

05.13.01 ЭАК  
Ч-491

БИБЛИОТЕКА  
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ЦЕНТРА  
ПОДГОТОВКИ КАНДИДАТОВ ВЫСШЕЙ  
СЕРТИФИКАЦИИ

На правах рукописи

ЧЕРНЕЦКАЯ Ирина Владимировна

СИНТЕЗ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ ТРЕНАЖЕРА  
ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ  
ЧЕЛОВЕКА

Специальность 05.13.01 – “Системный анализ, управление  
и обработка информации (промышленность)”

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук.

Челябинск – 2001

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Щипицын А.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Смирнов Ю.С.;

кандидат технических наук,  
доцент Даровских С.Н.

Ведущее предприятие – Федеральное государственное  
унитарное предприятие  
Конструкторское бюро  
“Медавтоматика” (г. Екатеринбург).

Защита состоится 27 июня 2001 г., в 1500 ч, на заседании Диссертационного совета Д 212.298.03 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76 (ауд. 244).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан “\_\_\_” 2001 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,  
к.т.н., доцент

А.М.Коровин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Диссертация посвящена вопросам разработки следящих систем управления тренажера для восстановления двигательной активности человека (в дальнейшем – тренажер), предназначенного для реабилитации пациентов с диагнозом детский церебральный паралич. Данное заболевание полному излечению в настоящее время не поддается, однако весьма эффективным средством при условии правильно и своевременно поставленного диагноза является лечебная физкультура (ЛФ).

Анализ современных методик комплексов ЛФ позволяет сделать вывод о том, что целью комплексов является достижение одновременности выполнения группы движений, поскольку здоровый ребенок никогда не выполняет изолированные движения. Однако медицинский работник, проводящий ЛФ, способен лишь последовательно тренировать отдельные движения, что при неточностях выполнения методики ЛФ может привести к закреплению патологических типов движения, не способствуя развитию двигательной активности.

Поэтому является актуальной проблема создания технической системы, которая, имитируя движения здорового ребенка, обеспечивала бы одновременное принудительное движение частей тела человека в соответствии с выбранной методикой ЛФ, создавая и закрепляя нервно-мышечные взаимосвязи в обход пораженных участков головного мозга ребенка. Предлагаемая автоматизированная система позволит обеспечить проведение комплексов ЛФ для реабилитации больных с диагнозом детский церебральный паралич.

Об актуальности работы может свидетельствовать поддержка ее грантом “Университеты России – фундаментальные исследования”.

**Предшествующие работы.** Большой вклад в развитие лечебных тренажеров внесли А.Е.Штеренгерц и К.А.Семенова. В Риге с середины 70-х годов в кабинетах ЛФ работает автоматическая система, которая позволяет механически воздействовать на конечность человека. Однако данная система реализует только те движения, которые в данный момент выполняет либо здоровый человек, либо здоровая конечность. В настоящей работе согласно постановке задачи необходимо отрабатывать пространственные движения, заданные заранее. Л.О.Бадалян, В.А.Сергеев классифицируют группы тренажеров по следующим признакам: имитационные, равновесия и координации, силовые, массирующие. Задача тренажера с программным управлением – комбинировать выделенные функциональные воздействия на человека и оказывать комплексное воздействие на больного.

Вопросы динамики управляемых объектов, описание движения, достигающего цели управления, вопросы пространственного движения рассмотрены Г.В. Кореневым. Известны работы в области разработки манипуляционных систем Г.С. Черноруцкого, А.П. Сибринова, В.С. Жабреева, А.И. Телегина, Ю.Н. Егорова,



Б.Г. Коровина. Предлагаемая система является имитатором движения, по своему назначению и конструкции адаптированной к медицинским целям.

**Цель и задачи работы.** Цель работы: создание следящих систем тренажера для восстановления двигательной активности человека.

Из цели вытекают следующие задачи.

- Схемный синтез каналов тренажера, обеспечивающий получение требуемых законов движения конечности; получение математических моделей каналов тренажера как объектов управления.
- Параметрический синтез локальных следящих систем тренажера; моделирование локальных систем управления тренажера.
- Исследование возможности применения регуляторов с нечеткой логикой для локальных следящих систем тренажера.
- Аппаратная реализация цифровых систем управления угловым положением объекта для локальных каналов тренажера.
- Экспериментальная проверка полученных в работе результатов.

**Методы исследований.** Для решения задач по построению математических моделей адекватной механической системы используются методы кинематики и динамики механических систем. Для анализа и синтеза следящих систем тренажера используются методы теории автоматического управления, методы теории нечетких множеств.

**Научная новизна и практическая значимость работы.** Научная новизна.

Разработана математическая модель канала управления рукой тренажера с тремя степенями свободы, позволяющая решать задачу синтеза следящих систем каналов тренажера. Разработаны элементы теории регуляторов с нечеткой логикой, позволяющие использовать классическую теорию автоматического управления при анализе и синтезе нечетких регуляторов.

**Практическая значимость.** Разработан универсальный контроллер на основе однокристального микроконтроллера (МК) ATmega103-6A1 с соответствующим программным обеспечением, позволяющий осуществлять оперативную перестройку параметров традиционных и нечетких регуляторов трехконтурных следящих систем подчиненного регулирования, который может быть использован как в системах управления тренажера, так и в других следящих системах с подобной структурой. Разработан и изготовлен лабораторный стенд для исследования влияния изменений структуры и параметров регуляторов на характеристики трехконтурных следящих систем подчиненного регулирования.

**Апробация работы, публикации, внедрения.** По теме диссертации опубликованы 8 работ, в том числе 1 учебное пособие, отчет по гранту "Университеты России – фундаментальные исследования", тезисы доклада на конференции. Материалы работы использованы в двух отчетах по НИР.

