

6
А-53

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ МАШИН

МАЗО БОРИС ЛЬВОВИЧ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ
ОБУЧАЮЩИХСЯ МАТРИЧНЫХ СТРУКТУР

Диссертация написана на русском языке

Специальность № 05:253

Приборы и устройства

автоматики и телемеханики

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

МОСКВА 1973

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ МАШИН

На правах рукописи

МАЗО БОРИС ЛЬВОВИЧ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ
ОБУЧАЮЩИХСЯ МАТРИЧНЫХ СТРУКТУР

Диссертация написана на русском языке

Специальность № 05.253

Приборы и устройства

автоматики и телемеханики

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва 1973

621-52
A 53

Работа выполнена в Институте электронных управляющих машин (ИНЭУМ).

Научный руководитель: д.т.н. Боярченко М.А.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор Розенблат М.А.

к.т.н. Прохоров Н.Л.

Ведущее предприятие - Московский энергетический институт.

Автореферат разослан " " _____ 1973г.

Защита диссертации состоится "10" октября 1973г.
в 14 час. на заседании Учёного Совета ИНЭУМ.

Заверенные отрывки на автореферат просим высылать в двух экземплярах по адресу: П7812, Москва, ГСП-1, ИНЭУМ, Учёному секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНЭУМ.

Учёный секретарь
Совета ИНЭУМ,
к.т.н.

/Прохоров Н.Л./



Решение широкого круга задач, требующих обработки больших массивов информации в таких областях как распознавание образов, управление, диагностика, идентификация, фильтрация сигналов, информационный поиск, часто происходит в условиях недостаточной априорной информации об изучаемом объекте или связано с невозможностью построения для него удобной математической модели. В этом случае обращаются к адаптивным, или обучающимся системам, способным изменять свои характеристики в соответствии с накопленным опытом [1]. Подобные системы чрезвычайно полезны и в тех случаях, когда алгоритмы их функционирования хотя и известны заранее, но могут меняться в зависимости от ряда определенных условий.

Основным средством решения перечисленных проблем служат цифровые машины. Однако, их использование сопряжено с рядом известных трудностей, таких, как недостаточно высокое быстродействие, вытекающее из принципа последовательности действия, невысокая скорость обмена информацией с внешними устройствами, сложность современных машин и значительная стоимость машинного времени. В то же время, алгоритмы обработки информации в рассматриваемых задачах, особенно на этапе реализации уже разработанных алгоритмов, хотя и требуют большого объема вычислений, но являются довольно простыми. Вследствие этого, использование дорогостоящих универсальных ЭВМ с их широкими функциональными возможностями, но сравнительно медленных, в целом ряде случаев, является неэффективным. Поэтому, на протяжении последнего десятилетия внимание разработчиков постоянно привлекали адаптивные системы параллельного действия, которые, с одной стороны, обладают способностью к перестройке, а с другой стороны, являются более простыми по структуре и более быстродействующими и надежными, чем универсальные ЭВМ.

Одним из перспективных путей технической реализации параллельных адаптивных систем является использование для их построения элементов, способных к перенастройке своего коэффициента передачи, или веса, под воздействием сигналов управления. Эти элементы часто называют адаптивными элементами (АЭ), весовыми элементами, адаптивными весами или просто весами. Основу для создания адаптивных весов составляют аналоговые запоминающие элементы. Организация адаптивных элементов в систему, чаще всего, происходит по матричному принципу, поэтому, в дальнейшем, многоэле-

ментные устройства, обладающие способностью к перестройке, или обучению, и выполненные на базе адаптивных элементов, для краткости, будем именовать обучающимися матричными структурами или ОМС. Применение ОМС обеспечивает такие преимущества, как высокое быстродействие из-за параллельности всех операций, возможность одновременного изменения состояния многих весовых элементов, удобство осуществления сложения выходных сигналов большого числа элементов, возможность непосредственной обработки входных сигналов в аналоговой форме, простота организации и высокая надежность работы.

Хотя применение обучающихся матричных структур в адаптивных системах и позволяет устранить ряд трудностей, возникающих при использовании цифровых машин, однако, это вовсе не означает, что следует вообще отказаться от "услуг" ЭВМ в таких системах. (даже не говоря о необходимости применения ЭВМ на этапе предварительного моделирования и поисков общей стратегии решения проблемы). Напротив, целесообразно поставить вопрос не только, каким образом ОМС помогают разрешить трудности, обусловленные применением цифровых машин, но и что могут дать ЭВМ для расширения возможностей адаптивных систем, использующих обучающиеся матричные структуры. Правомерность постановки такого вопроса подчеркивается тем обстоятельством, что, по современным тенденциям, практически во всякой системе, предназначенной для обработки больших массивов информации, необходимым звеном является универсальная или управляющая машина. При организации совместной работы ОМС и ЭВМ, в целом, надо стремиться к тому, чтобы "передать" ОМС однообразные и простые операции, требующие большого объема вычислений, "оставив" за цифровой машиной функции логической обработки данных, общего управления системой и настройки, или обучения, матричных структур с использованием накопления в памяти машины необходимых для этого данных.

Несмотря на указанные достоинства обучающихся матричных структур, их применение сдерживается рядом обстоятельств, основными из которых являются: а) отсутствие простого и достаточного хорошо исследованного для практического применения базового компонента таких структур — адаптивного элемента, б) неразработанность принципов технической реализации ОМС, в) отсутствие четких представлений о роли и возможностях ОМС, г) неопределенность и, в част-

ную, противоречивость требований, предъявляемых к матричным структурам. Последние два обстоятельства являются непосредственным следствием ограниченного опыта применения ОМС для решения практических задач и трудностей теоретического описания их поведения в сложных реальных условиях.

В соответствии с вышеизложенным в работе были поставлены следующие задачи.

1. Выбор типа адаптивного элемента, его исследование и разработка.
2. Разработка принципов технической реализации ОМС с учетом выбранного типа адаптивного элемента.
3. Рассмотрение путей целесообразного применения обучающихся матричных структур.
4. Создание универсальной экспериментальной системы, включающей физическую модель ОМС и ЭВМ и предназначенной для всестороннего исследования возможностей ОМС при решении конкретных задач.

5. Исследование возможностей применения ОМС на конкретном примере использования их в качестве адаптивного классификатора в задаче автоматического распознавания рукописных символов, являющейся одной из самых важных и трудных в общей проблеме автоматизации ввода информации в ЭВМ.

6. Исследование некоторых путей построения ОМС для их работы с входными сигналами, представленными в аналоговой форме. Решение поставленных задач позволит создать необходимые предпосылки для построения быстродействующих, простых и надежных устройств адаптивной переработки информации на основе обучающихся матричных структур и, тем самым, будет способствовать преодолению затруднений, вызванных применением в этой области сработки информации дорогостоящих универсальных и управляющих ЭВМ последовательного действия.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений.

В первой главе рассмотрена функциональная организация обучающихся матричных структур и методы их настройки, или обучения, и сформулированы основные требования к техническим средствам для реализации ОМС.

