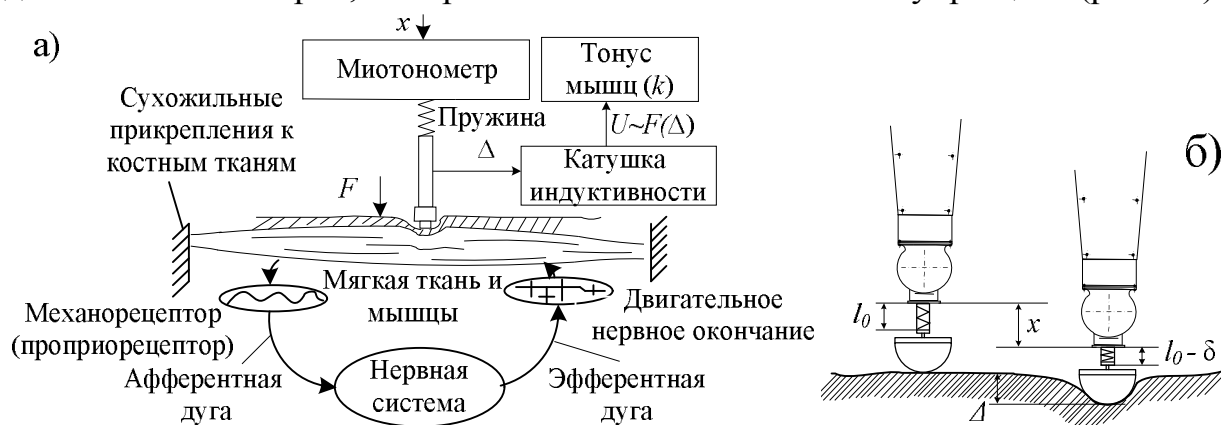


Рис. 3. Биофизическая модель измерения ТМ и измерительная схема

В схеме на рис. 3б показан фрагмент измерения роботом ТМ. При известных длине l_0 , деформации пружины δ , x и F , вычисляемого тарировкой пружины жесткостью K_{np} , ТМ определяется в любой точке $F(\Delta)$ по формуле:

$$K = K_{np} \cdot \delta / (x - \delta) \quad (2)$$

При мануальном выполнении процедур массажисты руководствуются тактильными ощущениями. Поэтому уместно говорить о проектировании роботов, использующих силовую информацию о рельефе и вязкоупругих свойствах МТ тела пациента. Основными переменными такого вида управления будут координаты контакта $X(t)$ и усилия взаимодействия инструмента робота с МТ пациента $F(t)$.

В общем случае вектор $X(t)$ представляет пространственные координаты положения и ориентации, зависящие от времени, например:

$$X(t) = (x, y, z, o, a, n)^T.$$

Вектор усилий в общем случае представляется шестимерным

$$F(t) = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)^T,$$

где F_x, F_y, F_z – усилия вдоль осей неподвижной или инструментальной системы координат, а M_x, M_y, M_z – моменты вокруг осей.

Тогда задача ПСУ формулируется как обеспечение роботом позиционной траектории $X(t) \rightarrow X_0(t)$ и силовой траектории при контактном взаимодействии инструмента робота с телом пациента $F(t) \rightarrow F_0(t)$.

Для задания пространственной траектории существуют различные методы: с помощью расчётных узловых точек; с помощью точек или непрерывной кривой, переданных, например, от системы технического зрения; с помощью обученных точек или обученной кривой.

Отмечая неопределённость геометрии и упругих свойств МТ, уместно предложить для ПСУ методы, связанные с предварительным обучением. Для массажа предварительное обучение состоит в запоминании геометрии массируемого участка и распределения упругостей МТ по участку. Тогда каждая обученная точка A будет представлена двенадцатимерным вектором:

$$A=(x, y, z, o, a, n, F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z).$$

Таким образом, для пациента процедура будет состоять из двух этапов: обучения геометрии массируемого участка и распределения упругостей, затем позиционного или силового отслеживания программируемых на обученной поверхности массажных траекторий. Такая адаптация подстраивает систему не в процессе исполнения основной процедуры, а предварительно определяя среду, что позволяет выполнять массажные процедуры индивидуально на каждом пациенте. Таким образом, метод обучения обладает свойством интерактивности и универсальности, которые позволяют сохранить работоспособность метода при изменении рельефа от пациента к пациенту.

При проектировании биотехнической системы управления манипуляционным роботом для восстановительной медицины с обозначенными биотехническими обратными связями применена двухконтурная система (рис. 4). Система включает в себя два замкнутых контура управления – биотехнический и силовой. В данной работе рассматривается биотехническая обратная связь (выделена на рис. 4). Основными переменными данного контура являются регулируемые параметры вектора B – сигналы ЭКС и ТМ. Объектом управления в системе (показан пунктиром) являются процессы релаксации и тонизации пациента в процессе массажа.

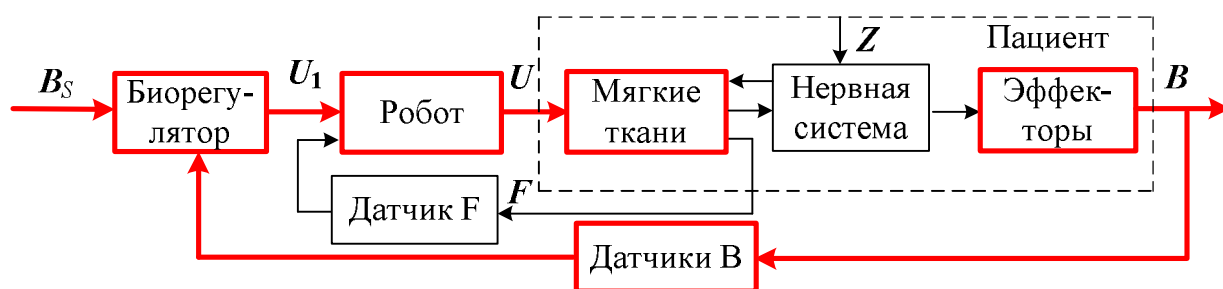


Рис. 4. Структурная схема системы

На рис. 4 обозначены: B_S , U_1 – векторы заданных биомедицинских параметров и рассчитанных управляющих воздействий, Z – вектор возмущающего воздействия.