Основные результаты докладывались:

- на Уральской конференции молодых ученых “Физика в биологии и медицине” (Екатеринбург, 1999);
- на расширенном заседании кафедр “Системы управления” и “Приборостроение” ЮУрГУ (Челябинск, 2001);
- на 55-й научно-технической конференции ЮУрГУ (Челябинск, 2001).

Результаты работы используются Федеральным государственным унитарным предприятием КБ “Медавтоматика” (г. Екатеринбург) при выполнении работ, связанных с международной программой “Здоровая семья”, а также Южно-Уральским государственным университетом (г. Челябинск) при проведении практических занятий по дисциплине “Микропроцессорные системы управления” студентов 4-го курса специальностей 220200 и 553000 кафедры “Системы управления”.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из Аннотации, Введения, 4 глав, Заключения, списка литературы (121 наименование), приложения. Основной текст диссертации изложен на 106 машинописных страницах и содержит 63 рисунка и 8 таблиц; в приложения вынесены программы и заключения об использовании диссертации.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее цель и поставлены задачи, проведен обзор предшествующих работ, приведены медицинские аспекты создания системы, показаны научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Система представляет собой комплексный тренажер с управлением от вычислительной машины, предназначенный для изменения углового положения частей тела человека. Функциональная схема тренажера приведена на рис.1.

Особенности эксплуатации тренажера в условиях медицинских учреждений практически исключают возможность использования в нем гидравлических и пневматических приводов. Отличием предлагаемого тренажера является цифровая реализация выполненной на основе электропривода постоянного тока локальной системы управления (СУ), содержащая регулятор углового положения с нечеткой логикой. Характеристики электропривода как элемента СУ позволяют воспроизводить законы пространственного движения частей тела человека в соответствии с выбранной методикой ЛФ, накладываемые требования на качество процессов управления обеспечивают травмобезопасность пациента.

В первой главе выполнен структурный синтез кинематических схем тренажера. Предложено схемное решение конструкции канала перемещения руки, обеспечивающей пространственное движение руки человека с тремя степенями свободы (рис.2).

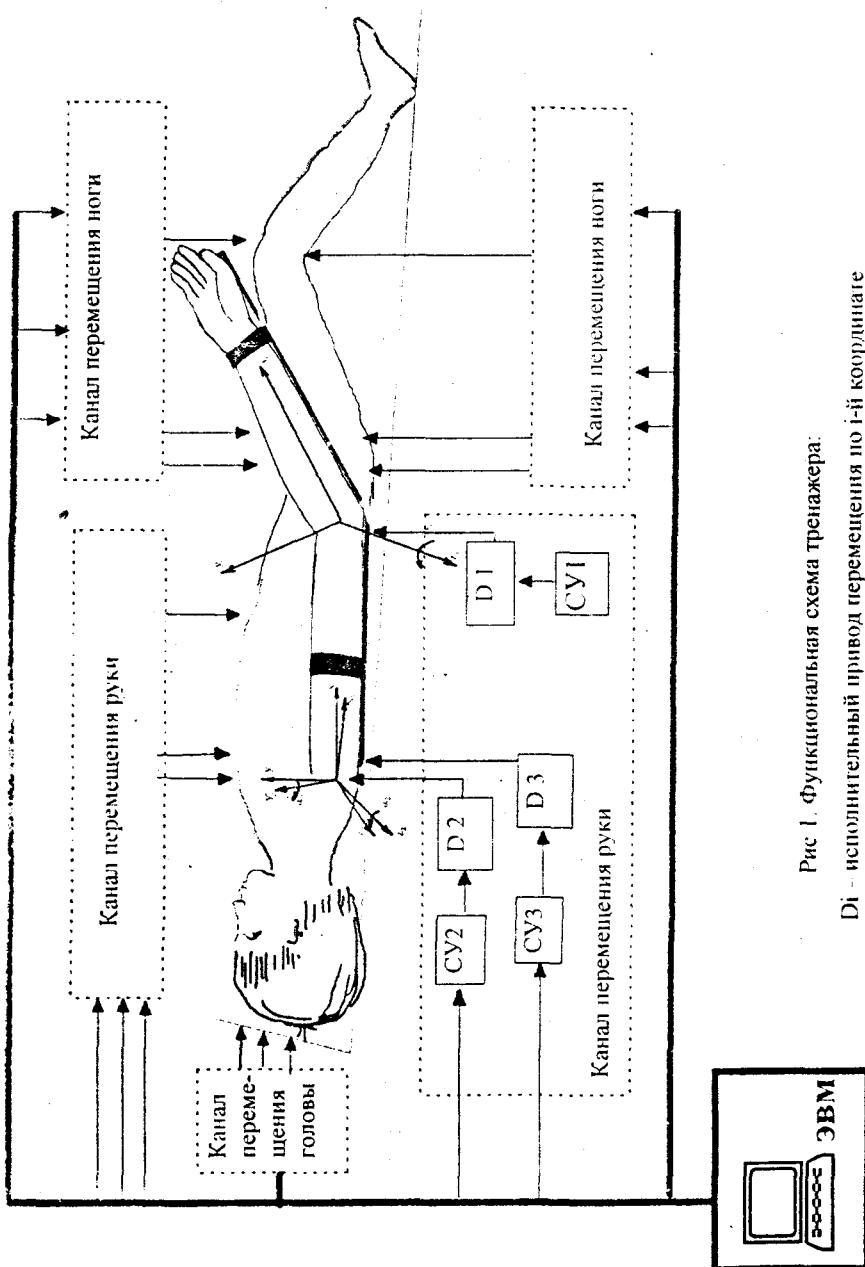


Рис 1. Функциональная схема тренажера.