Структурная схема ОМС представлена на рис. I, и она состоит из следующих узлов: входного устройства (на "n" входов), матрицы адаптивных весовых элементов (с "n" входами и "m" выходами), выходного устройства (на "m" входов и "r" выходов) и блока обучения.

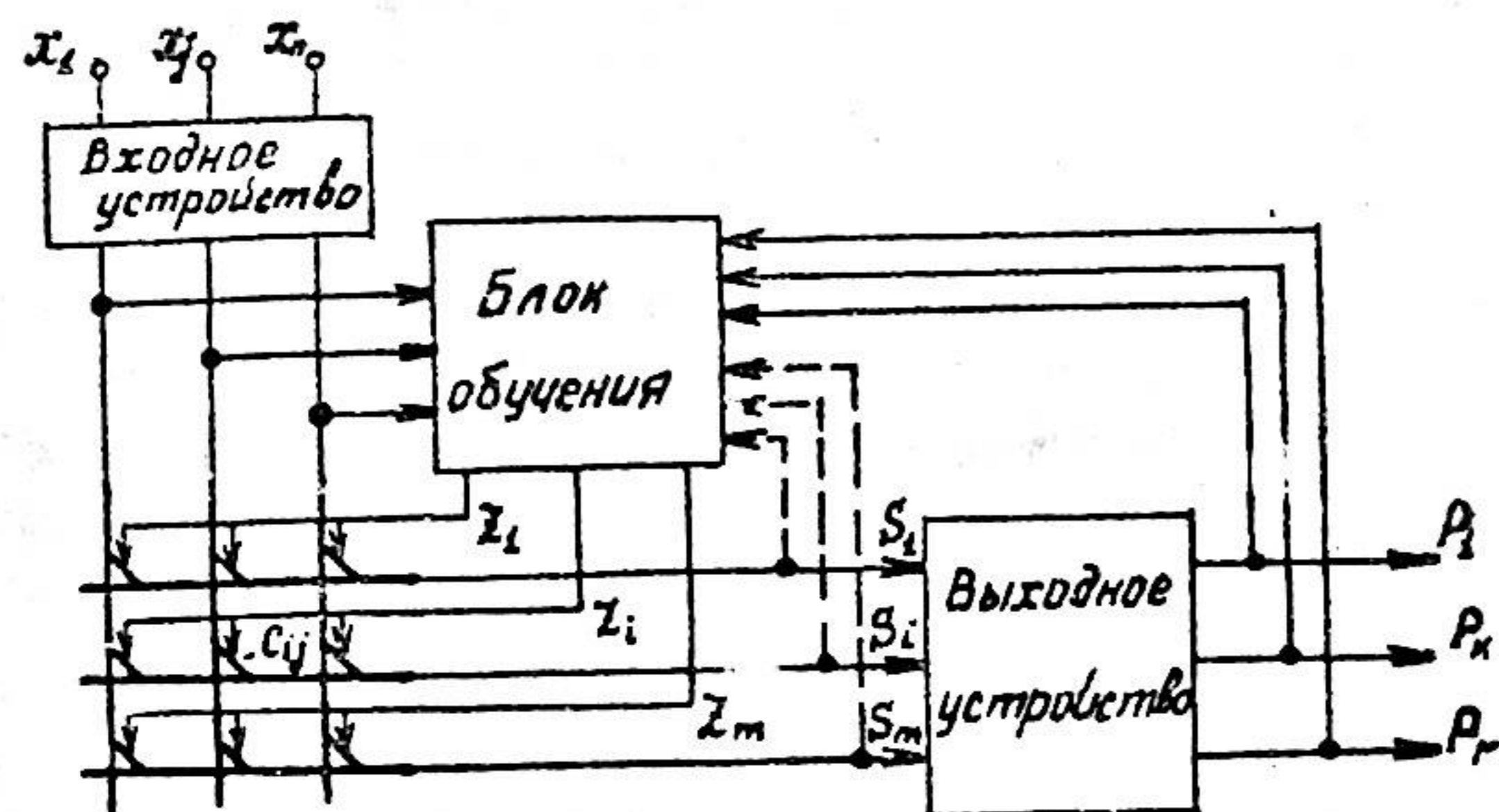


Рис. I

Входное устройство осуществляет преобразование входных сигналов ОМС $x_1, \dots, x_j, \dots, x_n$ в форму, необходимую для работы адаптивных элементов (АЭ). Входные сигналы могут быть представлены как в дискретной форме (0, 1 или -1, +1), так и в аналоговой.

Матрица адаптивных элементов является основным функциональным узлом ОМС и представляет собой набор взаимно-перпендикулярных проводников, в пересечении которых находятся адаптивные весовые элементы. Входные сигналы ОМС $x_1, \dots, x_j, \dots, x_n$, преобразованные входным устройством, подаются на проводники столбцов матрицы, и в адаптивных элементах происходит умножение этих сигналов на веса АЭ в соответствии с соотношениями:

$$y_{ij} = c_{ij} x_j; \quad i=1, \dots, m; \quad j=1, \dots, n, \quad (1)$$

где y_{ij} - выходной сигнал АЭ, установленного на пересечении i - строки и j - столбца, c_{ij} - вес ij - АЭ.

По строкам матрицы происходит суммирование выходных сигналов АЭ соответствующих строк, образуя выходные сигналы матрицы

$$S_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} = \sum_{j=1}^n c_{ij} x_j; \quad i=1, \dots, m. \quad (2)$$

Веса АЭ могут быть изменены в специальном режиме работы, называемом обучением. Перестройка весов вызывает изменение функционирования всей системы в соответствии с заданным критерием ее работы. Важно отметить, что такие операции, как умножение входных сигналов на весовые коэффициенты, сложение выходных сигналов АЭ вдоль строк и перестройка весов АЭ производится параллельно, что обуславливает значительно большее быстродействие ОМС, нежели вычислительных устройств последовательного действия, используемых для программной реализации тех же операций.

В выходном устройстве ОМС суммарные выходные сигналы матрицы $S_1, \dots, S_i, \dots, S_m$ преобразуются в набор некоторых других сигналов $P_1, \dots, P_n, \dots, P_r$, которые представляют собой реакцию ОМС на набор входных сигналов.

Функции блока обучения заключаются в настройке по определенным правилам адаптивных элементов. Исходной информацией для работы этого блока являются значения входных сигналов $x_1, \dots, x_j, \dots, x_n$ и выходных сигналов $S_1, \dots, S_i, \dots, S_m$ и/или $P_1, \dots, P_n, \dots, P_r$. Изменение весов АЭ происходит при совместном воздействии, так называемых, сигналов адаптации $z_1, \dots, z_i, \dots, z_m$, вырабатываемых блоком обучения на основании вводимых в него данных, и входных сигналов ОМС $x_1, \dots, x_j, \dots, x_n$

$$\Delta c_{ij} [K] = \alpha x_j [K] z_i [K], \quad (3)$$

где K - номер коррекции веса, α - конструктивный коэффициент, который, вообще говоря, зависит от состояния АЭ.