В биотехнической системе выделены два уровня управления:

- нижний – исполнительный, обеспечивающий управление системой приводов робота, контролируя силу F и положение X ;
- верхний – тактический, осуществляющий формирование параметров управляющего воздействия U по сигналам вектора B .

Третья глава посвящена алгоритмам биотехнического управления манипуляционным роботом для восстановительной медицины по биомедицинским параметрам пациента. Биотехническая система робота как массажного средства должна оценивать показатели эффективности механического воздействия и целенаправленно изменять регулируемые величины.

Компоненты вектора $\mathbf{B}$ для каждого человека индивидуальны и зависят от его антропометрических данных, биоритмов в организме, влияния внешней среды. Экспериментально подтверждено, что из большинства возможных состояний надежно регистрируются только резко выраженные виды – тонизация $\mathbf{B}_e$ и релаксация $\mathbf{B}_r$. Перед началом процедуры параметры $\mathbf{B}_0$ могут соответствовать как $\mathbf{B}_e$, $\mathbf{B}_r$, $\mathbf{B}_S$, так и промежуточным. В этом случае основной функцией массажа является нормализация или поддержание биомедицинских параметров в норме $\mathbf{B}_S$.

Тогда задача БТУ формулируется как обеспечение биотехнической системой робота перевода регулируемых величин из начального состояния $\mathbf{B}_0$ в целевое $\mathbf{B}_S$ за время $\theta_n = t_{n1} - t_{n0}$, где t_{n0} и t_{n1} – время начала и окончания процедуры соответственно, n – номер сеанса:

$$\mathbf{B}_0(t) \xrightarrow{\theta_n} \mathbf{B}_S(t), \quad \mathbf{B}(t) = (R(t), K(t))^T \quad (3)$$

Проведенные на множестве пациентов эксперименты при мануальном и роботном исполнении массажа показывают определенные закономерности переходных процессов ЭКС и ТМ, при релаксации и тонизации. На рис. 5 и 6 приведены реализации процессов $R(t)$ и $K(t)$ в циклах, содержащих приемы, вызывающие релаксацию и тонизацию.

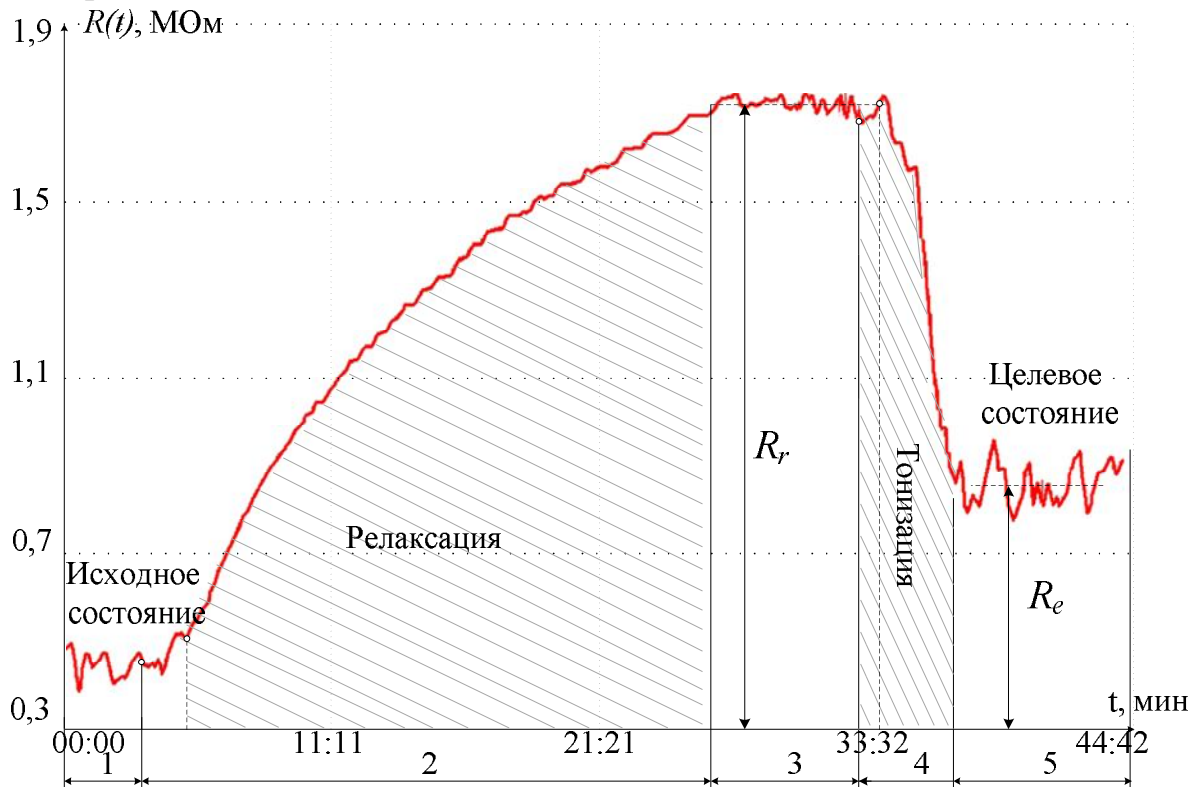


Рис. 5. Кривая ЭКС в сеансе массажа

Релаксацию вызывают массажные приемы медленного глубокого выжимания и разминания, проявляется релаксация в экспоненциальном повышении ЭКС и экспоненциальном снижении ТМ. Тонизацию вызывают массажные приемы быстрых легких воздействий, проявляется тонизация в экспоненциальном снижении ЭКС и экспоненциальном повышении ТМ.