Di - исполнительный привод перемещения по i-й координате  
 СУi - система управления перемещения по i-й координате

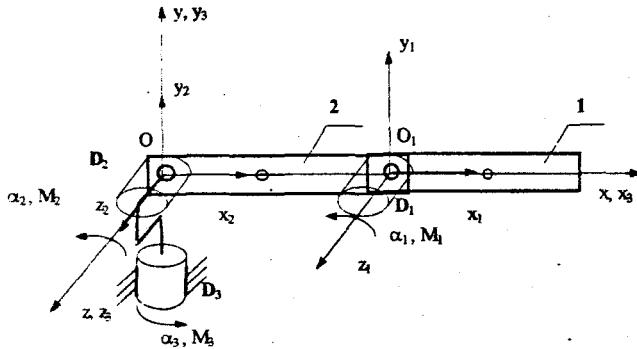


Рис.2. Упрощенная конструкция механической системы перемещения руки:

- 1 – конструкция перемещения предплечья,
- 2 – конструкция перемещения плеча.

На основе уравнений Лагранжа получены уравнения моментов на валах двигателей:

$$\left. \begin{aligned}
 M_1 &= \ddot{\alpha}_1 J_{z1} + \ddot{\alpha}_2 J_{z1} + \dot{\alpha}_3^2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos(\alpha_1 + \alpha_2) (J_{y1} - J_{x1}), \\
 M_2 &= \ddot{\alpha}_1 J_{z1} + \ddot{\alpha}_2 (m_{1\Sigma} r_2^2 + J_{z1} + J_{z2}) + \\
 &\quad + \dot{\alpha}_3^2 \left( \frac{(m_{1\Sigma} r_2^2 + J_{y2} - J_{x1}) \cos \alpha_2 \sin \alpha_2}{(\alpha_1 + \alpha_2)} + \right. \\
 &\quad \left. + (J_{y1} - J_{x1}) \right), \\
 M_3 &= \ddot{\alpha}_3 \left( m_{1\Sigma} r_2^2 \cos^2 \alpha_2 + J_{x2} \sin^2 \alpha_2 + J_{y2} \cos^2 \alpha_2 + \right. \\
 &\quad \left. J_{x1} \sin^2 (\alpha_1 + \alpha_2) + J_{y1} \cos^2 (\alpha_1 + \alpha_2) \right) - \\
 &\quad - 2\dot{\alpha}_3 \dot{\alpha}_2 \left( \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 (m_{1\Sigma} r_2^2 + J_{y2} - J_{x2}) + \right. \\
 &\quad \left. + \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin(\alpha_1 + \alpha_2) (J_{y1} - J_{x1}) \right) - \\
 &\quad - 2\dot{\alpha}_3 \dot{\alpha}_1 (\cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin(\alpha_1 + \alpha_2) (J_{y1} - J_{x1})),
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\alpha_i, \dot{\alpha}_i, \ddot{\alpha}_i$  – углы, угловые скорости и угловые ускорения по соответствующим координатам;  $J_{xi}, J_{yi}$  – моменты инерции частей конструкции по соответствующим осям;  $r_2$  – расстояние между осями вращения частей конструкции.  $m_{1\Sigma}$  – масса конструкции предплечья совместно с массой двигателя.

Из анализа траекторий движения руки, задаваемых методиками ЛФ, установлено, что законы движения в большинстве случаев хорошо описываются выражениями вида

$$\alpha_i = A_{mi} (1 - \cos 2\pi f_i t), \quad (2)$$

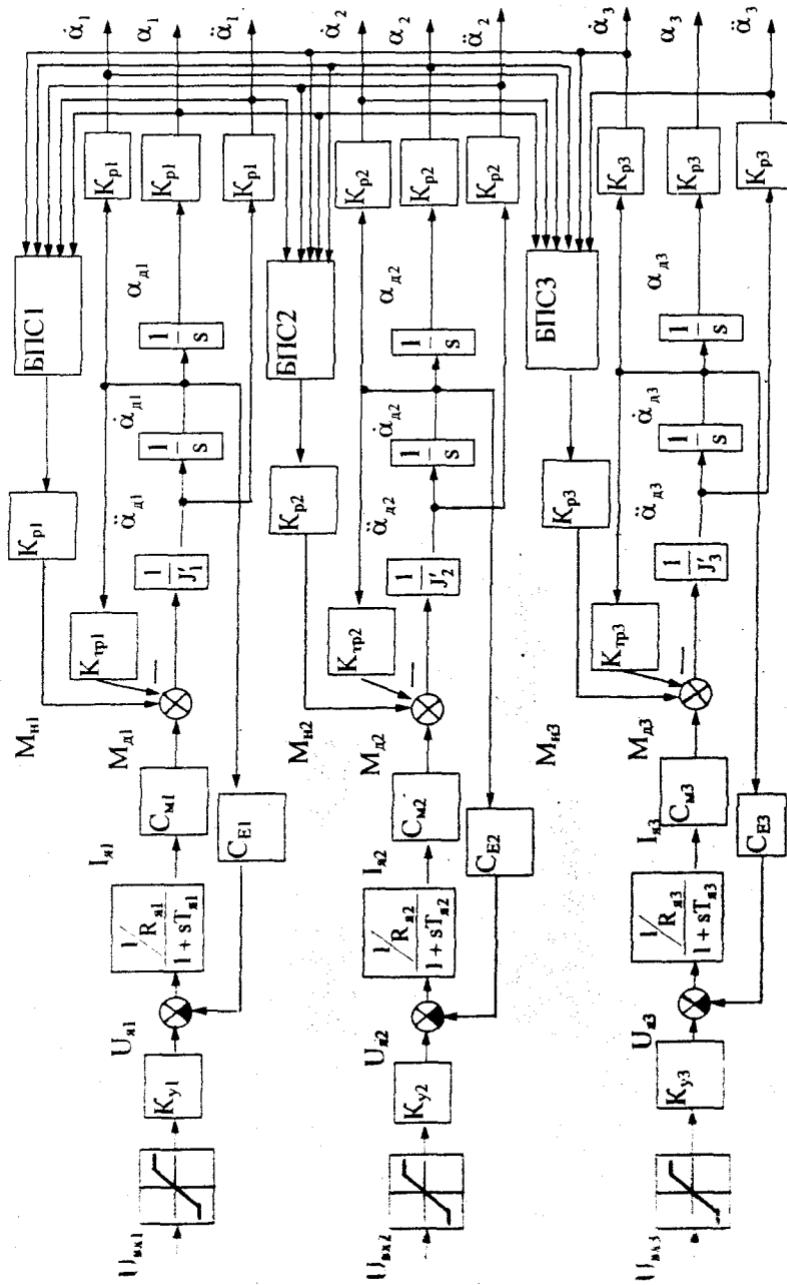
где максимальное значение амплитуды  $A_{mi}$  может достигать  $90^\circ$ ; а максимальное значение частоты  $f_i = 0,5$  Гц.