Обучающиеся матричные структуры являются эффективным техническим средством для построения линейных (или кусочно-линейных) адаптивных классификаторов, являющихся наиболее распространенным типом классификаторов. Классификаторы рассматриваемого типа различаются организацией только выходных схем, которые, в зависимости от метода принятия решения о принадлежности объекта тому или иному классу, могут использовать или пороговые схемы, или экстремальные детекторы, или мажоритарную логику и так далее.

Настройка адаптивных элементов может производиться в двух основных режимах: в режиме "прямой" записи весов и режиме после-

довательной коррекции весов. При использовании первого режима, в блоке обучения предварительно вычисляются значения всех весов, и затем, в соответствии с этими значениями, осуществляется настройка адаптивных элементов. При использовании второго режима, на каждом последовательном шаге коррекции производится лишь изменение весов по отношению к их предыдущему состоянию. Величины и знаки изменений весов определяются в блоке обучения по действительной реакции ОМС на данный набор входных сигналов. Таким образом, существенными чертами второго режима записи являются возможность непосредственного использования быстродействующих ОМС в самом процессе обучения и автоматическая компенсация в ходе этого процесса различий в характеристиках реального технического устройства и предполагаемой математической модели.

Применение режима "п. мой" записи целесообразно в тех случаях, когда значения весов уже заранее известны (например, на основании предыдущего опыта), для смены весов АЭ при переходе от одной задачи к другой, значения которых хранятся во внешней памяти, для установки начальных значений АЭ при последовательной коррекции, а также в ряде других случаев.

Наиболее специфическим звеном в обучающихся матричных структурах является адаптивный элемент, характеристики которого во многом определяют и характеристики системы в целом. Из рассмотрения работы ОМС следует, что АЭ должны удовлетворять некоторым принципиальным требованиям, независимо от сферы их применения. Такими требованиями являются: 1. Неразрушающее считывание состояния элемента. 2. Изменение веса АЭ с определенной степенью дискретности, не превышающей допустимую, и сохранение достигнутого состояния. 3. Возможность коррекции веса при совпадении двух сигналов: входного и адаптации.

Кроме того, к адаптивным элементам должны предъявляться некоторые другие требования, обусловленные спецификой их применения. Так как для обучающихся матричных структур является характерным использование большого числа АЭ (десятков и сотен тысяч элементов [2]), то чрезвычайно важными требованиями являются простота и технологичность элементов, их низкая стоимость, невысокая потребляемая мощность, удобство сложения выходных сигналов

многих элементов. Часто требуется (а в некоторых случаях это требование является решающим) обеспечить сохранение достигнутого состояния АЭ при отключении питания.

Необходимая величина быстродействия при записи и считывании в зависимости от применения может меняться в широких пределах от единиц микросекунд до нескольких миллисекунд. Входные сигналы ОМС могут быть представлены либо в дискретной форме (0, I или - I, +I), либо в аналоговой (непрерывной).

Во второй главе производится выбор типа адаптивного элемента, в качестве которого предлагается магнитный адаптивный элемент с выходом на удвоенной частоте возбуждения, и приведены результаты теоретического и экспериментального исследования этого типа АЭ. На основании результатов этих исследований даются рекомендации по выбору режимов работы элемента и параметров сердечников, используемых для его построения.

Так как в данной работе делается акцент на использование в вычислительных устройствах и системах ОМС большого объема, в которых в наибольшей мере проявляется их преимущества как системы параллельного действия, то важнейшими требованиями являются простота и экономичность АЭ. Вследствие того, что предполагается возможность длительной работы ОМС в автономном режиме, то необходимо обеспечить сохранение информации в АЭ при отключении источников питания.

Анализ различных типов адаптивных элементов, предложенных к настоящему времени, показывает, что совокупности рассмотренных требований наилучшим образом удовлетворяют магнитные АЭ, построенные на разветвленных или тороидальных сердечниках. Однако, АЭ на разветвленных сердечниках при всех своих достоинствах являются слишком сложными: они содержат два многотверстных сердечника и несколько тороидальных, связанных между собой системой обмоток, среди которых имеются многовитковые. Вследствие этого, в настоящей работе было отдано предпочтение магнетизму адаптивному элементу с выходом на удвоенной частоте возбуждения, или, более коротко, адаптивному элементу на второй гармонике (АЭВГ). Элемент прост, содержит всего один или два тороидальных магнитных сердечника, изготовленных по отработанной технологии, и две одновитковые обмотки, первая из которых используется для возбуждения, а вторая

для съема выходного сигнала и подачи импульсов постоянного тока, играющих роль сигналов адаптации. Выходной сигнал неразрушающего считывания, снимаемый на удвоенной частоте возбуждения, пропорционален величине остаточного потока $\Phi_{ост}$, а величина $\Phi_{ост}$ изменяется при совместном действии переменного тока возбуждения и импульсов постоянного тока. Помимо общих достоинств, присущих магнитным элементам, таких, как высокая стабильность хранения информации, надежность, гальваническая развязка входных и выходных цепей, возможность матричной выборки при записи без применения электронной коммутирующей аппаратуры, удобство суммирования многих сигналов, высокое быстродействие при записи и считывании, АЭВГ обладает и такими важными специфическими особенностями, как монотонная зависимость выходного сигнала от величины остаточного потока сердечника, высокая нагрузочная способность, частотная развязка цепей возбуждения и выхода, которая определяет высокую помехоустойчивость элемента и дает возможность оперировать с малыми величинами выходных сигналов. Положительным моментом является и то, что опыт, накопленный при создании и эксплуатации ОМС на основе АЭВГ на сердечниках во многом может быть перенесен на системы, предполагающие использование такого перспективного класса адаптивных элементов, как АЭ на тонких магнитных пленках (ТМП). Это объясняется тем обстоятельством, что, несмотря на заметное различие физических процессов в массивных ферромагнетиках и в ТМП, принципы считывания и записи в обоих АЭ одни и те же (считывание на удвоенной частоте возбуждения и запись методом совпадения координатных токов).

Несмотря на то, что принцип работы АЭВГ был предложен достаточно давно, в литературе имеется лишь небольшое число разрозненных сведений по этому элементу, а выбор режимов работы элемента и параметров сердечников, используемых для него, во многом, являлся случайным. В связи с этим, в процессе данной работы были проведены подробные исследования по неразрушающему считыванию и координатной записи аналоговой информации в тороидальных сердечниках. Эти исследования явились основой для рекомендаций по выбору режимов работы элемента и параметров сердечников. В качестве критерия выбора этих показателей в условиях большого числа одновременно возбуждаемых входов целесообразно выбрать критерий минимального тока возбуждения сердечников.

