

6  
А-43

МИНИСТЕРСТВО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ,  
СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СССР

АКАДЕМИЯ НАУК  
СССР

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ  
/ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ/

А.А. РОМАЩЕВ

ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ /ОБУЧАЮЩИХСЯ/  
РАСПОЗНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

/специальность № 253 - приборы и устройства автоматики  
и телемеханики/

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Москва 1968

МИНИСТЕРСТВО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ,  
СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СССР

АКАДЕМИЯ НАУК  
СССР

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ  
/ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ/

А.А. РОМАЩЕВ

ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ /ОБУЧАЮЩИХСЯ/  
РАСПОЗНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

/специальность № 253 – приборы и устройства автоматики  
и телемеханики/

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Москва 1988

Многие важные практические задачи, в число которых входят такие, как распознавание зрительных образов, регулирование или управление объектами с заранее неизвестными параметрами, прогнозирование, диагностика, автоматический контроль функционирования сложных технических систем и т.п., требуют для своего решения построения систем, способных изменять выполняемые ими функции при изменении окружающих условий /обучающиеся или адаптивные системы/.

Важнейшим подклассом адаптивных систем являются устройства, которые можно обучить распознаванию образов. Помимо самостоятельного применения /например, распознавания зрительных образов, звуковых сигналов, объективная диагностика заболеваний и т.п./ адаптивные распознающие устройства должны присутствовать в достаточно совершенных обучающихся системах авторегулирования.

В основу теории адаптивных распознающих устройств, которые будем кратко называть просто адаптивными системами или распознающими устройствами, положена концепция дискриминантных функций. Дискриминантные /или решающие/ функции определяют ответные реакции системы на внешние воздействия. В процессе обучения системы происходит "настройка" дискриминантных функций путем изменения их регулируемых параметров с помощью некоторого алгоритма обучения.

Любая техническая реализация распознающего устройства должна состоять из двух основных частей — детектора признаков и ассоциирующего устройства /классификатора/. Детектор признаков воспринимает физическое воздействие носителя информации о подлежащем распознаванию объекте или явлении и выдает на выходе мно-

жество сигналов, которые являются признаками объекта или явления. Классификатор на основе этих признаков принимает решение о принадлежности объекта или явления к одному из заранее определенных классов.

В большинстве распознающих устройств, предложенных до сих пор, в процессе обучения происходит подстройка параметров классификатора, а не детектора признаков, т.к. эффект изменения правил для классификации признаков является к настоящему времени более понятным, чем изменение правил, по которым формируются признаки. В настоящей диссертации исследуются методы технической реализации основных функциональных компонентов и блоков адаптивных классификаторов, обучаемых методом итеративной настройки параметров реализуемых ими дискриминантных функций.

Достаточно совершенные адаптивные системы состоят из большого числа элементов, в связи с чем возникают такие задачи, как разработка относительно простых, надежных и дешевых функциональных блоков и компонентов. В последнее время усилия многих исследователей были обращены на поиск физических принципов и разработку на их основе важнейших компонентов адаптивных систем — адаптивных компонентов /элементов с регулируемым коэффициентом передачи с памятью/, которые реализуют настраиваемые параметры дискриминантных функций, а также методов технической реализации некоторых типов адаптивных систем /например, перцептрон Розенблатта, *Adaline, Madaline, Minos 1*, причем адаптивные компоненты, а следовательно и системы, оказывались либо слишком громоздкими, инерционными, либо дорогими и/или нестабильными во времени [3].

Среди многих физических принципов, на которых может быть основано действие адаптивных компонентов, перспективным, по нашему мнению, следует считать явление ферромагнетизма. Такие свойства

ферромагнитных материалов с прямоугольной петлей гистерезиса /ППГ/, как способность сколь угодно долго сохранять значение остаточной намагниченности, стойкость остаточного состояния по отношению к внешним возмущениям /например, изменение температуры, наличие проникающей радиации, вибрации, ускорения, влажность и т.п./, позволили создать быстродействующие запоминающие устройства на магнитных сердечниках и пленках для хранения информации в двоичной форме.

В течение последних нескольких лет были достигнуты определенные успехи в построении на магнитных элементах аналоговых запоминающих устройств и адаптивных компонентов. Однако, последние обладают рядом недостатков, из которых в первую очередь следует отметить относительно большую критичность к сигналам записи и считывания, а в ряде случаев и высокую стоимость. Вследствие этого существует актуальная проблема исследования и разработки методов технической реализации адаптивных компонентов, обладающих требуемыми функциональными характеристиками и отличающихся простотой, надежностью, стабильностью, низкой стоимостью, а также исследования методов построения на их основе основных типов адаптивных систем, включающих в себя большое число компонентов.

При технической реализации сложных адаптивных систем возникает много вопросов, которые невозможно решить в пределах одной диссертации. Целью настоящей работы является восполнение известного пробела в области методов технической реализации адаптивных компонентов, исследование способов построения на их основе важнейших функциональных блоков адаптивных систем, включая разработку соответствующих электронных схем управления, а также теоретическое и экспериментальное исследование этих функциональных блоков с учетом реальных характеристик адаптивных компонентов.

В связи с этим в настоящей диссертационной работе были поставлены следующие основные задачи.

1. Сравнительный анализ адаптивных систем для распознавания образов, а также некоторых алгоритмов обучения с целью оценки эффективности важнейших семейств дискриминантных функций и возможности наиболее простой технической реализации этих функций.