Исходя из данной математической модели движения трехступенчатой механической конструкции получены нагрузочные характеристики исполнительных двигателей. Установлено, что жесткие массо-габаритные ограничения, накладываемые на конструкцию тренажера, не позволяют обеспечить запаса по мощности при использовании электродвигателей постоянного тока, серийно выпускаемых российской промышленностью, а разработка специальных двигателей в настоящее время затруднена из-за ограничения финансирования. В качестве исполнительного элемента предложен двигатель ДПР-72Н, который при использовании редуктора с передаточным числом 100 позволяет обеспечить механические характеристики, наиболее близкие к требуемым.

Из уравнений (1), учитывая уравнения, описывающие двигатель постоянного тока как объект управления (ОУ), получена структурная схема канала перемещения руки тренажера (рис.3), где  $J'_i$  – приведенные моменты инерции,  $U_{xi}$  – напряжения на обмотках якорей,  $I_{xi}$  – токи якорей,  $R_{xi}$  – сопротивления якорей,  $L_{xi}$  – индуктивности якорей,  $T_{xi} = L_{xi} / R_{xi}$ ,  $\alpha_{xi}$  – углы поворота валов двигателей,  $M_{xi}$  – моменты двигателей,  $K_{tpi}$  – коэффициенты вязкого трения,  $M_{hi}$  – возмущающие моменты,  $C_a$  – коэффициенты противоЭДС,  $C_{bi}$  – коэффициенты пропорциональности между моментом и током,  $U_{bx}$  – напряжения на входах усилителей мощности,  $K_{pi}$  – коэффициенты передачи редукторов, БПС<sub>i</sub> – блоки перекрестных связей, учитывающие влияние движений конструкции в соответствии с формулами (1). Как видно из рис.3, система является многосвязной, но анализ структуры моментов в выражениях (1) при законе движения (2) позволяет в первом приближении пренебречь влиянием перекрестных связей и рассматривать локальный исполнительный привод по каждой координате как независимый ОУ.

Во второй главе проведен структурно-параметрический синтез локальных следящих систем в соответствии с принципом подчиненного регулирования. Применение подчиненного регулирования обусловлено необходимостью ограничения тока якоря исполнительных двигателей, не предназначенных для продолжительной работы в заторможенном режиме.

При этом система регулирования выполняется по традиционной трехконтурной структуре: контур тока с пропорционально-интегральным регулятором (ПИ-регулятором), контуры скорости и положения – с пропорциональными регулято-



Pic.3

рами (П-регуляторами). Расчет параметров регуляторов тока и скорости выполнен исходя из обеспечения их настройки на оптимум по модулю.

Коэффициент передачи регулятора положения (РП) выбран исходя из необходимости обеспечения отсутствия перерегулирования во всем диапазоне рабочих угловых перемещений системы. Данное требование является приоритетным, так как связано с необходимостью обеспечения травмобезопасности пациента.

Результаты цифрового моделирования подтверждают возможность получения в синтезированной системе требуемых точностных и динамических характеристик (но без заметного запаса). Однако, учитывая отсутствие опыта эксплуатации подобных тренажеров, следует иметь в виду возможность ужесточения требований к его характеристикам по мере накопления опыта.

Как известно, улучшить точностные и динамические характеристики следящей системы можно путем увеличения коэффициента РП и компенсацией перекрестных межканальных связей. Применительно к данному тренажеру использование компенсации перекрестных связей затруднено физической недоступностью точек их воздействия и сложностью вычисления в реальном времени компенсирующих воздействий. Для отсутствия перерегулирования в системе при увеличении коэффициента усиления РП необходимо введение в РП дополнительных корректирующих звеньев, которые оказываются неэффективными из-за ограничения сигналов в системе, обусловленного отсутствием запаса по мощности.

Увеличить эквивалентный коэффициент передачи без ухудшения качества переходных процессов можно в нелинейных РП с дополнительными нелинейными обратными связями по скорости. Так как методики расчета подобных регуляторов носят приближенный характер, требуется его настройка в процессе отладки системы. При цифровой реализации СУ это может приводить к трудоемким изменениям управляющей программы. В связи с этим становится целесообразным использование регуляторов, работающих на принципах нечеткой логики. Как показано в 3-й главе, их нелинейные характеристики могут перестраиваться в необычайно широких пределах при одном и том же алгоритме управляющей программы.