В работе показано, что минимальный ток возбуждения, обеспечивающий координатную запись, для материалов с ШП, не превосходит тока, допустимого с точки зрения неразрушающего считывания, и, в то же время, позволяет селективировать напряжение удвоенной частоты достаточно простыми средствами (гл. III). Материалы с ШП для координатной записи совпадением переменного и постоянного полей — малоприменимы. Для выбора амплитуд координатных токов предложен метод, использующий, так называемые, характеристики управления, которые представляют собой зависимости выходного сигнала на второй гармонике E_2 от амплитуды м.д.с. F_a импульсов постоянного тока при определенных значениях их длительности, скважности и при фиксированной амплитуде м.д.с. переменного поля F_m , причем одна зависимость снимается при записи одним постоянным полем, а вторая при совпадении обоих полей. Анализ поведения характеристик управления позволил установить, что для сохранения информации при воздействии одного лишь постоянного поля наиболее критичным является режим изменения полярности импульсов постоянного тока вблизи состояния насыщения. Этот режим определяет максимально допустимое значение F_a . Минимальные значения F_a и F_m определяются из условия достижения выбранного диапазона изменения напряжения E_2 .

Проведенные исследования позволили, в конечном итоге, снизить токи возбуждения сердечников в два — три раза по сравнению с используемыми ранее. В работе предложено на время записи снижать частоту переменного тока, устанавливаемую в процессе считывания информации. Такое мероприятие несложно осуществить со схемной точки зрения, и оно позволяет дополнительно уменьшить ток возбуждения примерно в два раза.

В работе теоретически рассмотрен механизм возникновения второй гармоники при неразрушающем считывании аналоговой информации в тороидальных сердечниках. Существенным моментом этого исследования, в отличие от более ранних явилось то, что в данном случае была рассмотрена динамика перемагничивания сердечников при неразрушающем считывании. Введение динамики позволило объяснить механизм возникновения второй гармоники при возбуждении сердечников токами прямоугольной формы, имеющей, с точки зрения построения схем возбуждения, целый ряд важных преимуществ перед

синусоидальной формой (гл. III). В качестве исходной модели перемангничивания была выбрана модель Прейсаха [3], согласно которой весь ферромагнетик предполагается разбитым на отдельные участки, поведение каждого из которых определяется своей элементарной петлей гистерезиса, имеющей прямоугольную форму и характеризующейся двумя значениями локальной напряженности переключения h_1 и h_2 с равномерной плотностью распределения $\gamma(h_1, h_2) = \text{const.}$ Автором дополнительно было предположено, что плотность $\gamma(h_1, h_2)$ не постоянна по h_1, h_2 , и характер зависимости γ от h_1, h_2 меняется вместе с величиной остаточного потока $\Phi_{\text{ост}}$ и что переключение элементарных петель происходит не мгновенно, а его скорость пропорциональна разности между h_i ($i = 1, 2$) и напряженностью внешнего поля.

$$\frac{db}{dt} = \beta (H - h_i), \quad (4)$$

где b — индукция элементарной петли, β — коэффициент пропорциональности, H — напряженность внешнего поля. При этих предположениях было показано, что если зависимость индукции b от напряженности H на частных циклах задана аналитически, то и зависимость b от времени также можно получить в аналитическом виде. Для описания частного цикла с помощью формулы Релея [3] удалось установить, что амплитуда второй гармоники E_2 пропорциональна остаточному потоку $\Phi_{\text{ост}}$, а ее фаза постоянна. Теоретические выводы подтверждаются проведенными экспериментами.

Для выбора параметров сердечников было исследовано влияние на характеристики координатной записи и неразрушающего считывания таких факторов, как геометрия сердечников, их материал, толщина ленты. Частота возбуждения изменялась в этих экспериментах от 0,15 до 1 МГц. Для возбуждения сердечников использовалась как синусоидальная, так и прямоугольная форма волны.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы и рекомендации:

— Для уменьшения амплитуды тока возбуждения, обеспечивающего запись совпадением, целесообразно уменьшать толщину ленты, коэрцитивную силу материала и частоту возбуждения; отношение внешнего радиуса сердечника к внутреннему целесообразно устанавливать равным 1,3 + 1,5.

— Скорость адаптации веса (или изменения выходного сигнала E_2) монотонно уменьшается при перемангничивании сердечника в одном и том же направлении и увеличивается после изменения этого направления.

— В ленточных сердечниках ход характеристик адаптации легко регулируется посредством изменения длительности импульсов постоянного тока, общее число ступеней во всем диапазоне изменения E_2 достигает несколько сотен. Для ферритовых сердечников диспропорциональность в изменении скорости адаптации в 10 + 20 раз выше, чем для ленточных сердечников, а ход характеристик адаптации сильно зависит от частоты поступления импульсов постоянного тока.

— Для минимальных токов возбуждения, выбранных из условий записи совпадением, типичное отношение амплитуд второй и первой гармоник составляет 0,025 + 0,1. Включение в схему элемента второго сердечника увеличивает это отношение на 20 + 40 дБ.

— Повышение частоты возбуждения (от 0,15 МГц до 1 МГц) ухудшает отношение амплитуды второй гармоники к первой для любых материалов и толщин лент. Переход от синусоидальной формы волны к прямоугольной при одинаковых амплитудах токов возбуждения увеличивает амплитуды первой и второй гармоник напряжения в 2 — 3 раза, оставляя их отношение приблизительно неизменным.

— Снижение толщины ленты до 10 мкм включительно вызывает для всех материалов рост выходного сигнала, при дальнейшем снижении толщины выходной сигнал не увеличивается или даже падает, что связано с заметным увеличением коэрцитивной силы в тонких лентах.

— При использовании тонких лент (менее 10 мкм) и ферритов наблюдается необратимое изменение состояния сердечников под действием токов коммутации, составляющего 5 + 10%.

— Длительное включение и отключение возбуждения (на десятки секунд и более) вызывает обратимые изменения состояний сердечников, обусловленные их нагревом и остыванием. Эти изменения зависят от амплитуды и частоты тока возбуждения, и они уменьшаются вместе с этими показателями. В режиме возбуждения, определяемом условиями записи совпадения, при частоте 150 кГц эти колебания составляют для материала 50 III и толщины ленты 20 мкм приблизительно 2-3%.

По совокупности основных показателей таких, как возможность

неразрушающего считывания и матричной записи, величина выходного сигнала, плавность изменения выходного сигнала, потребляемый ток возбуждения, устойчивость к внешним воздействиям, стоимость материала — в первую очередь, могут быть рекомендованы пермаллоевые текстурованные сплавы 50НП при толщине ленты 10 и 20 мкм. Частоту переменного тока целесообразно устанавливать равной 100 ± 200 кГц. Увеличение частоты следует производить только при повышенных требованиях к быстродействию.

В третьей главе рассмотрена структурная организация ОМС на основе АЭ с выходом на удвоенной частоте возбуждения для входных сигналов, представленных как в дискретной форме, так и в аналоговой. Предложены принципиальные схемы и методы расчета основных узлов ОМС. Рассмотрены методы настройки АЭ для обеих форм представления сигнала.

Основными структурными элементами ОМС на основе АЭВГ являются собственно матрица адаптивных элементов, цепи возбуждения элементов, выходные схемы, схемы записи информации и блок задающих напряжений.