2. Анализ важнейших функциональных и технических характеристик адаптивных компонентов и выбор на его основе физического принципа построения адаптивных компонентов. Исследование и разработка адаптивных компонентов на магнитных элементах.

3. Исследование путей построения адаптивных пороговых элементов на магнитных сердечниках, являющихся основными строительными блоками адаптивных систем, использующих пороговую логику.

4. Разработка принципов построения специализированных источников сигналов и электронных схем управления для систем, включающих в себя большое число адаптивных компонентов на магнитных элементах.

5. Теоретическое и экспериментальное исследование предельных возможностей реальных адаптивных пороговых элементов.

В соответствии с поставленными задачами в первой главе диссертации проводится сравнительный анализ распознающих устройств. На основе этого анализа делается вывод, что достаточно совершенные распознающие устройства могут быть построены при использовании нелинейного фиксированного преобразователя входных переменных и адаптивного классификатора, реализующего линейные дискриминантные функции, для настройки параметров которого применимы простые итеративные алгоритмы.

Рассматриваются адаптивные пороговые элементы /АПЭ/, которые помимо самостоятельного применения в качестве линейного распознающего устройства, разделяющего образы на два класса, являются основными строительными блоками важного класса адаптивных систем — многослойных распознающих устройств.

В связи с тем, что часто технически значительно проще создать адаптивные весовые компоненты для двоичных входных сигналов, в данной главе рассматриваются методы построения адаптивных систем с использованием адаптивных компонентов с двоичными входами. Описываются некоторые итеративные алгоритмы обучения адаптивных систем.

Проведенный в главе анализ структур различных распознающих устройств позволяет сделать вывод, что при технической реализации адаптивных систем возникает ряд общих задач, основными из которых можно считать следующие: исследование и разработка адаптивных весовых компонентов, разработка простых методов селекции адаптивных компонентов, подлежащих адаптации, из системы и способов изменения их коэффициентов передачи согласно используемому алгоритму обучения; исследование путей построения АПЭ; разработка принципов построения простых и надежных источников сигналов считывания информации, адаптации, обратной связи и т.д. для систем, содержащих большое число адаптивных компонентов.

Во второй главе рассматриваются методы реализации и основные особенности применения адаптивных компонентов на магнитных элементах. Техническая реализация весового компонента является по существу аналогом запоминающим устройством. способным хранить величину коэффициента передачи  $K$  в пределах нормализованной области  $[-1, +1/]$  и обладающим специфическими функцио-

нальными характеристиками.

Пусть  $x_{вх}$  и  $x_{вых}$  будут соответственно входной и выходной переменными адаптивного компонента. В идеальном случае они должны быть связаны соотношением  $x_{вых} = K x_{вх}$ , где  $K$  - коэффициент передачи. Если в процессе обучения системы необходимо подстроить весовой коэффициент, то на управляющий вход соответствующего адаптивного компонента поступает сигнал адаптации  $Z$ . Величина приращения  $\Delta K$  коэффициента передачи является некоторой функцией  $\Delta K(Z)$ . После снятия сигнала адаптации новое значение коэффициента передачи должно оставаться неизменным. Желательно, чтобы приращение  $\Delta K$  коэффициента передачи было интегральной функцией, т.е.  $\Delta K = a \int Z dt$ , где  $a$  - константа,  $t$  - время. В этом случае оказывается более просто изменять величину коэффициента передачи согласно используемому алгоритму обучения. С технической точки зрения проще изменять коэффициент передачи не плавно, а небольшими скачками  $\delta K$  при однократном импульсном воздействии управляющего сигнала  $Z$ . Если знак  $\delta K$  равен знаку  $Z$ , то величина суммарного приращения  $\Delta K$  определяется числом  $n$  поступивших импульсов адаптации данного знака. Соответствующая характеристика  $\Delta K = \Delta K(n)$  называется накопительной. Если  $\Delta K(n)$  - линейная функция, то накопительная характеристика аппроксимирует с точностью до  $\delta K$  интегральную характеристику.

Любая техническая реализация адаптивного компонента характеризуется тем, что величина  $x_{вых}$  определяется некоторой функцией  $x_{вых} = F(K, x_{вх})$ , где величина  $K$  является регулируемым параметром. В первом приближении эту функцию удобно аппроксимировать выражением  $x_{вых} = K \cdot \varphi(x_{вх})$ , где  $\varphi(x_{вх})$  - характеристика передачи от входа к выходу. Если нормировать  $\varphi(x_{вх})$  так, чтобы  $\varphi(x_{вх} = x_{вхmax}) = x_{выхmax}$ , то коэффициент передачи можно

определить в виде  $K = \frac{x_{вых}}{x_{вхmax}}$  при условии, что  $x_{вх} = x_{вхmax}$

Вид функции  $\varphi(x_{вх})$  определяет область применения соответствующего адаптивного компонента. Если  $\varphi(x_{вх})$  - линейная функция, то адаптивный компонент можно использовать для аналоговой входной переменной. При нелинейной  $\varphi(x_{вх})$  устройство имеет смысл использовать для двоичной /или троичной/ входной переменной. Следует отметить, что в принципе адаптивный компонент с аналоговым входом можно строить на основе компонента с двоичным входом и аналогового множительного звена. В диссертационной работе исследованы и разработаны методы технической реализации простых и надежных адаптивных компонентов для двоичных /троичных/ входных переменных.