В третьей главе разработаны элементы теории регуляторов с нечеткой логикой: рассмотрены общие принципы нечеткой логики, получены зависимости характеристик нечетких регуляторов от задания лингвистических переменных (ЛП) и блока правил (БП) и установлено соответствие между нечеткими регуляторами и традиционными нелинейными регуляторами, выполненными на основе нелинейностей с кусочно-линейными характеристиками, перемножителей и сумматоров. Структурная схема типичного нечеткого регулятора имеет вид, показанный на рис.4.

В фаззификаторе каждой входной переменной  $X_i$  ставится в соответствие "нечеткая" ЛП и задаются функции принадлежности, определяющие "степень со-

ответствия” входной переменной ее лингвистическому значению (ЛЗ). В дефазификаторе осуществляется переход от ЛЗ выхода к его реальному значению  $U$  по методу весового осреднения. База знаний используется для формирования БП, представляющего собой экспертную систему, определяющую набор ЛЗ выходной переменной нечеткого регулятора на основании анализа полученных в фазификаторе ЛЗ входных переменных.

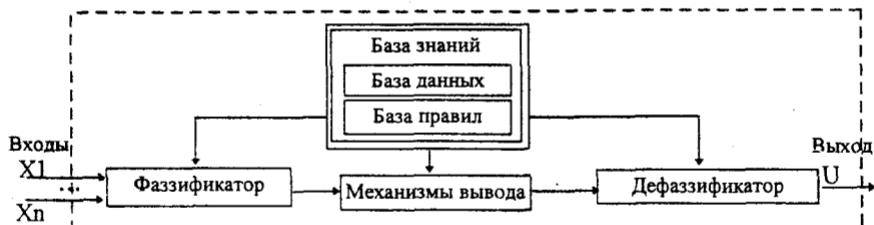


Рис.4

Тогда после замены пропорционального РП нечетким упрощенная схема системы будет иметь вид, приведенный на рис.5.

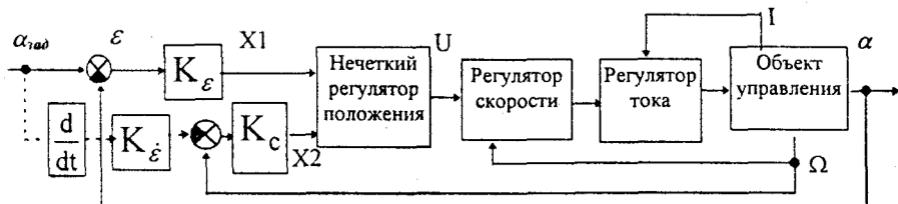


Рис. 5

При отсутствии связи, изображенной на рис.5 пунктиром, входная переменная  $X_2$  нечеткого регулятора положения пропорциональна скорости, если же данная связь используется, то при соответствующем выборе величины коэффициента

$K_c$  переменная  $X_2$  пропорциональна производной ошибки  $\frac{d\epsilon}{dt}$ .

Можно показать, что фазификатор и БП нечеткого регулятора по существу задают опорные точки его многомерной (в случае 2-х входных переменных – двумерной) статической характеристики, а в дефазификаторе выполняется аппроксимация между ними.

Статические характеристики, совпадающие с характеристиками нечетких регуляторов в опорных точках, могут быть получены и в регуляторах, выполненных на основе соединения нелинейных элементов с кусочно-линейными характеристиками. Это позволяет в ряде случаев при анализе и синтезе систем с нечеткими регуляторами отказаться от методов нечеткой логики и применять известные методы

теории нелинейных систем. В свою очередь, практически любой традиционный нелинейный регулятор может быть реализован по нечеткому алгоритму.

Пусть, например, нечеткий регулятор имеет две входных переменных ( $X_1$  и  $X_2$ ) и одну выходную ( $U$ ) с ЛЗ “Отрицательная большая (ОБ)”, “Отрицательная малая (ОМ)”, “Нулевая (Н)”, “Положительная малая (ПМ)” и “Положительная большая (ПБ)”.

Если задать ЛЗ в оцифрованном варианте в соответствии с табл.1 и БП в соответствии с табл.2, то статические характеристики такого регулятора будут иметь вид, приведенный на рис.6. Близкие характеристики имеет простейший линейный регулятор, структурная схема которого приведена на рис.7.

Таблица 1

ЛЗ $X_1$	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПБ
Численный эквивалент $X_1$	-511	-256	0	256	511
ЛЗ $X_2$	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПБ
Численный эквивалент $X_2$	-511	-256	0	256	511

Таблица 2

$X_1$	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПБ
$X_2$	U				
ОБ	Н	ПМ	ПБ	ПБ	ПБ
ОМ	ОМ	Н	ПМ	ПБ	ПБ
Н	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПБ
ПМ	ОБ	ОБ	ОМ	Н	ПМ
ПБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОМ	Н

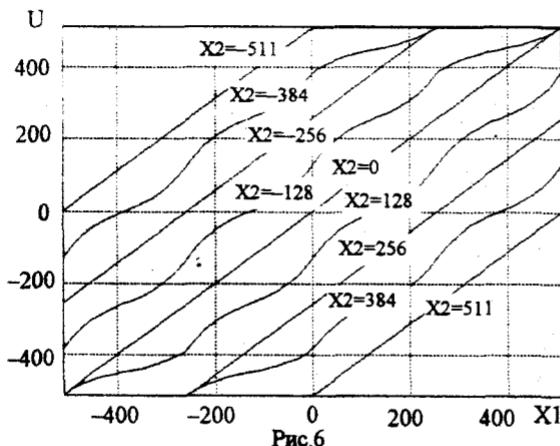


Рис.6

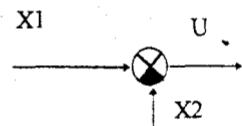


Рис.7

Если же ЛЗ ошибки задать в соответствии с табл.3 и БП в соответствии с табл.2, то статические характеристики такого регулятора будут иметь вид, приведенный на рис.8. Близкие характеристики имеет регулятор со структурной схемой, приведенной на рис.9.