В работе показано, что возбуждение сердечников целесообразно осуществлять токами прямоугольной формы с использованием отдельных генераторов возбуждения на каждый столбец. Использование прямоугольной формы по сравнению с синусоидальной имеет неоспоримые преимущества с точки зрения простоты, надежности, экономичности схем возбуждения и удобств их сопряжения с логическими управляющими схемами. Предложены схемные решения по построению генераторов возбуждения, работа таких генераторов синхронизирована сигналом от общего блока задающих напряжений. Управление генераторами может осуществляться непосредственно от триггеров соответствующих разрядов входного цифрового регистра.

Критерием для выбора напряжения питания генераторов возбуждения является величина взаимного влияния элементов одного столбца. Для количественной оценки этого явления введен, так называемый, коэффициент влияния ρ :

$$\rho = \frac{\Delta C_{ij}}{\Delta C_{lj}}; \quad i, l = 1, \dots, m; \quad i \neq l. \quad (5)$$

В этой формуле ΔC_{ij} — изменение веса в АЭ, подвергнутому пере-

магничиванию, а ΔC_{lj} — изменение веса в любом другом АЭ того же столбца под влиянием перемгничивания l_j -го элемента. Подробные экспериментальные исследования показали, что ρ определяется током возбуждения и напряжением генераторов и не зависит от состояний i_j -го и l_j -го элементов и числа элементов в столбце m . Включение в элемент двух сердечников позволяет на один-два порядка снизить коэффициент влияния при неизменном напряжении питания. Допустимая величина ρ определяется или путем моделирования рассматриваемого явления на ЭВМ, или как это сделано в настоящей работе, непосредственно на физической модели ОМС.

Выделение сигнала вт.ой гармоники и из общего спектра выходного сигнала, в настоящее время, наиболее удобным и надежным способом можно осуществить с помощью схемы, состоящей из простого резонансного контура, усилителя и фазового детектора со сглаживающим фильтром. Сглаживающие фильтры подсоединяются либо к пороговым устройствам, либо к экстремальному детектору, либо к аналого-цифровому преобразователю. Подобные устройства достаточно широко описаны в литературе.

Теоретически показано, что для достижения максимального быстродействия рассмотренной схемы при заданном уровне пульсаций на выходе сглаживающего фильтра инерционность резонансного контура и фильтра должны находиться во вполне определенном соотношении, которое зависит от отношения амплитуд первой и второй гармоник на выходе строк матрицы АЭ. Увеличить быстродействие выходной схемы можно путем увеличения частоты и тока возбуждения. Наиболее кардинальный путь увеличения быстродействия заключается в замене сглаживающего фильтра на интегратор со временем интегрирования в один период удвоенной частоты возбуждения.

Дальнейшее усовершенствование выходной схемы может идти по пути использования параметронов, принципиально позволяющих значительно упростить эту схему, но требующих специальных дополнительных исследований.

Для реализации ОМС на АЭВГ в случае аналоговых входных сигналов автором предложено использовать нецелую фазовую модуляцию токов возбуждения. Среднее значение напряжения на выходе сглаживающего фильтра i -строки при этом равно:

$$E_{\text{ср.ф.и}} = 2K\beta \sum_{j=1}^n C_{ij} \sin 2\alpha x_j, \quad (6)$$

где K и β — некоторые постоянные параметры выходной схемы, а α — постоянный коэффициент, связывающий изменения фазы тока возбуждения и входного сигнала. При условии $-\frac{\pi}{2} \leq 2\alpha x_j \leq \frac{\pi}{2}$ $E_{\text{ср.ф.и}}$ оказывается монотонным образом связанным со входными сигналами ОМС, и, кроме того, если $x_1 = \dots = x_n = 0$, то и $E_{\text{ср.ф.и}} = 0$.

Основным отличительным звеном ОМС с аналоговыми входными сигналами от ОМС с дискретным характером входных сигналов является наличие фазосдвигающего устройства (ФСУ). Было разработано и построено ФСУ, основанное на принципе сравнения входного напряжения постоянного тока с пилообразным напряжением развертки, вырабатываемом блоком задающих напряжений. Анализ различных способов построения нуля-органов для ФСУ показал, что их целесообразно строить на базе амплитудного дискриминатора с туннельным диодом. Погрешность работы ФСУ определяется, в основном, временной нестабильностью туннельного диода и она составляет приблизительно 2,5% от полного диапазона изменения фазы. Был построен и успешно испытан макет ОМС с аналоговыми входными сигналами, имеющий 10 входов и 2 выхода. В случае необходимости получить линейную, а не синусоидальную, как в (6), зависимость между $E_{\text{ср.ф.и}}$ и x_1, \dots, x_n , можно либо ограничить диапазон изменения фазы тока возбуждения, либо заменить линейную форму развертки на арксинусоидальную.

В работе рассмотрены методы настройки ОМС, использующих АЭВГ, в обоих режимах: в режиме "прямой" записи и в режиме последовательной коррекции весов. Из-за значительного разброса в параметрах сердечников и нелинейности характеристик адаптации элементов "прямую" запись необходимо осуществлять с применением обратной связи по выходному сигналу АЭ, подобно тому, как это делается в аналоговых запоминающих устройствах замкнутого типа. В режиме последовательной коррекции весов, как показали эксперименты с реальными входными данными (гл. IV), эти факторы заметной роли не играют. Существенным моментом предложенного метода непрерывной фазовой модуляции является то, что он позволил разработать простой способ обучения ОМС с аналоговыми входными сигналами при после-

довательной коррекции весов. В работе показано, что если в качестве импульсов адаптации использовать биполярные импульсы, синхронизированные соответствующим образом с напряжением развертки, то изменения весов в процессе коррекции будут монотонным образом зависеть от величин аналоговых входных сигналов, а знаки этих изменений будут согласованы со знаками входных сигналов.

Важным моментом разработанных принципиальных схем является то, что они допускают широкое применение существующих типов интегральных схем, которое позволит существенно упростить всю конструкцию ОМС.

Четвертая глава посвящена вопросам применения адаптивных систем, использующих ОМС и работающих под управлением ЭВМ, и исследованию возможностей ОМС на АЭВГ, применяемой в качестве адаптивного классификатора в задаче распознавания рукописных символов.

Структурная схема адаптивной распознающей системы представлена на рис. 2. Основными узлами этой схемы являются: блок предварительной обработки данных (ПОД), обучающийся классификатор на основе ОМС и ЭВМ, осуществляющая функции общего управления работой системы, настройки весов ОМС и логической обработки ее выходных сигналов.