С учетом принципов построения основных типов адаптивных систем и функциональной роли адаптивных компонентов в данной главе обоснованы и сформулированы наиболее существенные требования, которым должны отвечать технические реализации адаптивных компонентов: 1/ возможность управления коэффициентом передачи одновременно с поступлением входной переменной /запись одновременно со считыванием/; 2/ достаточная стабильность коэффициента передачи во времени /даже при отключении питания/ и его неизменность в условиях поступления неограниченного числа сигналов входной переменной /считывание без разрушения/; 3/ монотонная, желательно линейная зависимость суммарного приращения  $\Delta K$  коэффициента передачи в зависимости от числа  $n$  поданных импульсов адаптации; 4/ достаточно плавное изменение коэффициента передачи в обоих направлениях /обычно желательно порядка 100 стабильных значений коэффициента передачи в пределах нормализованной области -1, +1/; 5/ возможность матричной выборки адреса компонента, подлежащего

адаптации; 6/ легко осуществимое суммирование выходных сигналов с большого числа компонентов; 7/ компактность, технологичность, низкая стоимость, простота схемного включения.

Время, необходимое на изменение коэффициента от  $K_{min}$  до  $K_{max}$  и предельная частота поступления входной переменной определяются конкретной областью применения. Увеличение быстродействия адаптивного компонента по входу  $x$  и  $z$  делает компонент более универсальным. На основе рассмотренных характеристик и требований можно проводить анализ и сравнительную оценку самых различных способов технической реализации адаптивных компонентов.

Проведенный в главе сравнительный анализ различных физических принципов построения адаптивных компонентов позволил сделать вывод о перспективности использования явления магнитного гистерезиса. Показано, что в качестве элемента аналоговой памяти с неограниченным сроком хранения информации, выполняющего функции адаптивного компонента, целесообразно использовать трансфлюксоры. Важным преимуществом трансфлюксоров по сравнению с другими элементами является возможность неразрушающего считывания коэффициента передачи, значение которого определяется величиной остаточного потока  $\Phi_{ост}$  в неразветвленной части магнитопровода, при полной гальванической развязке цепей управления, считывания и выхода, а также магнитной развязки цепей управления и выхода. В главе показано, что при построении систем, содержащих большое число адаптивных компонентов, рационально использовать трансфлюксоры из феррита с ШГ. Применение металлических трансфлюксоров может улучшить линейность характеристики по управляющему входу, повысить температурную стабильность компонента, но при этом резко возрастают инерционность, габариты, вес и стоимость элементов по

сравнению с аналогичными устройствами, выполненными из феррита с ШГ.

Для того, чтобы адаптивные компоненты, построенные на основе трансфлюксоров, удовлетворяли перечисленным выше требованиям, необходимо выбрать соответствующий способ управления остаточным потоком  $\Phi_{ост}$  трансфлюксора и определить наиболее стабильный параметр выходного сигнала, характеризующий установленную величину коэффициента передачи.

Изменение остаточного потока  $\Phi_{ост}$  в трансфлюксоре, связанное с частичным перемагничиванием, может быть осуществлено следующими способами: 1/ намагничиванием постоянным током; 2/ идеальным намагничиванием; 3/ намагничиванием импульсами тока ограниченной длительности или/и амплитуды; 4/ намагничиванием импульсами напряжения с фиксированной вольт-секундной площадью.

Теоретический и экспериментальный анализ этих способов показывает, что управлять остаточным потоком  $\Phi_{ост}$  трансфлюксора целесообразно импульсами напряжения с фиксированной вольт-секундной площадью. В этом случае величина приращения остаточного потока меньше всего зависит от параметров магнитного материала и величины остаточного потока  $\Phi_{ост}$ , что позволяет получить накопительную характеристику управления коэффициентом передачи адаптивного компонента, необходимую в большинстве теоретических моделей обучающихся систем, а также хорошую воспроизводимость характеристик управления адаптивных компонентов.

Формирование управляющих импульсов напряжения с фиксированной вольт-секундной площадью требуемой полярности в зависимости от желаемого знака приращения остаточного потока  $\Phi_{ост}$  можно осуществить с помощью предложенной и исследованной в работе формирующей схемы на ферритовых тороидальных сердечниках с ШГ [6]. Она

состоит из двух формирующих сердечников, имеющих встречно включенные выходные обмотки, согласно включенные обмотки возврата в исходные состояния и отдельные обмотки адаптации. В обмотки смещения подается постоянный ток смещения /подготовки/. Импульс напряжения требуемой полярности может быть получен путем подачи достаточно мощного импульса тока /тока адаптации/ в обмотку адаптации соответствующего сердечника. Амплитуда импульса напряжения на выходе формирующей схемы должна быть такой величины, чтобы обеспечить в обмотке управления  $\mathcal{W}_y$  трансфлюксора ток, превышающий пороговое значение, при котором начинается необратимое изменение остаточного потока  $\Phi_{ост}$ . Выбирая соответствующим образом витковые данные и параметры сердечников формирующей схемы и трансфлюксора, можно получить элементарные приращения  $\delta\Phi_{ост}$  намного меньше полного диапазона изменения остаточного потока, что обеспечивает достаточно большое число значений коэффициента передачи.