На рис. 5 выделены пять фаз массажного цикла: 1 – пациент лежит на кушетке без массажа; 2 – релаксационный массаж до установившегося значения ЭКС (R_r); 3 – релаксационный массаж при установившемся значении ЭКС; 4 – тонизирующий массаж до установившегося значения ЭКС (R_e); 5 – пациент лежит на кушетке без массажа.

На рис. 6 выделены две фазы массажного цикла – релаксация и тонизация. Значения ТМ определялись в четырнадцать моментах времени при величине усилия $F=2$ кгс.

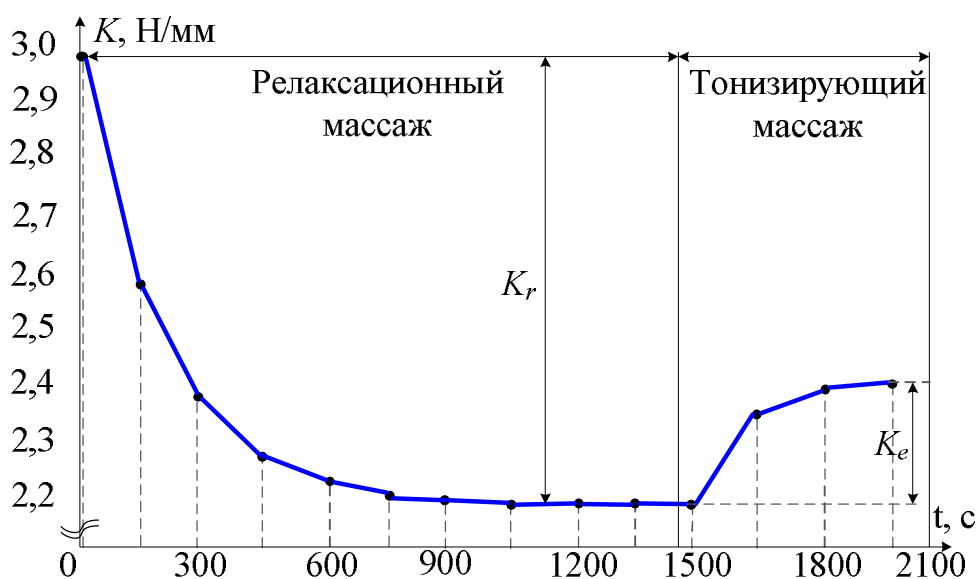


Рис. 6. Результаты тонусометрии при массаже

Учитывая два вида постоянных воздействий (релаксирующего и тонизирующего), экспоненциальные переходные процессы ЭКС и ТМ можно рассматривать как решение дифференциального уравнения с правой частью в виде ступенчатой функции $U_0 \cdot 1[t]$:

$$T \cdot \frac{d \mathbf{B}(t)}{dt} + \mathbf{B}(t) = \mathbf{U}(t) \quad (4)$$

В уравнении приняты следующие обозначения:

$\mathbf{B}(t) = (R(t), K(t))^T$ – вектор регулируемых величин;

T – матрица постоянных времени процессов тонизации и релаксации.

$$T = \begin{pmatrix} T_R & 0 \\ 0 & T_K \end{pmatrix} \quad (5)$$

T_R и T_K – постоянные времени, скачком изменяющие свои значения в фазах релаксации и тонизации, $T_R = T_K = 1225 \div 1775$ секунд для фазы релаксации, $T_R = T_K = 60 \div 180$ секунд для фазы тонизации;

$U(t)=(U_{0R} \cdot 1[t], U_{0K} \cdot 1[t])^T$ – вектор управляющих воздействий;

U_{0R} и U_{0K} – коэффициенты для согласования размерностей, зависящие от усилия и скорости массажного воздействия.

При обозначенных условиях дифференциальное уравнение как математическое описание объекта управления может быть удобно для моделирования систем биотехнического объекта.

Ряд алгоритмов биотехнического управления относятся к ЭКС, ТМ и их сочетанию (рис. 7).



Рис. 7. Алгоритмы биотехнического управления

Для моделирования систем БТУ с различными алгоритмами была разработана модель объекта управления в соответствии с предложенным выше дифференциальным уравнением (рис. 8). На рис. 8 показана структура с нелинейными звеньями на примере сигнала ЭКС.

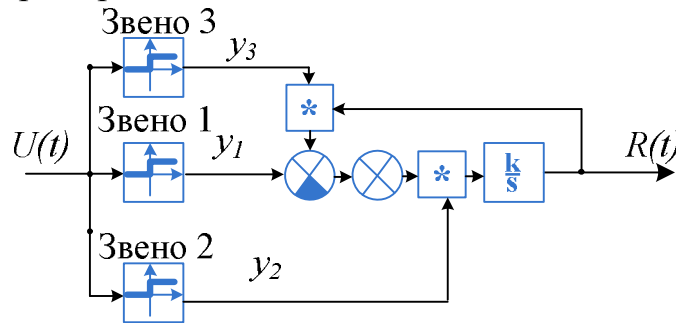


Рис. 8. Схема моделирования реакции на примере ЭКС

Звено 1 отражает направленность реакции центральной нервной системы (ЦНС) пациента на смену режимов воздействия $U(t)$, причём:

$$y_1 = \begin{cases} 1; & \text{если } U(t) = U_r(t), \quad U_r(t) = f(F_r(t), V_r(t)), \\ 0; & \text{если } U(t) = U_e(t), \quad U_e(t) = f(F_e(t), V_e(t)). \end{cases} \quad (6)$$

где $U_r(t)$, $U_e(t)$ – управляющее воздействие при релаксации и тонизации.