Таблица 3

ЛЗ X1	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПВ
Численный эквивалент ЛЗ X1	-511	-150	0	+150	+511

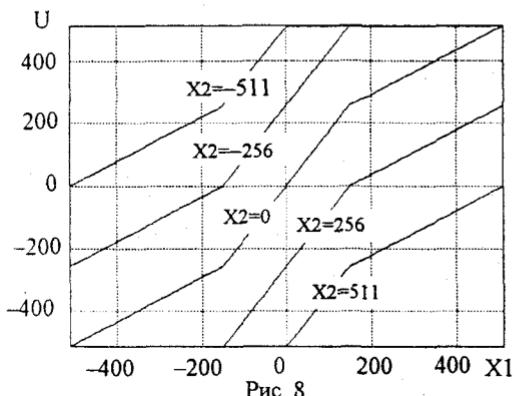


Рис. 8

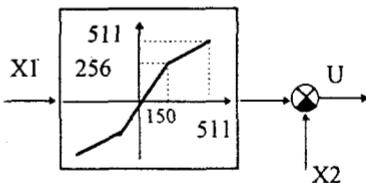


Рис.9

Если ЛЗ входных переменных регулятора заданы в соответствии с табл.1 и блок правил в соответствии с табл.4, то статические характеристики регулятора будут иметь вид, изображенный на рис.10. Аналогичные характеристики имеет классический регулятор со структурной схемой рис.11.

Таблица 4

X1	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПВ
X2	U				
ОБ	ОБ	ОМ	ПВ	ПМ	ПВ
ОМ	ОБ	ОМ	ПМ	ПМ	ПВ
Н	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПВ
ПМ	ОБ	ОМ	ОМ	ПМ	ПВ
ПВ	ОБ	ОМ	ОБ	ПМ	ПВ

Таким образом, изменение численных эквивалентов ЛЗ входных и выходных переменных приводит к изменению нелинейных характеристик в их цепях, а с помощью БП можно вводить операции перемножения входных переменных.

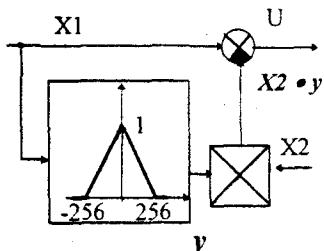
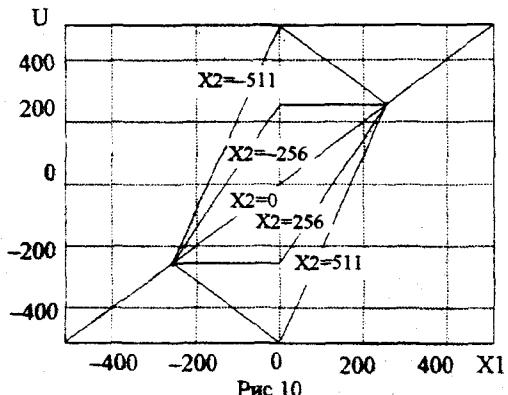


Рис.11

Таким образом, главным достоинством нечеткого регулятора является возможность изменения его статических характеристик в необычайно широких пределах без изменения алгоритма вычислений, а следовательно, без изменения алгоритма управляющей программы. Более того, нечеткая реализация сложных статических характеристик в ряде случаев требует меньшего объема вычислений, чем традиционные схемы нелинейных регуляторов.

В четвертой главе рассматривается аппаратная реализация цифровых следящих систем тренажера и приводятся результаты экспериментальных исследований систем подчиненного регулирования с пропорциональным и нечетким РП.

Для проведения экспериментальных исследований разработан и изготовлен лабораторный стенд (рис.12), в состав которого входят: IBM-совместимый компьютер (1), контроллер (2), модуль связи с объектом управления (3), объект управления (4), источники питания (5) и программатор (6).

Компьютер предназначен только для задания программных воздействий и регистрации сигналов с датчиков ОУ. В контроллере, выполненном на основе микросхемы ATmega103-6AI, реализуется требуемый алгоритм управления. Модуль связи с объектом содержит усилитель мощности и нормирующие усилители, приводящие сигналы с датчиков объекта к диапазону АЦП МК ATmega103-6AI.

Программное обеспечение МК реализует все три контура управления- системы подчиненного регулирования. Традиционно изменение характеристик нечеткого регулятора принято выполнять исключительно с помощью БП. Однако изменения соотношений между численными эквивалентами входных и выходных переменных позволяют уменьшить количество опорных точек и, как следствие, значительно упростить регулятор. Кроме того, традиционная реализация БП предполагает использование алгоритма на основе логических функций "если... и...,

то..., иначе...”, что приводит к необходимости изменения управляющей программы в случае изменения БП, при этом время выполнения подобного алгоритма в значительной мере зависит от величины входных переменных, что затрудняет минимизацию периода дискретизации системы.

Эти недостатки могут быть в значительной степени устранены при программной реализации БП по алгоритму извлечения ЛЗ выходного сигнала из двумерной матрицы.

Несмотря на то, что параметры привода стенда отличаются от параметров приводов тренажера, полученные результаты могут быть обобщены на тренажер,

поскольку их функциональные и структурные схемы совпадают.

При исследовании системы с пропорциональным РП настройка контуров тока и скорости осуществлялась на оптимум по модулю. Целью настройки РП было получение минимального времени регулирования при отсутствии перерегулирования. При этом максимальное значение коэффициента РП составило 13, а процессы в системе приведены на рис.13, 14.