Возврат формирующих сердечников в исходные состояния под действием тока смещения должен происходить настолько медленно, чтобы возникающий при этом в цепи связи ток не превышал порогового значения, при котором начинается необратимое изменение остаточного потока  $\Phi_{ост}$ .

Важно подчеркнуть, что перемагничивание формирующих сердечников из одного насыщенного состояния в другое токами адаптации возможно лишь при наличии тока смещения. Это позволяет осуществить матричную селекцию подлежащих адаптации трансфлюксоров из системы.

В этой же главе проведено теоретическое и экспериментальное исследование различных параметров выходного напряжения трансфлюксора, которые могут характеризовать величину коэффициента передачи. Показано, что в качестве величины, однозначно соответствующей

ней установленному значению остаточного потока  $\Phi_{ост}$ , следует использовать вольт-секундную площадь  $\mathcal{Y}$  выходных импульсов напряжения, которая линейно зависит от величины  $\Phi_{ост}$ . При этом обеспечивается наибольшая стабильность выходного параметра по отношению к изменениям частоты, величины и формы тока считывания, представляющего входную двоичную переменную. Кроме того, при использовании вольт-секундной площади импульсов выходного напряжения легко построить пороговые схемы на магнитных сердечниках, которые реагируют на сумму  $\sum \mathcal{Y}_i$ .

Для построения адаптивных компонентов, коэффициент передачи которых меняется от  $-1$  до  $+1$ , включая нулевое значение, необходимо использовать источник вольт-секундной площади смещения, подключаемый к выходу трансфлюксора. В качестве такого источника можно использовать компенсационный сердечник с ШГ. Обмотки считывания трансфлюксора и компенсационного сердечника включаются согласно, а выходные - встречно. При этом величина коэффициента передачи будет определяться вольт-секундной площадью результирующих импульсов напряжения, а знак - фазой этих импульсов. Однако, более удобно использовать два одинаковых трансфлюксора со встречно включенными выходными обмотками и согласно - обмотками считывания. Обмотки управления включаются так, чтобы при воздействии управляющих импульсов данной полярности один трансфлюксор блокировался, а другой открывался. В этом случае легко получить симметричные пределы изменения коэффициента передачи. Кроме того, как показали экспериментальные исследования, данная схема позволяет получить накопительную характеристику, приближающуюся в большей степени к линейной, чем при использовании схемы с компенсационным сердечником.

На основе схемы, содержащей два трансфлюксора и формирующие тороидальные сердечники, построены адаптивные компоненты, позволяющие

щие получать более стабильных значений коэффициента передачи в пределах нормализованной области  $[-1, +1]$  и допускающие матричную выборку из системы.

Результаты проведенного в главе теоретического анализа работы адаптивных компонентов на этапах подготовки и адаптации могут быть использованы для оптимального выбора параметров их схем.

В третьей главе рассматриваются пути построения АПЭ с использованием адаптивных компонентов на трансфлюксорах и тороидальных сердечниках. Это имеет важное значение как с точки зрения реализации основных строительных блоков для многослойных РУ, так и для выявления особенностей применения разработанных адаптивных компонентов как элементов сложных систем.

При технической реализации АПЭ возникают следующие основные задачи: 1/ получение сигнала, пропорционального взвешенной сумме входных переменных  $\sum_{i=0}^n \lambda_i x_i$  /где  $\lambda_i$  - вес  $i$ -ого входа  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $\lambda_0$  - вес постоянного входа  $x_0 \equiv 1$ , определяющий порог/ и сравнение этого сигнала с нулевым порогом; 2/ изменение величин весов  $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, n$  в соответствии с используемым алгоритмом обучения. Решение второй задачи связано со способом представления входных двоичных переменных, которые могут задаваться как в коде  $[0, 1]$ , так и в коде  $[-1, +1]$ . С математической точки зрения оба способа кодирования для идеальных адаптивных компонентов равноценны. Однако при наличии разброса, нелинейности, гистерезиса и других "дефектов" в накопительных характеристиках отдельных адаптивных компонентов более выгодно для улучшения сходимости алгоритмов обучения к решению использовать код  $[-1, +1]$ . Обсуждение различных дефектов накопительных характеристик и последнего утверждения дается в четвертой главе. Вообще говоря, выбор того или иного кода зависит от конкретной системы, числа двоичных входов и

других факторов.

В главе рассматриваются оба способа кодирования входных двоичных переменных. При использовании кода  $[0, 1]$  единичное значение входной переменной представляется отличным от нуля током считывания с фиксированной фазой. В случае использования кода  $[-1, +1]$  переменные разных знаков задаются отличающимися по фазе на  $\pi$  токами считывания. С целью обеспечения требуемого изменения коэффициента передачи адаптивного компонента при задании входной переменной в коде  $[-1, +1]$  предложена специальная схема на тороидальных сердечниках.