Для формирования изменяющихся величин времени релаксации и тонизации используется звено 2, которое переключает параметр $T_R=1/y_2$, например, по следующему закону:

$$y_2 = \begin{cases} 0,001; & (T_R = 1000 \text{ сек}); \text{ если } U(t) = U_r \cdot (t), \\ 0,02; & (T_R = 50 \text{ сек}); \text{ если } U(t) = U_e \cdot (t). \end{cases} \quad (7)$$

Звено 3 необходимо для задания глубины восстановительных процессов с помощью параметра $R_r=1/y_3$ или $R_e=1/y_3$, например:

$$y_3 = \begin{cases} 0,83; (R_r = 1,2 \text{ МОм}); & \text{если } U(t) = U_r \cdot (t), \\ 5; (R_e = 0,2 \text{ МОм}); & \text{если } U(t) = U_e \cdot (t). \end{cases} \quad (8)$$

Параметры управляющего массажного воздействия $U(t)$ изменялись в зависимости от режима воздействия: при релаксации $V_r=20\div40$ мм/с, $F_r=30\div40$ Н, при тонизации $V_e=40\div60$ мм/с, $F_e=10\div20$ Н.

Описанная математическая модель позволяет изучить характерные реакции пациента на массажное воздействие, оценить возможные ошибки, а также разработать биорегулятор и провести его настройку. При моделировании описанного в работе многозвенного манипулятора учитывалось, что переходные процессы в реальном манипуляторе в сравнении с процессами БТУ не оказывают практически никакого влияния на управление, поэтому их можно не учитывать, считая, что манипулятор отрабатывает приемы без запаздываний.

Процессом массажа для людей, у которых во время ряда сеансов наблюдалась стабильная форма кривых ЭКС и ТМ, следует управлять, используя управление по таймеру, например по схеме, как на рис. 9. В данном режиме сигналы ЭКС, также как ЧСС, АД, ТМ, во время процедуры измеряются, но лишь с целью показывать наблюдающему врачу или самому пациенту выполнение запланированного хода процедуры, и могут использоваться для отвода манипулятора в случае превышения установленных диапазонов безопасности. Поскольку исходное состояние пациента может быть как тонизированное, так и релаксированное, предлагается рассматривать два вида циклов (рис. 10). Значения $U_1(t)$ и $U(t)$ представляют рассчитанное и реальное массажные воздействия на пациента.

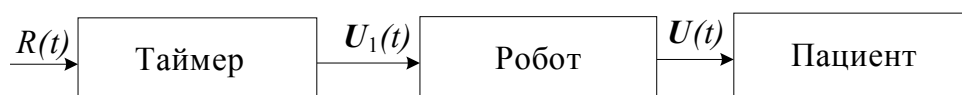


Рис. 9. Структура системы управления роботом для массажа по таймеру

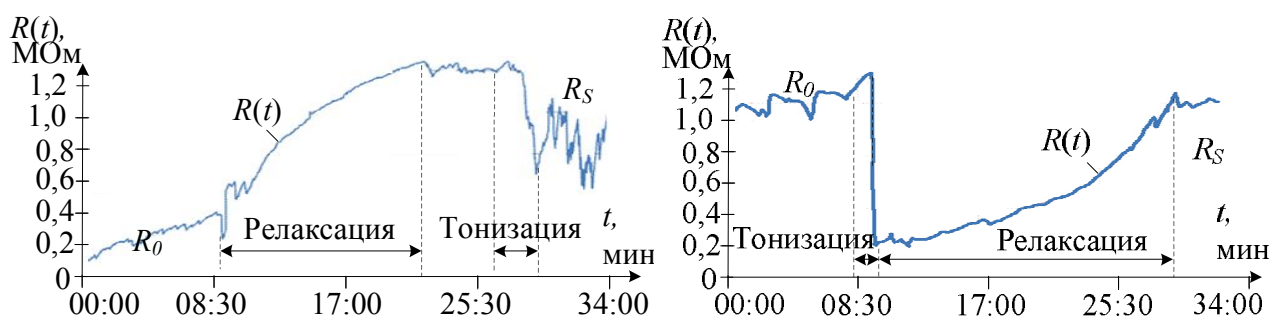


Рис. 10. Циклы БТУ по таймеру при $R_0 < R_S$ (слева) и при $R_0 > R_S$ (справа)

Исследование управления по таймеру проводилось, на модернизированном роботе РМ-01, в главе 4 приводятся результаты экспериментов.

Если цель БТУ состоит в достижении требуемой глубины R , используется управление по уровню. Когда сигнал с датчика $R(t)$ достигает заданного уровня, происходит программное переключение на следующую фазу процедуры. Схема биотехнической системы с управлением по уровню ЭКС показана на рис. 11.