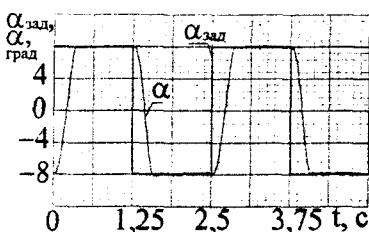


Рис.13

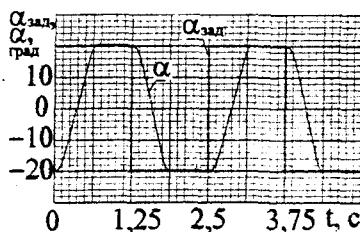


Рис.14

При исследовании системы с нечетким РП настройка внутренних контуров оставлена без изменений. Наилучшие результаты получены при параметрах нечеткого РП в соответствии с табл. 5, 6 и  $K_e = 17$  (рис.5). Переходные процессы не отличаются от процессов в системе с пропорциональным РП, так как в данном случае время регулирования определяется энергетическими характеристиками ОУ.

0309807

Таблица 5

ЛЗ X1	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПБ
Численный эквивалент ЛЗ X1	-511	-200	0	+200	+511
ЛЗ X2	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПБ
Численный эквивалент ЛЗ X2	-511	-256	0	+256	+511
ЛЗ U	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПБ
Численный эквивалент ЛЗ U	-511	-256	0	+256	+511

Таблица 6

X1	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПБ
X2	U				
ОБ	ОБ	ПМ	ПБ	ПБ	ПБ
ОМ	ОБ	ОМ	ПМ	ПБ	ПБ
Н	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПБ
ПМ	ОБ	ОБ	ОМ	ПМ	ПБ
ПБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОМ	ПБ

Статические характеристики нечеткого РП имеют вид, приведенный на рис.15.

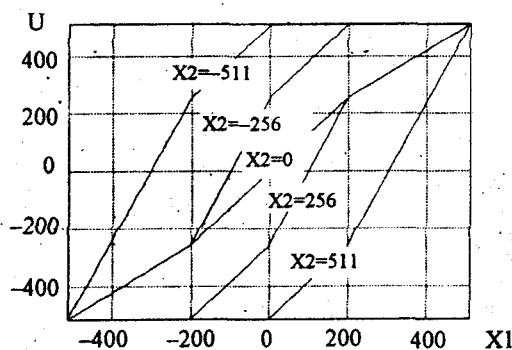


Рис.15

Эквивалентная структурная схема нечеткого регулятора с параметрами, заданными в табл. 5, 6, имеет вид, приведенный на рис.16. Экспериментальные характеристики при реализации регулятора по этой эквивалентной схеме не отличаются от характеристик системы с нечетким регулятором (рис.13, 14).

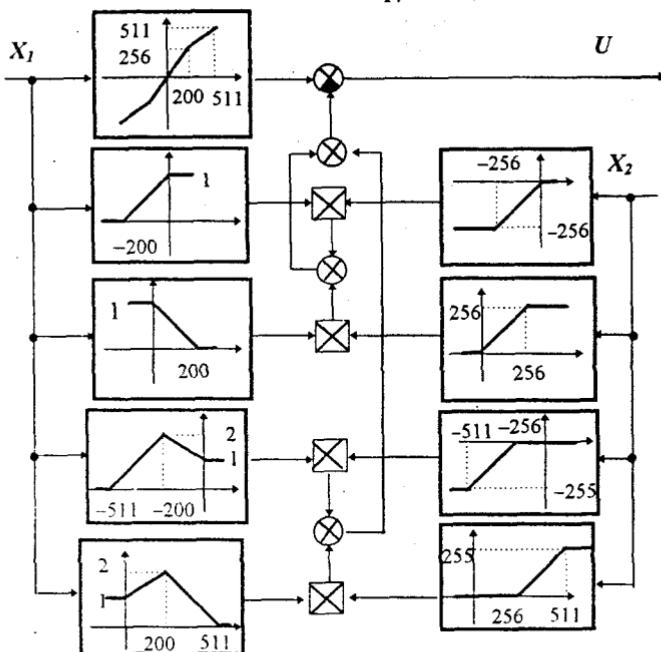


Рис.16

Из анализа статических характеристик (рис.15) следует, что эквивалентный статический коэффициент усиления нечеткого РП при  $K_e = 17$  составляет  $K_e \cdot 256/200 = 21,76$ , что в 1,67 раза выше, чем в системе с пропорциональным РП. Это приводит к соответствующему уменьшению ошибок, вызванных позиционными моментами (так при приложении внешнего статического момента величиной 8,5 Н·м ошибка в системе с П-регулятором составила  $1,3^\circ$ , а в системе с нечетким РП –  $0,6^\circ$ ), а также к уменьшению динамических ошибок при отработке гармонических воздействий (рис.17, 18 для П-регулятора и нечеткого соответственно).

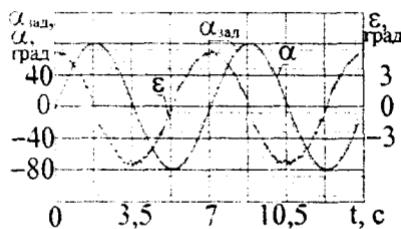


Рис.17

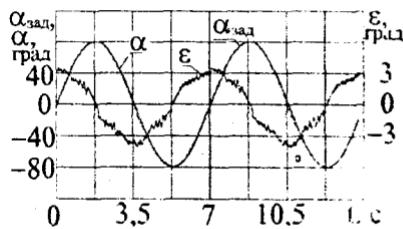


Рис.18

В то же время увеличение коэффициента П-регулятора в 1,67 раза приводит к появлению переступирования (рис.19, 20).