На этапе обучения изменение коэффициента передачи адаптивного компонента может происходить при совпадающем воздействии постоянного тока смещения и тока адаптации. Одновременно с этим на адаптивный компонент должен подаваться ток считывания, представляющий входную двоичную переменную. При этом необходимо использовать два коммутирующих ключа - для тока считывания и тока смещения. В главе рассмотрен способ, позволяющий использовать токи считывания для подготовки формирующих сердечников. Он заключается в последовательном соединении обмоток подготовки формирующих сердечников и обмоток считывания трансфлюксоров каждого адаптивного компонента. При этом необходимо синхронизировать импульсы тока адаптации с импульсами тока считывания, так как перемагничивание формирующих сердечников из одного насыщенного состояния в другое возможно лишь в том случае, если импульсы тока адаптации появляются в определенные моменты действия той полуволны тока считывания, которая возвращает сердечники в исходные состояния. Таким образом, в данной схеме достаточно использовать лишь один ключ, коммутирующий ток считывания.

Для получения взвешенной суммы входных переменных необходимо использовать соответствующее количество адаптивных компонентов,

причем для создания управляемого порога  $\lambda_c$  можно использовать один адаптивный компонент, на вход которого всегда поступает двоичная единица /т.е. ток считывания всегда включен/. Вольт-секундная площадь импульсов напряжения, появляющихся на последовательно включенных выходных обмотках всех адаптивных компонентов, равна

$$\sum_{i=0}^n w_i \Delta \Phi_i x_i = \sum_{i=1}^n w_i \Delta \Phi_i x_i + w_0 \Delta \Phi_0 = \lambda_c \left( \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0 \right),$$

где  $x_i$  - значение  $i$ -ой входной двоичной переменной;  $w_i$  - число витков выходной обмотки на каждом трансфлюксоре  $i$ -го адаптивного компонента /обычно выбирается  $w_i = w_1 \cdot 2^{i-1} \dots$  /;  $\Delta \Phi_i$  - разность остаточных потоков трансфлюксоров  $i$ -го адаптивного компонента;  $\lambda_c$  - коэффициент пропорциональности. Из приведенного выражения следует, что получение взвешенной суммы входных переменных и ее сравнение с нулевым порогом должно осуществляться путем интегрирования результирующего импульса напряжения  $U_{\Sigma}$ , появляющегося на общей выходной обмотке всех адаптивных компонентов. Очевидно, что использование для этой цели электронных или полупроводниковых интеграторов является нежелательным с точки зрения надежности, габаритов, стоимости и т.д., поскольку именно эти характеристики становятся определяющими в системах, состоящих из большого количества АПЭ.

В данной главе показано, что интегрирование напряжения  $U_{\Sigma}$  можно осуществить, используя свойства магнитных сердечников с ПШГ. Предложенная пороговая схема на тороидальных ферритовых сердечниках позволяет простым путем суммировать выходные сигналы со многих адаптивных компонентов и сравнивать полученную сумму с нулевым порогом [4;7]. На основе проведенного в главе анализа получены формулы, позволяющие рассчитывать параметры пороговой схемы для заданного числа подключаемых к ней адаптивных компонентов. Автоматическая адаптация весов АПЭ в соответствии с используемым алгоритмом

обучения легко производится с помощью предложенной схемы обратной связи [2,4].

При построении адаптивных систем, содержащих большое число адаптивных компонентов на трансфлюксорах и тороидальных сердечниках, возникает важная задача создания специальных источников токов считывания и управления, отвечающих требованиям надежности, экономичности и простоты.

Трудности, возникающие при построении источников тока считывания, обусловлены тем, что в процессе перемагничивания материала вокруг отверстий считывания трансфлюксоров адаптивных компонентов сопротивление обмоток считывания изменяется в сотни раз. Это обстоятельство требует стабилизации тока считывания, представляющего входные двоичные переменные. Использование для этой цели балластных сопротивлений крайне нежелательно. Простой расчет показывает, что даже при относительно высокой допустимой нестабильности тока считывания  $\delta = \frac{\Delta I_{c4}}{I_{c4}} = 0,25$  /где  $I_{c4}$  - номинальное значение тока считывания,  $\Delta I_{c4}$  - отклонение тока считывания от номинального значения/ мощность, бесполезно рассеиваемая на балластных сопротивлениях в пересчете на один адаптивный компонент может составить величину порядка 1 Вт. Если учесть, что сложные системы могут содержать  $10^4$  и более компонентов, то становится очевидной неприемлемость указанного способа формирования тока считывания.

Следует отметить, что, вообще говоря, величина  $\delta$  должна выбираться так, чтобы нестабильность выходных параметров адаптивных компонентов не превышала разрешающей способности подключаемых к ним устройств. Рациональным путем построения экономичных источников тока, обеспечивающих заданную величину  $\delta$ , является использование активных стабилизирующих звеньев. В качест-

ве стабилизирующего звена предложено использовать транзистор, работающий в активной области, в коллектор которого включается нагрузка с переменным сопротивлением. В эмиттер включается сопротивление, обеспечивающее отрицательную обратную связь по току. Необходимый ток базы, обеспечивающий желаемый ток коллектора задается с помощью делителя напряжения, которое подается на стабилизирующую схему. Проведенный анализ показывает, что на транзисторах средней мощности можно получить выходное сопротивление стабилизирующей схемы порядка 10 ком. В этом случае при изменении сопротивления нагрузки от 0 до 100 ом ток коллектора меняется примерно на 1%.