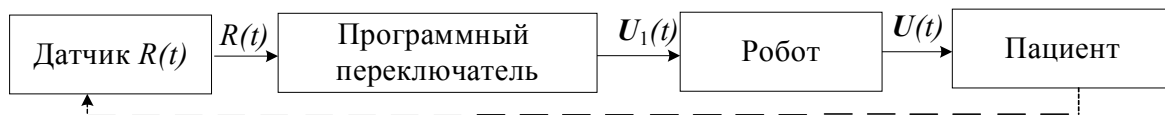


Рис. 11. Структура управления роботом для массажа по уровню сигнала ЭКС

На рис. 12 представлены переходные процессы по ЭКС, полученные при моделировании системы биотехнического управления с управлением по уровню. Воздействие $U(t)$ формируется при сравнении текущих (реальных) сигналов $R(t)$ с уровнями R_r , R_e , полученными в предыдущих сеансах.

Следует отметить, что программный переключатель при известных значениях T_R может обеспечить переключение режимов массажного воздействия $U(t)$, но изменение заданных уровней R_r , R_e и времени T_R влечет появление рассогласования с реальным $R(t)$, пропорционального ошибке.

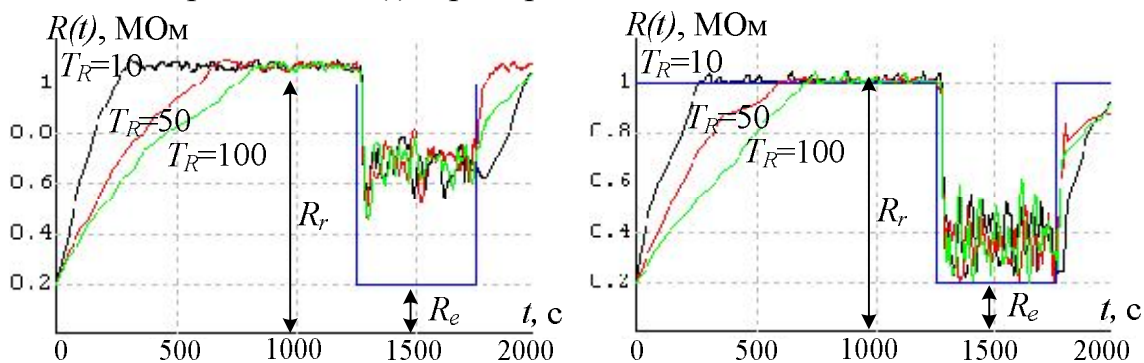


Рис. 12. Переходные процессы в модели БТС с управление по уровню ЭКС

В условиях управления биообъектами в связи с присутствием неопределенностей в интерпретации воздействий и состояния пациента, отсутствия математического описания объекта управления для проектирования регулятора уместно привлекать нечеткие вычисления. Основанием для этого также являются относительные представления о величинах массажных воздействий.

В работе рассматривается возможность проектирования нечеткого регулятора в системе БТУ с обратными связями по ЭКС и ТМ (рис. 13). Значения $F_0(t)$ и $V_0(t)$ представляют заданные усилия и скорости массажного воздействия на пациента, а $F_1(t)$ и $V_1(t)$ рассчитанные. Продукционные правила и функции принадлежности приведены в таблице 3.

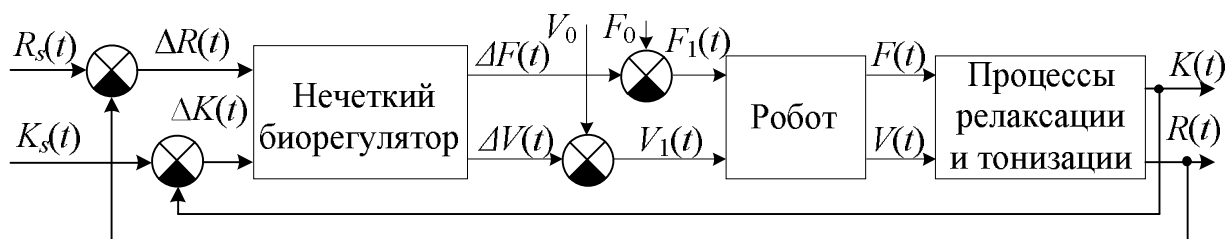
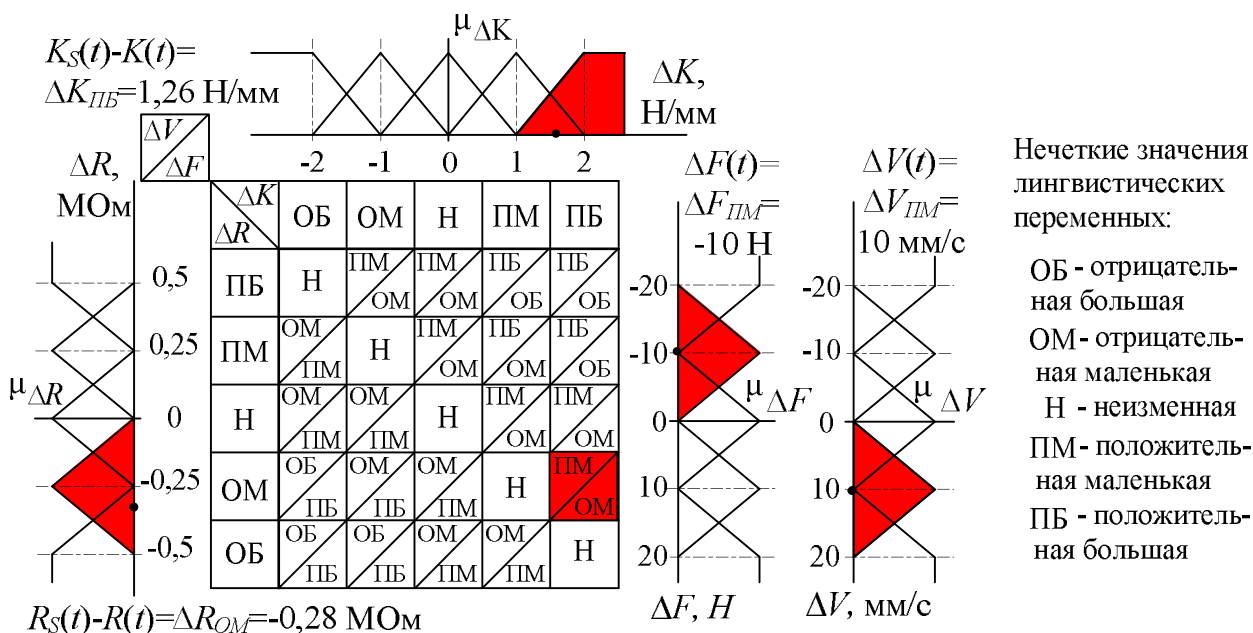