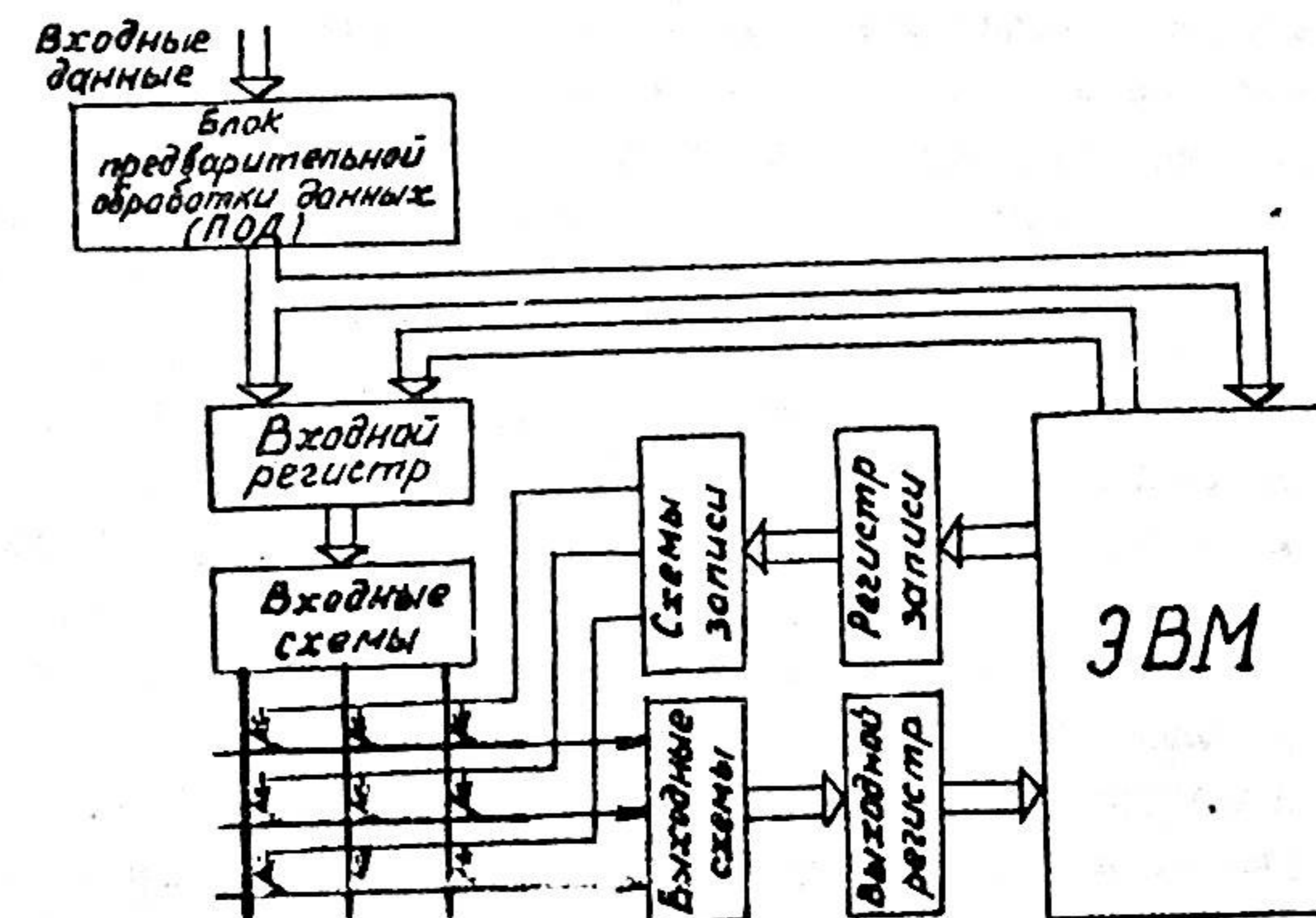
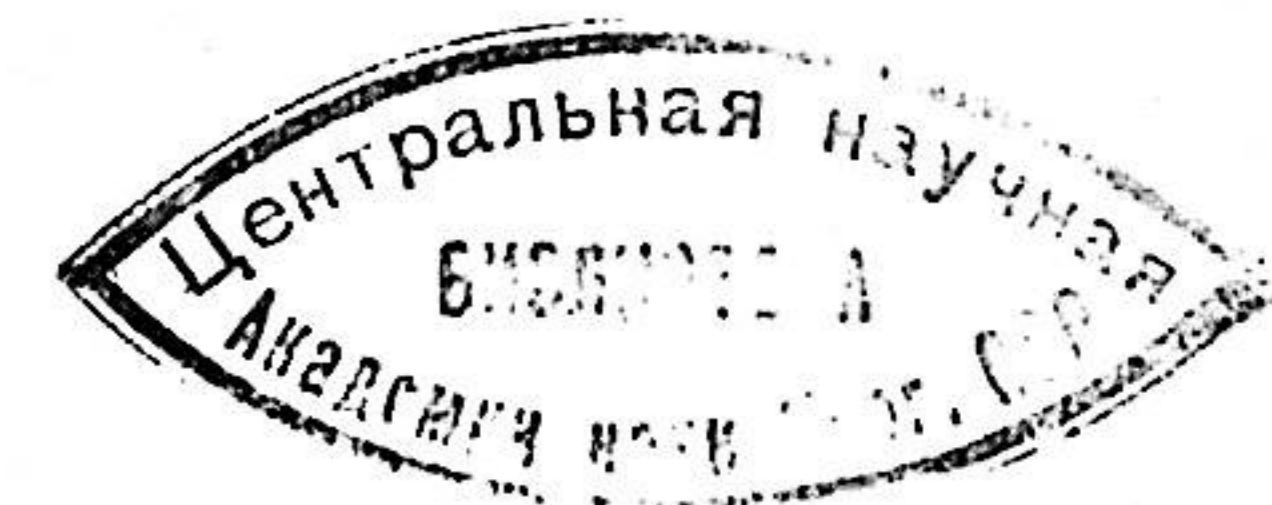


Рис. 2



В блоке ПОД производится выделение эффективных признаков объектов, которые представляют собой входные сигналы для классификатора. Существует целый ряд задач, для решения которых система выделения признаков может быть сделана необучаемой и ориентированной лишь на данный тип входных объектов. Примерами таких задач являются распознавание графических символов, слов речи, радиосигналов определенного типа, интерпретации результатов аэрофотосъемки и некоторые другие. Структура системы выделения признаков находится в результате предварительного анализа проблемы и затем остается неизменной. Настройка всей распознающей системы для работы с любыми конкретными классами объектов данного типа осуществляется посредством обучения адаптивного классификатора. Использование адаптивного классификатора при неизменной системе выделения признаков дополнительно позволяет следующее: вводить для распознавания новые классы объектов того же типа (например, новые графические символы, новые слова); переучивать систему при изменении характеристик объектов (например, при изменении типа печатного шрифта, замене одного диктора другим); последовательно доучивать систему во время ее эксплуатации до постепенного улучшения качества распознавания (в особенности для трудных и малоизученных задач). Кроме того, возможность настройки классификатора позволяет автоматически учесть различия в предполагаемой программной модели распознающей системы и ее аппаратурной реализации. Таким образом, удается снизить требования к точностным характеристикам отдельных блоков распознающего устройства и упростить его изготовление и наладку.