Если на стабилизирующую схему подавать однополярные импульсы напряжения, то через нагрузку будут следовать стабилизированные однополярные импульсы тока. Двухполярные импульсы тока можно получить с помощью схемы, в которой используются два реверсивно включенных на общую нагрузку стабилизатора, на каждый из которых в противофазе подаются однополярные импульсы напряжения. Комбинирование генератора Ройера, имеющего высокий к.п.д., с рассмотренными схемами стабилизации позволяет строить очень экономичные источники переменного тока. Например, мощность, потребляемая источником тока считывания от генератора постоянного напряжения, построенного для макета АПЭ, содержащего 100 адаптивных компонентов, составляет около 10 Вт.

В этой же главе рассматриваются особенности построения источников токов адаптации. Очевидно, что эти особенности тесно связаны с конкретной адаптивной системой и используемым алгоритмом обучения. Например, в АПЭ на этапе обучения в зависимости от знака разности  $y^* - y$ , где  $y^*$  - желаемый, а  $y$  - действительный выход АПЭ, в последовательно соединенные обмотки адаптации

всех весовых компонентов необходимо подавать импульсы тока адаптации  $I_a^+$  или  $I_a^-$ . В данном случае можно использовать следующий принцип построения источников токов адаптации. Теоретически или экспериментально определяется максимально возможное число  $N$  формирующих сердечников, которые можно одновременно перемагнитить с требуемой скоростью, используя один ключевой транзистор данного типа. Если общее число подлежащих перемагничиванию сердечников равно  $N$ , то необходимо иметь  $n_0 \geq \frac{N}{n}$  ключевых транзисторов. Формирующие сердечники разбиваются на  $n_0$  групп, причем каждая группа должна иметь два ключевых транзистора - один для  $I_a^+$ , другой - для  $I_a^-$ . Все транзисторы, формирующие токи  $I_a^+$ , одновременно включаются общим устройством запуска. Такое же устройство запуска необходимо для включения формирователей токов  $I_a^-$ . Используя рассмотренный принцип, можно строить источники токов адаптации для АПЭ, содержащих произвольное число адаптивных компонентов.

Совместное функционирование разработанных адаптивных компонентов и электронных устройств было исследовано на макете АПЭ, имеющего 100 двоичных входов, заданных в коде  $\{-1, +1\}$ .

Результаты исследований свидетельствуют о нормальной совместной работе всех блоков и узлов системы.

Четвертая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию предельных возможностей адаптивных пороговых элементов, построенных на основе реальных адаптивных компонентов, неизбежно обладающих некоторыми дефектами. Несмотря на различные физические принципы построения, можно выделить ряд типичных дефектов адаптивных компонентов, которые определяются видом характеристики по управляющему входу  $Z$ , а также стабильностью установленного коэффициента передачи во

времени. Исследование характеристик адаптивных компонентов позволило выявить следующие дефекты, каждый из которых в той или иной мере присущ всем типам элементов: 1/ ограниченное число стабильных состояний; 2/ нелинейность характеристики по управляющему входу; 3/ гистерезис. Кроме этих дефектов необходимо учитывать 4/ разброс характеристик от элемента к элементу; 5/ нестабильность /дрейф/ установленного значения коэффициента передачи.

Влияние указанных дефектов адаптивных компонентов на функционирование системы зависит, вообще говоря, от структуры последней. При исследовании АПЭ основными критериями качества его функционирования являются: 1/ стабильность работы обученной системы в продолжение длительного интервала времени; 2/ время обучения, измеренное числом коррекций весов, необходимых для нахождения весового вектора решения /в сравнении с "идеальным" АПЭ/. В главе показано, что максимально допустимое относительное изменение  $\mathcal{E}_{max}$  найденных в процессе обучения весовых коэффициентов, при котором АПЭ все еще правильно классифицирует элементы тренировочного множества образов, пропорционально минимальному евклидову расстоянию между выпуклыми оболочками образов различных классов и, следовательно,  $\mathcal{E}_{max}$  может меняться от задачи к задаче.

Нестабильность коэффициентов передачи магнитных адаптивных компонентов, исследованных в настоящей работе, обуславливается колебаниями температуры окружающей среды и тока считывания. Если температура и величина тока считывания не превысят некоторых критических значений, то изменение весового коэффициента является обратимым. В некоторых случаях /например, при использовании мемисторов или солионов/ изменения величин весов являются самопроизвольными и необратимыми. Время, в течение которого относи-

тельное изменение весов достигнет  $\mathcal{E}_{max}$ , является временем "жизни" обученной системы. Для систем, построенных на основе магнитных адаптивных компонентов, время жизни практически не ограничено.

Дефекты, обуславливающие отклонение характеристик адаптивных компонентов по управляющему входу от идеальных /линейных/ и разброс характеристик от элемента к элементу могут, вообще говоря, нарушить сходимость к решению используемого алгоритма обучения АПЭ. В главе сформулирована и доказана теорема, согласно которой всегда допустимы некоторые отклонения реальных характеристик адаптивных компонентов от идеальных. При этих допустимых отклонениях используемые алгоритмы обучения АПЭ сходятся к решению, если оно существует [8]. Однако время обучения может иногда значительно превышать время обучения в случае идеальных весовых компонентов. Показано, что представление входных двоичных переменных в коде /-1, +1/ вместо /0, 1/ ослабляет ограничения, накладываемые на допустимые отклонения характеристик адаптивных компонентов от идеальных.