Рис. 13. БТС управления манипуляционным роботом для массажа с нечетким биорегулятором

Правила биотехнического управления скоростью и усилием по ЭКС и ТМ



В отличие от рассмотренных ранее алгоритмов БТУ, нечеткий биорегулятор обеспечивает управление двумя переменными ($F(t)$, $V(t)$) по двум входным каналам, осуществляя более плавное переключение режимов массажного воздействия. Режимы настраиваются путем изменения степени перекрытия функций принадлежности лингвистических переменных $\Delta V(t)$, $\Delta F(t)$.

В **четвертой главе** приводятся результаты экспериментальных испытаний, приводятся методики выполнения исследований на моделях, макетах и пациентах-добровольцах в Российском научном центре восстановительной медицины и курортологии. Алгоритмы, тексты программ и копии протоколов исследований приведены в приложении.

Для оценки изменения свойств мягкой ткани в тех случаях, когда характеристики $F(\Delta)$ близки, но не пересекаются, предлагается метод интегральной оценки ТМ как меры отличия кривых $F_1(\Delta)$ и $F_2(\Delta)$ для единичных реализаций или для осредненных кривых:

$$I = \int_0^{\infty} (F_1(\Delta) - F_2(\Delta)) p(\Delta) d\Delta, \quad (9)$$

где $p(\Delta)$ – весовая функция, определяющая степень доверия в оценке измеренных значений. Для численных оценок с помощью предложенного интегрального метода кривые $F(\Delta)$ совмещаются параллельным переносом вдоль оси Δ , в точке порога $F_{\min}$, ниже которого измерения засорены шумами из-за неопределенности контакта измерительного прибора и непостоянства мягкой ткани.

Для получения информации об изменении I , проведено 12 серий опытов. В качестве обследуемых были отобраны четверо пациентов-добровольцев, которые были разделены на две группы по два человека. В основной (первой) группе каждому испытуемому было проведено 6 сеансов классического масса-

жа с регистрацией параметров мышечного тонуса. В контрольной (второй) группе повторялось все в той же последовательности, но без массажа. В результате каждого сеанса наблюдалась многократно повторяемые характеристики $F(\Delta)$ получаемые на мышце *m. trapezius* у пациентов контрольной и основной групп (рис. 14).

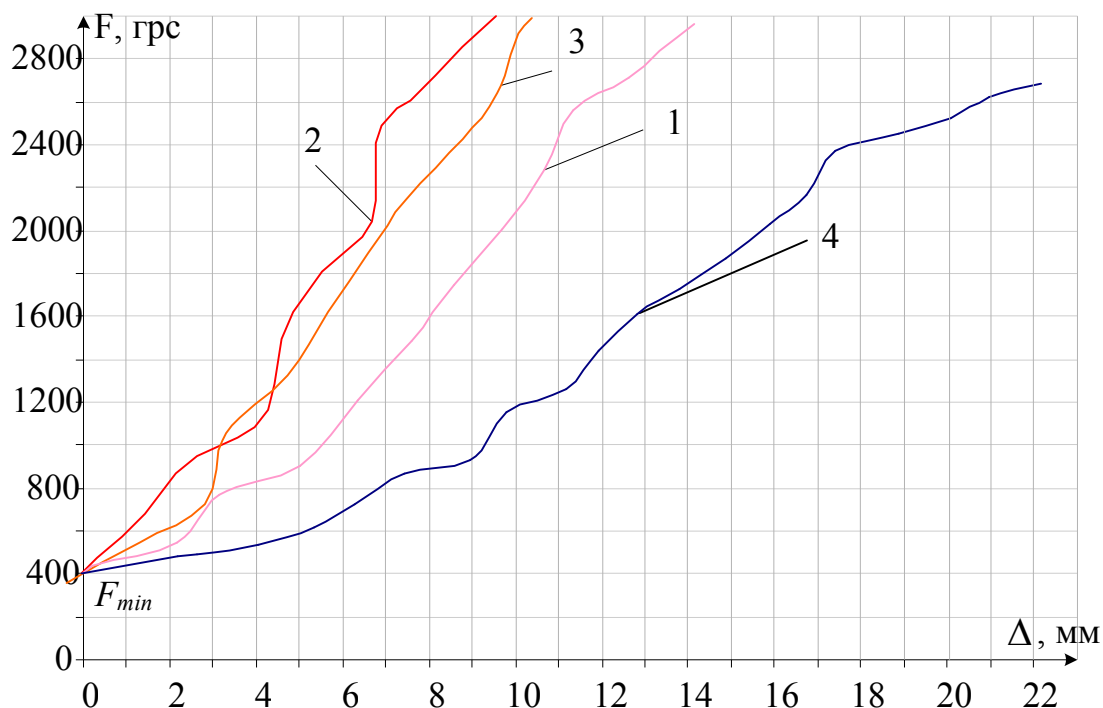


Рис. 14. Характеристики тонуса мышц пациентов при массаже

На рис. 14 показаны результаты тонусометрии в контрольной группе (1 – до отдыха, 2 – после отдыха) и в основной группе (3 – до массажа, 4 – после массажа). Результаты расчета интегральных коэффициентов I и их парное сравнение для четырех характеристик на рис. 14 представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты интегральной оценки характеристик ТМ