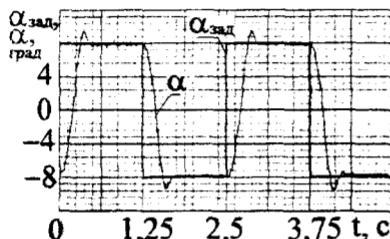


Рис.19

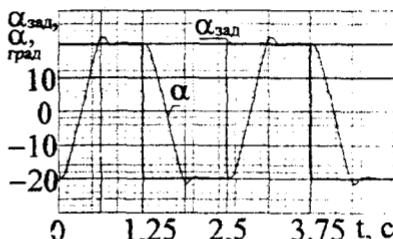


Рис.20

Таким образом, замена П-регулятора нечетким позволяет улучшить качество работы системы (уменьшить статические и динамические ошибки при сохранении качества переходных процессов) за счет увеличения эквивалентного коэффициента усиления.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

- Предложено схемное решение конструкции канала управления рукой тренажера для восстановления двигательной активности человека, позволяющее обеспечить пространственное движение руки пациента с тремя степенями свободы, являющееся основой для разработки математической модели канала перемещения руки тренажера как объекта управления в системе восстановления двигательной активности человека.
- Получены элементы теории регуляторов с нечеткой логикой, позволяющие применять к анализу и синтезу систем с нечеткими регуляторами методы классической теории автоматического управления.
- Разработана математическая модель и получено схемное решение структуры регулятора, реализующего нечеткий закон управления положением, разработаны алгоритмы и программы нечеткого управления положением объекта.
- Разработан и изготовлен лабораторный стенд для проверки работы цифровой локальной следящей системы канала перемещения руки тренажера, разработаны алгоритмы и программное обеспечение стенда, позволяющие модифицировать вид задающего программного воздействия на следящую систему и эффективно осуществлять настройку параметров различных типов регуляторов.
- Проведено экспериментальное исследование системы и показано, что использование табличной реализации блока правил в программе контроллера позволяет избежать необходимости внесения изменений в управляющую программу микропроцессорного устройства, на котором реализован данный регулятор.

б) использование вариаций численных эквивалентов лингвистических значений переменных в данном нечетком регуляторе приводит к уменьшению количества узловых точек статических характеристик и к соответствующему уменьшению размерности БП; в) указанные программные решения реализации нечеткого закона управления сокращают затраты на проектирование и наладку системы.

6. Проведенное экспериментальное исследование на лабораторном стенде показало, что замена в системе подчиненного регулирования П-регулятора положения нечетким позволяет улучшить характеристики системы, а именно: уменьшить статическую ошибку системы на 60...70% и динамическую ошибку при гармонических входных воздействиях – на 30...35% без ухудшения прямых показателей качества переходных процессов.

7. Полученные на лабораторном стенде результаты могут быть качественно распространены как на следящие системы тренажера, так и на другие следящие системы подчиненного регулирования, имеющие функциональные и структурные схемы того же типа, что и лабораторный стенд.

8. Результаты работы используются Федеральным государственным унитарным предприятием КБ “Медавтоматика” (г.Екатеринбург), при выполнении работ, связанных с международной программой “Здоровая семья”.

9. Лабораторный стенд для исследования цифровых следящих систем используется на практических занятиях по дисциплине “Микропроцессорные системы управления” студентов 4-го курса специальностей 553000, 220200, проводимых в ЮУрГУ.

#### **НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Чернецкая И.В. Анализ динамики системы, имитирующей пространственное движение руки человека// Системы автоматического управления: Тем. сб. науч. тр. – Челябинск: Изд.ЮУрГУ, 2000. – С.133–136.
2. Чернецкая И.В. Динамический синтез системы управления механизмом пространственной стимуляции мыши// Уральская конференция молодых ученых “Физика в биологии и медицине”: Сб. науч. работ – Екатеринбург: Уральский гос. университет, 1999.– С.42.
3. Чернецкая И.В., Чернецкий В.О. К вопросу о применении нечетких регуляторов в системах автоматического регулирования. Рукопись предст. Юж.-Уральским гос. университетом. Депонирована в ВИНИТИ 12.10.00 № 2609 – В00. – 22 с.
4. Чернецкая И.В., Чернецкий В.О. Следящая система с нечетким регулятором. Рукопись предст. Юж.-Уральским гос. университетом. Депонирована в ВИНИТИ 12.10.00 № 2610 – В00. – 6 с.

5. Чернецкая И.В., Щипицын А.Г. Динамический анализ системы стимуляции мышц ребенка при лечении ДЦП// Информационно-изм. и управляющие системы и устройства: Тем. сб. науч. тр. – Челябинск: Изд.ЮУрГУ, 2000. – С.60–64.
6. Щипицын А.Г., Овсяницкая Л.Ю., Чернецкая И.В. Система биомеханической стимуляции мышц человека (динамический синтез): Учебное пособие. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1998. – 142 с.
7. Щипицын А.Г., Овсяницкая Л.Ю., Чернецкая И.В. Синтез системы биомеханической стимуляции мышц человека для лечения церебрального паралича. Рек.-тех. описание по теме № 0098139 (Грант “Университеты России”). № гос.рег.01.980006976, инв.№ 02.990003864. –35 с.
8. Щипицын А.Г., Овсяницкая Л.Ю., Чернецкая И.В., Чернецкий В.О., Коваленко В.В. Разработка математических моделей, алгоритмов и программ для задач синтеза системы биомеханической стимуляции мышц человека: тема № 1.29.97; № гос.рег.01.970002852; инв.№ 02.990003251. – 187 с.

“

Чернецкая Ирина Владимировна  
СИНТЕЗ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Специальность 05.13.01 – “Системный анализ, управление  
и обработка информации (промышленность)”

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного  
университета

---

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 18.05.2001. Формат  
60\*84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1.  
Тираж 80 экз. Заказ 137/242.

---

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.