Важно отметить, что линейная классификация, реализуемая с помощью ОМС, является наиболее распространенным методом принятия решения, и, таким образом, использование ОМС в качестве классификатора становится возможным в самых различных задачах, будь то распознавание графических символов или обнаружение целей.

Использование в адаптивной системе универсальной или управляющей ЭВМ позволяет путем программирования увеличить логическую гибкость всей системы и реализовать следующие возможности.

- Обучение матричных структур по алгоритмам, изменяющимся в широком диапазоне.
- Синтез программным путем схемы принятия решения с целью опре-

деления ее оптимальной (или квазиоптимальной) структуры.

- Дополнительная логическая обработка выходных данных классификатора с целью повышения надежности распознавания (контекстный анализ).

- Вариация размеров матрицы адаптивных элементов в пределах ее физического объема.

- Сравнение результатов обучения физической и программной моделей ОМС для выяснения различий в работе реальной и "идеальной" моделей.

Другие важные функции ЭВМ состоят в организации работы всей адаптивной системы, без которой практически невозможно обеспечить ее достаточную эффективность. Более конкретно эти функции заключаются в следующем.

- Организации последовательности работы всех звеньев системы.

- Хранение и многократное воспроизведение входных сигналов весовой матрицы в любой последовательности.

- Контроль за работой отдельных блоков системы, автоматическое отыскание неисправностей.

- Запись процесса работы как всего устройства, так и отдельных его блоков и вывод необходимой информации на печать и экран ЭЛТ, что позволяет анализировать работу системы и оперативно в нее вмешиваться.

Работа системы проходит следующим образом.

Эффективные признаки объектов, выработанные блоком ПОД, подаются на вход классификатора и/или в ЭВМ. Информация, накопленная таким образом в машине, может быть затем многократно и в любой последовательности подана в процессе обучения на вход классификатора. Выходные сигналы ОМС обрабатываются в ЭВМ в соответствии с принятыми алгоритмами обучения, и сигналы адаптации через регистр записи подаются на адаптивные элементы. Настройка АЭ может осуществляться как в режиме "прямой" записи, так и в режиме записи с последовательной коррекцией. Использование тех или иных алгоритмов обучения и режимов настройки достигается соответствующим программированием машины. После обучения ОМС ее выходная информация либо вводится непосредственно в ЭВМ, либо используется для управления внешними объектами.

Разделение системы на быстродействующую вычислительную часть, реализуемую средствами аналоговой техники, и управляющую и логическую часть, использующую программные средства цифровой техники, позволяет решить или уточнить ряд вопросов посредством перебора вариантов. К числу таких вопросов можно отнести: выбор и сравнение между собой различных алгоритмов обучения, выбор структуры и параметров схемы принятия решения, уточнение отдельных характеристик в системе выделения признаков и так далее. Теоретическое решение таких проблем потребовало бы, прежде всего, знания структуры объектов, которая, практически во всех сложных случаях, таких как распознавание рукописных символов или слов речи, известна для указанных целей слишком плохо. Однако, указанные вопросы можно в значительной мере разрешить посредством перебора определенного, хотя и большого числа вариантов в пределах некоторой достаточно хорошо очерченной области. Границы этой области удается установить либо на основании очевидных, интуитивно понятных соображений, либо используя уже имеющийся опыт, либо исходя из некоторых общетеоретических положений. Необходимое для перебора вариантов быстродействие обеспечивает аналоговая техника, обладающая параллельным принципом действия, а возможность изменения самих вариантов — цифровая техника. Для иллюстрации указанных возможностей приведены примеры. Использование для перебора вариантов только одной цифровой техники последовательного действия является в этом случае малоэффективным. На примере задачи распознавания рукописных символов показано, что время расчета только для одного варианта организации системы на ЭВМ типа М-4000 составляет около 400 часов, а при использовании в системе ОМС это время сокращается до одного часа.

Если в результате предварительного исследования проблемы структура системы и все ее параметры определены, и блок принятия решения реализован уже не программными, а аппаратными средствами, то обучающиеся матричные структуры можно использовать в автономном режиме функционирования для обработки информации в реальном масштабе времени. Обращение к ЭВМ теперь происходит достаточно редко, и функции машины сводятся, в основном, к обучению ОМС по фиксированным алгоритмам в случае изменения характеристик объектов или к

дообучению системы для постепенного повышения качества ее работы. Указанные возможности иллюстрируются рядом примеров.

Для исследования возможностей применения рассматриваемых принципов технической реализации ОМС в конкретных задачах была создана экспериментальная система, названная "ОКА" и включающая в свой состав физическую модель ОМС на АЭВГ на 80 входов и 5 выходов и ЭВМ типа БЭСМ-4. Модель ОМС и ЭВМ были соединены между собой каналами двусторонней связи. Выходные сигналы модели вводились в машину с помощью 6-разрядного аналого-цифрового преобразователя. Модель ОМС в экспериментах использовалась для формирования эталонов отдельных символов в задаче распознавания рукописных знаков, алгоритм которого был рассмотрен в работе [4]. Исходные изображения, считанные с помощью фотопреобразователя, вводились с помощью промежуточного носителя информации (перфокарт) в ЭВМ. В функции ЭВМ при этом дополнительно входила предварительная обработка исходных изображений и реализация в программе всех остальных эталонов адаптивного классификатора. Всего в экспериментах использовалось около 1500 знаков, написанных от руки в свободной манере. Примеры изображений, использовавшихся в экспериментах, приведены на рис.3.

А Б В Г Д Е Ж З И К	А Б В Г Д Е Ж З И К
Л М Н О П Р С Т У Ф	Л М Н О П Р С Т У Ф
Х Ц Ч Ш Щ Ъ Ы Э Ю Я	Х Ц Ч Ш Щ Ъ Ы Э Ю Я
1 2 5 6 7 8 9 + - =	1 2 5 6 7 8 9 + - =
L N R S W	L N R S W

Рис.3

Модель ОМС обучалась распознаванию отдельных знаков, от самых легких типа "1" или "Г", до самых трудных, типа "Б" или "В", причем в системе использовалось различное число классов изображений, от пяти до сорока пяти. В экспериментах проводилось сравнение способ-

ностей к обучению реальной физической и "идеальной" программной моделей и исследовалось поведение физической модели при изменении режимов ее работы. Принятие решения в классификаторе производилось путем сравнения ответов матрицы с порогами, которые регулировались в процессе последовательной коррекции весов в соответствии с достигнутыми ответами. Такой метод принятия решения позволил избежать проведения нормировки ответа, которая применялась в исходном варианте алгоритма и требовала трудно реализуемой операции деления. Перед началом обучения все веса классификатора (в том числе и в модели ОМС) устанавливались на нулевой уровень.

В результате экспериментов с системой "ОКА" было установлено следующее,

- Скорость сходимости алгоритмов обучения с последовательной коррекцией весов при использовании реальных АЭ, имеющих переменный шаг коррекции весов не ниже, а в некоторых случаях заметно выше (на 20%-30%), чем при полностью программной реализации.