Характеристики $F(\Delta)$	1	2	3	4
1	–	$I_{1-2} = 30$	$I_{1-3} = 20$	$I_{1-4} = -80$
2	$I_{2-1} = -30$	–	$I_{2-3} = -15$	$I_{2-4} = -110$
3	$I_{3-1} = -20$	$I_{3-2} = 15$	–	$I_{3-4} = -60$
4	$I_{4-1} = 80$	$I_{4-2} = 110$	$I_{4-3} = 60$	–

По результатам интегральной оценки видно, что в большей степени отличается от всех коэффициент $I_{4-1} = 80$, полученный в основной группе при массажном воздействии. Значение этого показателя в контрольной группе гораздо меньше и составляет $I_{1-2} = 30$. Знак минус в таблице показывает, что результирующая характеристика $F(\Delta)$ стала меньше исходной, также знак зависит от направления сравнения функций. Интегральную оценку в процессе БТУ можно использовать как дополнительный информативный канал, характеризующий

достигаемый прогресс в изменении ТМ в зависимости от параметров массажного воздействия.

Одним из решений робототехнической системы с использованием БТУ для восстановительной медицины является комплекс, представленный на рис. 15. Робот оснащен датчиками усилий и биомедицинских параметров.



Рис. 15. Макет системы БТУ манипуляционным роботом для массажа

С помощью силовых датчиков робот способен обеспечивать необходимое постоянное усилие взаимодействия инструмента робота с МТ. Контроль биомедицинских параметров объективизирует процедуру и повышает её эффективность. Предлагаемый способ и устройство на базе робота РМ-01 запатентованы, на нем проведены исследования совместно с Российским научным центром восстановительной медицины и курортологии.

Проведенные прикладные исследования на разработанном опытном образце позволили получить результаты, которые выражаются в отклонении параметров T , R конкретного пациента от средних значений, представляя собой ошибки при тонизации и релаксации за курс массажа, включающий пять сеансов. Пример графиков ошибок полученных у конкретного пациента в трех указанных режимах управления за пять сеансов массажа на примере сигнала ЭКС показан на рис. 16. На рис. 16 а,б показаны графики ошибок при релаксации, нижние графики (рис. 16 в,г) отражают ошибки при тонизации.

Из данных графиков видно, что при первом и втором сеансах ошибки при управлении по таймеру и уровню значительно больше, чем в системе БТУ с нечетким регулятором, при этом с каждым последующим сеансом разница между ошибками во всех режимах уменьшается. Это говорит о том, что с каждым по-

следующим сеансом накапливается больше информации о влиянии параметров массажа на восстановительные процессы в организме конкретного человека.

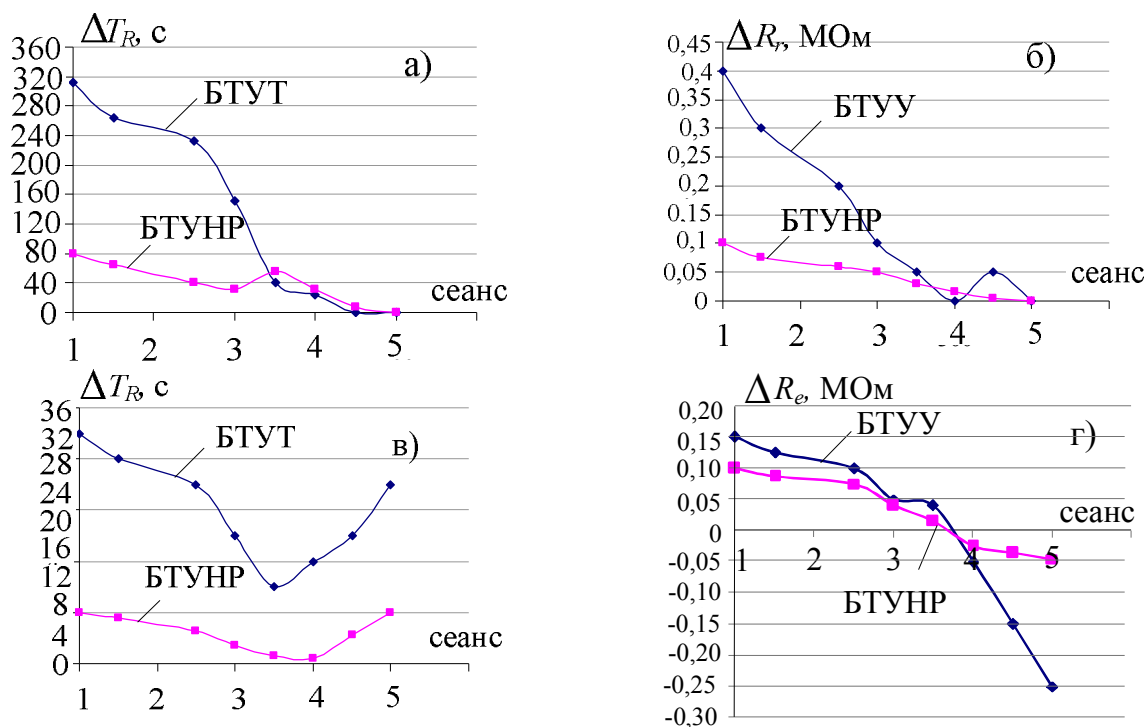


Рис. 16. Сравнение ошибок в системе БТУ с нечетким регулятором (БТУНР) с ошибками в системах БТУ по таймеру (БТУТ) и по уровню (БТУУ)

Таким образом, применяя один из трех режимов биотехнического управления манипуляционным роботом для массажа, можно оценивать какой из них в большей степени повышает эффективность и ускоряет восстановительные процессы у конкретного пациента.