В этой же главе приводятся результаты экспериментов по обучению макета АПЭ на сто двоичных входов, построенного на основе разработанных адаптивных компонентов и схем управления. При этом использовался алгоритм обучения с абсолютной коррекцией ошибок. В экспериментах по обучению исследовались различные тренировочные множества образов. Некоторые из них приведены в приложении к диссертационной работе. Часть экспериментов заключалась в обучении АПЭ разделять на два класса различные начертания букв, представляемых на двоичном поле размером 10 x 10 клеток. Каждый элемент тренировочного множества образовывался написанием на клетчатой бумаге некоторой разновидности одной из букв и последующей штриховкой клеток, пересеченных контуром буквы. Каждая

заштрихованная клетка определяет единичное значение соответствующей ей входной переменной. В процессе обучения образы тренировочного множества в некоторой последовательности /для удобства - фиксированной/ подавались на вход АПЭ с указанием принадлежности их к соответствующему классу. Образованная таким способом последовательность будет циклической, причем каждый цикл называется итерацией. В ходе экспериментов установлено, что после 7-10 итераций АПЭ обучался давать желаемую классификацию элементам тренировочного множества. Интересно отметить, что АПЭ правильно классифицировал образы, не входившие в обучающую последовательность при условии, если они не слишком сильно отличались от тренировочных образов.

Несомненный интерес с точки зрения получения достаточно полных данных о возможности адаптивных систем, построенных на основе магнитных элементов, представляют опыты по обучению АПЭ интерпретации геофизических данных. Эти опыты проводились на материале, который использовался в различных программах по распознаванию образов для ЦВМ с целью разделения пластов породы на нефтеносные и водоносные по косвенным физическим параметрам пород. При этом каждый пласт представлялся числовой характеристикой, являвшейся объектом распознавания. Часть нефтеносных и водоносных пластов выбиралась в качестве тренировочного множества. Число ошибок АПЭ на всем множестве характеристик, представляющих пласты обоих классов, составило примерно 15%, что соизмеримо с процентом ошибок, возникающих при распознавании тех же образов с помощью различных программ на ЦВМ.

Полученные в работе результаты могут быть резюмированы следующим образом:

I/ На основе сравнительного анализа существующих теоретичес-

ких моделей адаптивных распознающих устройств сделан вывод, что достаточно совершенные распознающие устройства могут быть построены при использовании нелинейного фиксированного преобразователя входных переменных и адаптивного классификатора, реализующего линейные дискриминантные функции, для настройки параметров которых применимы простые итеративные алгоритмы. Рассмотрены адаптивные пороговые элементы, которые помимо самостоятельного применения являются основными строительными блоками важного класса адаптивных систем - многослойных обучающихся распознающих устройств.

В связи с тем, что технически значительно проще создать адаптивные компоненты - элементы переменных /регулируемых/ весовых коэффициентов - для двоичных входных сигналов, приведены методы построения адаптивных систем с использованием адаптивных компонентов с двоичными входами.

2/ Введены функциональные характеристики важнейших элементов обучающихся систем - адаптивных компонентов. С помощью этих характеристик легко определять область применимости адаптивных компонентов, построенных на основе различных физических принципов.

3/ Обоснованы и сформулированы требования, которым должны отвечать адаптивные компоненты как элементы сложных систем. Удовлетворение этим требованиям обеспечивает наиболее простую техническую реализацию адаптивных систем.

4/ Исследованы различные физические принципы построения адаптивных компонентов. Их сравнение позволило сделать вывод о перспективности использования явления ферромагнетизма. Показано, что в качестве элемента аналоговой памяти, выполняющего функции адаптивного компонента, в обучающихся системах целесообразно использовать трансфлюксоры из феррита с прямоугольной петлей гистерезиса, что значительно уменьшает стоимость, габариты, вес,

повышает быстродействие адаптивных компонентов по сравнению с устройствами, выполненными на металлических трансфлюксорах.

Теоретическое и экспериментальное исследование различных параметров выходного напряжения трансфлюксора показало, что в качестве величины, характеризующей остаточное состояние трансфлюксора, следует выбирать вольт-секундную площадь выходных импульсов напряжения, что обеспечивает наибольшую стабильность по отношению к изменениям частоты и величины тока считывания, представляющего входную двоичную переменную.

5/ Показано, что управлять остаточным потоком трансфлюксора, определяющим величину коэффициента передачи, целесообразно импульсами напряжения с фиксированной вольт-секундной площадью, так как в этом случае величина приращения потока меньше всего зависит от параметров магнитного материала и остаточного потока трансфлюксора. Это позволяет получить накопительную характеристику управления коэффициентом передачи адаптивного компонента, необходимую в большинстве теоретических моделей обучающихся систем.

В качестве источника импульсов напряжения с фиксированной вольт-секундной площадью целесообразно использовать ферритовые сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса. Одновременно с помощью этих же сердечников можно осуществить матричную выборку адаптивных компонентов. На указанных принципах построены адаптивные компоненты, которые допускают матричную выборку из системы и позволяют получать более ста устойчивых значений коэффициента передачи в пределах нормализованной области от  $-I$  до  $+I$ .

Получены теоретические соотношения, которые дают возможность анализировать адаптивные компоненты на различных этапах работы и оптимальным образом выбирать их параметры.

6/ Исследованы пути построения адаптивных пороговых элемен-

тов — основных строительных блоков многослойных обучающихся систем — на основе разработанных адаптивных компонентов на трансфлюксорах и тороидальных сердечниках. При этом выявлены особенности применения указанных адаптивных компонентов как элементов сложных систем. Для обеспечения требуемого изменения коэффициента передачи адаптивного компонента в случае представления входной переменной в коде  $-I$ ;  $+I$  предложена специальная схема на тороидальных сердечниках.