В главе разрабатываются требования, предъявляемые к проектированию биотехнической системы управления манипуляционным роботом для массажа с позиций биотехнического управления, а также требования к обеспечению безопасности пациента:

- исполнительное устройство конструктивно подобно ангулярной руке человека, что позволяет воспроизводить приемы массажа, имитируя технику массажиста;
- наличие ПСУ для формирования дозированного управляющего воздействия по параметрам силы, скорости и количеству повторений;
- наличие двух режимов управления: полуавтоматического, в котором процедура выполняется при непосредственном участии врача-оператора, и автоматического, когда управляющее воздействие формируется БТС управления на основе информации о биомедицинских параметрах пациента;
- учет биомедицинских параметров пациента при тонизации или релаксации с объективным контролем этих процессов по сигналам ЭКС и ТМ;

- для обеспечения безопасности измерительная система, кроме измерения ЭКС и ТМ, дополнительно обеспечивает измерение других биомедицинских параметров (артериальное давление, частота сердечных сокращений);
- нечеткий контроллер должен интерпретировать биомедицинские параметры в управляющие сигналы;
- графический интерфейс врача-оператора должен отображать параметры пациента и иллюстрировать основные сведения о проводимой процедуре (траектория, усилие, скорость);
- пульт управления для врача-оператора или самого пациента должен содержать необходимые средства управления: кнопки, индикаторы для задания и отображения биомедицинских параметров пациента;
- специализированное программное обеспечение должно выполнять функции связи всех компонентов биотехнической системы управления (пульта, системы управления, робота, системы измерения биомедицинских параметров).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе получены следующие научно-технические результаты:

- 1) Разработана двухконтурная система управления роботом, включающая позиционно-силовую и биотехнический контуры управления.
- 2) Определены наиболее информативные параметры (ЭКС и ТМ), которые в наибольшей степени отражают процессы релаксации и тонизации во время массажного воздействия.
- 3) Разработана математическая модель процессов тонизации и релаксации пациента при массажном воздействии, позволяющая провести моделирование биотехнической системы.
- 4) Предложенные в диссертации алгоритмы обеспечивают адекватное и безопасное функционирование манипуляционного робота для восстановительной медицины.
- 5) Разработанный метод биотехнического управления процессом массажа за счет использования силового модуля и измерителя электрокожного сопротивления позволяет повысить безопасность и эффективность процедур.
- 6) Разработан макет манипуляционного робота для массажа с биотехнической системой управления, с помощью которого проведены экспериментальные исследования.
- 7) Сформулированы основные требования к разработке биотехнической системы управления робототехнической системой, включающие эргономические требования к организации взаимодействия трех её компонент: врача-оператора, робота и пациента.
- 8) Проведенные совместные испытания с медицинскими специалистами показали, что применение разработанной биотехнической системы управления роботом позволяет повысить эффективность массажа за счет сокращения времени релаксации в сравнении с манипуляциями ручным способом.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

- 1) Архипов М.В. Биомеханическое управление медицинским роботом в условиях неопределенности // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды 18-й Всероссийской научно-технической конференции Экстремальная робототехника. СПб., 2007. С. 250-260.
- 2) Архипов М.В. Измерение упругости мягкой ткани пациента с применением многофункционального АЦП ЛА-70 для управления медицинским роботом // Труды МГИУ. 2007. С. 16-22.
- 3) Архипов М.В., Головин В.Ф. Алгоритмы биотехнического управления роботом для восстановительной медицины // Экстремальная робототехника: Труды 19-й Всероссийской научно-технической конференции. СПб., 2008. С. 282-287.
- 4) Архипов М.В., Головин В.Ф., Журавлев В.В. Проблемы развития робототехники в восстановительной медицине // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 49-53.
- 5) Архипов М.В., Головин В.Ф., Журавлев В.В. Метод силового обучения при планировании траекторий робота для восстановительной медицины // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. №10 С. 29-30.
- 6) Архипов М.В., Головин В.Ф., Саморуков А.Е. Диагностика состояния пациента при механотерапии на основе электрокожного сопротивления // Мануальный терапевт-врач лечебной физкультуры. 2011. №1-2 С. 10-15.
- 7) Архипов М.В., Головин В.Ф., Журавлев В.В., Саморуков А.Е. Оценка состояния пациента по электрокожному сопротивлению при механотерапевтическом воздействии // Медицинская техника. 2011. № 3. С. 14-17.
- 8) Архипов М.В., Головин В.Ф., Журавлев В.В. Эргатические и биотехнические системы управления в медицинской робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. №5. с. 54-56.
- 9) Архипов М.В., Головин В.Ф., Журавлев В.В. Обзор состояния робототехники в восстановительной медицине // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 8. С. 42-50.
- 10) Биоуправляемый массажный робот. / М.В. Архипов [и др.] // Патент на полезную модель № 2011100884 от 16.03.2011.
- 11) Архипов М.В., Головин В.Ф., Саморуков А.Е. Диагностика состояния пациента при механотерапии по информации о тоне мышц // Бюллетень Московского профессионального объединения мануальных терапевтов. 2011. № 13. С. 34-43.