Величиной, пропорциональной взвешенной сумме входных переменных, является вольт-секундная площадь импульсов напряжения, возникающих на последовательно включенных выходных обмотках адаптивных компонентов. Для сравнения суммарной вольт-секундной площади с порогом требуется интегрировать эти импульсы. Предложенная в работе пороговая схема на тороидальных сердечниках с прямоугольной петлей гистерезиса позволяет производить интегрирование и сравнение с порогом.

Предложена и исследована специальная схема обратной связи для автоматической адаптации весов в соответствии с используемым алгоритмом обучения адаптивного порогового элемента.

7/ При создании систем, содержащих большое число адаптивных компонентов, возникает задача построения надежных и экономичных источников токов считывания и адаптации.

В работе приведены результаты теоретического и экспериментального исследования специально разработанного источника переменного тока считывания, который отличается высокой экономичностью, простотой и обеспечивает одновременное считывание информации с большого числа /в данном случае ста/ адаптивных компонентов, а также описаны результаты исследований специально разработанных

источников токов адаптации, с помощью которых осуществляется управление величинами коэффициентов передачи адаптивных компонентов. На основе рассмотренного принципа можно строить источники токов адаптации для систем, содержащих произвольное число адаптивных компонентов.

8/ Исследованы теоретически предельные возможности адаптивных пороговых элементов, построенных на основе реальных адаптивных компонентов, неизбежно обладающих рядом типичных дефектов. Показано, что величина допустимой неустойчивости установленных значений весов обученного адаптивного порогового элемента пропорциональна евклидову расстоянию между ближайшими точками выпуклых оболочек образов различных классов при условии, что разделяющая гиперплоскость проходит нормально через середину отрезка, соединяющего эти точки.

Основными дефектами реальных адаптивных компонентов, влияющими на процесс обучения адаптивного порогового элемента, являются нелинейность, гистерезис и разброс характеристик адаптивных компонентов по управляющему входу. Эти дефекты обуславливают отклонение реальных характеристик от идеальных /линейных/.

В работе сформулирована и доказана теорема, согласно которой всегда допустимы некоторые отклонения реальных характеристик адаптивных компонентов от идеальных. При этих допустимых отклонениях используемые алгоритмы обучения адаптивных пороговых элементов сходятся к решению за конечное число шагов, если оно существует. Показано, что представление входных двоичных переменных в коде  $-1; +1$  /вместо  $0, 1$ / ослабляет ограничение, накладываемое на допустимые отклонения реальных характеристик адаптивных компонентов по управляющему

входу от идеальных.

9/ Разработан и построен адаптивный пороговый элемент, имеющий сто двоичных входов. Проведены эксперименты по обучению адаптивного порогового элемента на различных тренировочных множествах образов. Результаты этих экспериментов демонстрируют полную работоспособность систем, построенных на основе магнитных элементов.

На основе результатов проведенных исследований можно рекомендовать широкое использование разработанных методов построения обучающихся систем на магнитных элементах.

Разработанные компоненты и схемы используются рядом организаций для построения некоторых типов адаптивных систем.

Отдельные результаты исследований доложены на конференции молодых специалистов, проводившихся в 1965 г. в Институте автоматики и телемеханики /технической кибернетики/ и на заводе управляющих и вычислительных машин /г. Киев/, а также на Всесоюзном совещании по магнитным элементам автоматики и вычислительной техники 1966 года /г. Таллин/.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Ромащев А.А., Семененко В.А., "Звенья с адаптируемым коэффициентом передачи на ферритовых трансфлюксорах для обучающихся систем", Сб. Теория и средства автоматики, Изд-во "Наука", 1968.

2. Ромащев А.А., Семененко В.А., "Адаптивный пороговый элемент на ферритовых сердечниках", Сб. Теория и средства автоматики, Изд-во "Наука", 1968.

3. Розенблат М.А., Ромащев А.А., Семененко В.А., "Элементы с адаптируемым коэффициентом передачи", Автоматика и телемеханика, № 10, 1967.

4. Розенблат М.А., Ромащев А.А., Семененко В.А., "Адаптивное пороговое устройство на магнитных элементах", Сб. Аналоговые магнитные элементы и электромагнитные устройства, Изд-во "Наука", 1968.

5. Ромащев А.А., Семененко В.А., "Некоторые способы управления коэффициентом передачи ферритового трансфлюксора", принято ОНТИ прибором на депонирование, февраль 1967 г.

6. Розенблат М.А., Ромащев А.А., Семененко В.А., "Устройство с адаптируемым коэффициентом передачи", Авт.свид. № 193790, "Изобрет., пром. образцы, тов. знаки", № 7, 1967.

7. Розенблат М.А., Ромащев А.А., Семененко В.А., "Логическое магнитное устройство с плавно изменяющимся порогом чувствительности", Авт.свид. № 206638. "Изобрет., пром. образцы, тов. знаки", № 1, 1968.

8. Ромащев А.А., "О сходимости некоторых алгоритмов обучения для адаптивных пороговых элементов при неидеальных весовых компонентах", Автоматика и телемеханика, № 3, 1968.