-Переход от двух сердечников в АЭ к одному и снижение напряжения (в четыре раза) при неизменном токе возбуждения увеличивает взаимное влияние АЭ одного столбца. На скорости сходимости это практически не сказывается.

- Изменение амплитуд импульсов постоянного тока и тока возбуждения на $\pm 25\%$ не нарушает сходимости алгоритмов обучения. Показано, что для увеличения устойчивости работы обученной системы под воздействием изменения условий ее работы целесообразно введение зоны нечувствительности между ответами матрицы и ее порогами. Это позволило, например, изменять напряжения возбуждения на -20% , $+30\%$ без возникновения дополнительных ошибок классификации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Обучающиеся матричные структуры (ОМС) являются эффективным техническим средством для решения задач, связанных с адаптивным подходом. Преимуществами ОМС перед ЭВМ при решении указанных задач являются высокое быстродействие, вследствие параллельного принципа работы, надежность, простота функционального построения, возможность обработки аналоговой информации без предварительного

ее преобразования в цифровую форму.

2. Рассмотрены принципы функциональной организации ОМС и сформулированы основные требования к базовому элементу ОМС - адаптивному элементу (АЭ). В соответствии с этими требованиями произведен выбор типа АЭ, в качестве которого предлагается использовать магнитный адаптивный элемент на второй гармонике (АЭВГ). В настоящее время, АЭВГ, является наиболее простым элементом из выполняемых на основе дискретных компонентов, что имеет первостепенное значение для больших систем (десятки тысяч АЭ) и в то же время, он имеет хорошую перспективу для реализации с помощью прогрессивной тонкопленочной технологии.

3. Неразрушающее считывание в АЭВГ предложено осуществлять токами прямоугольной формы, что позволяет упростить входные схемы ОМС и обеспечивает их удобное сопряжение со стандартными логическими узлами. Рассмотрена теория возникновения второй гармоники при неразрушающем считывании аналоговой информации с тороидальных сердечников токами прямоугольной формы. Показано, что амплитуда второй гармоники пропорциональна остаточному потоку.

4. Проведены подробные экспериментальные исследования процессов неразрушающего считывания и координатной записи в АЭВГ на тороидальных сердечниках. На основании этих исследований даются рекомендации по выбору режимов работы элемента и параметров сердечника. В качестве материалов для сердечников целесообразно использовать пермалловую ленту толщиной 10 или 20 мкм из сплава 50НП при отношении внешнего радиуса сердечника к внутреннему, равном 1,3 + 1,5. Возбуждать сердечники рекомендуется током прямоугольной формы с частотой 100 + 200 кГц. Увеличивать частоту следует только при необходимости повысить быстродействие системы.

5. Разработаны схемы возбуждения для АЭВГ и показано, что такие схемы целесообразно строить на основе индивидуальных генераторов возбуждения на каждый столбец матрицы АЭ. Предложен метод определения напряжений этих генераторов, основанный на учете взаимного влияния элементов одного столбца.

6. Дана оценка быстродействия выходной схемы матрицы АЭ, состоящей из простого резонансного контура, усилителя и фазового детектора со сглаживающим фильтром. Показано, что для достижения мак-

сильного быстрого действия в такой схеме при заданном уровне пульсации на ее выходе постоянные времени резонансного контура и сглаживающего фильтра должны находиться во вполне определенных соотношениях. Даны рекомендации по повышению быстродействия выходных схем.

7. Предложены и реализованы принципы построения и обучения ОМС на АЭВГ для случая аналоговых входных сигналов, основанные на непрерывной фазовой модуляции токов возбуждения. Отличительной чертой таких ОМС является наличие на каждом входе матрицы фазосдвигающих устройств (ФСУ). Разработана схема ФСУ, работающего на принципе сравнения входного напряжения с напряжением развертки, и дана оценка погрешности работы такого устройства.

8. Для реализации электронных схем ОМС могут быть широко использованы существующие типы интегральных схем.

9. Рассмотрена структура распознающей системы, основными узлами которой являются блок предварительной обработки данных и адаптивный линейный классификатор, выполненный на основе ОМС и являющийся наиболее распространенным типом классификаторов. Вся система работает совместно с ЭВМ, выполняющей функции общего управления дополнительной логической обработкой данных и обучения классификатора с использованием накопления необходимой для этой информации. Показана эффективность применения такой системы как на этапе исследования для определения структуры и параметров отдельных узлов системы посредством перебора большого числа вариантов, так и при автономной работе ОМС в реальном масштабе времени, когда обращение к ЭВМ происходит лишь при изменении условий функционирования системы.

10. Разработана и создана система "ОКА" для экспериментального исследования возможностей ОМС при решении конкретных задач. Такая система состоит из модели ОМС, включающей 400 АЭВГ, и универсальной ЭВМ типа БЭСМ-4, соединенной с моделью каналами двусторонней связи.

11. Проведены экспериментальные исследования с системой "ОКА" для выяснения возможностей ОМС на основе АЭВГ как адаптивного классификатора в задаче распознавания рукописных символов. Модель ОМС при этом использовалась для формирования эталонов от-

дельных различных символов. Скорость сходимости при замене "идеальной" программной модели реальной физической во всех случаях не понижались. Было установлено, что исключение из схемы АЭ второго сердечника и изменение режимов работы устройства в широких пределах не нарушает устойчивости его работы. Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод, что рассматриваемые технические принципы построения ОМС могут быть успешно использованы в системах распознавания сложных зрительных изображений.

Результаты, полученные в диссертационной работе, предполагается использовать при создании автомата параллельного действия, предназначенного для чтения многошрифтовых печатных и рукописных символов.

Основные результаты работы докладывались на XIII (1970, Минск) и XIV (1972 г. Москва) Всесоюзных совещаниях по магнитным элементам автоматички и вычислительной техники, на I (1969 г., Москва) и II (1972 г., Владимир) Всесоюзных семинарах по аналоговым запоминающим и адаптивным элементам, на II Юбилейной конференции молодых специалистов ИНЭУМ (1970 г.), на XXI научно-технической конференции МИРЭА (1972 г.) и отражены в работах:

1. Боярченко М.А., Мазо Б.Л., Раев В.К., Шорыгин А.П. Аналоговые запоминающие и адаптивные элементы. М., "Энергия", 1973. (В печати).

2. Боярченко М.А., Гостев В.А., Мазо Б.Л., Раев В.К. Некоторые пути целесообразного применения адаптивных элементов и устройств. Доклад 2-го Всесоюзного семинара "Адаптивные и аналоговые запоминающие устройства". ВЗПИ. Депонир. в ЦНИИТЭИприборостроения. Вып. № 76, 13 сент. 1972.

3. Боярченко М.А., Мазо Б.Л., Потапов В.С., Раев В.К. Опыт применения в обучении шихся матричных структурах магнитных адаптивных элементов с выходом на удвоенной частоте возбуждения. Приборы и системы управления, 1972, № 3.

4. Боярченко М.А., Мазо Б.Л., Потапов В.К., Раев В.К., Шотов А.Е. Вопросы технической реализации обучаемой матричной структуры на основе магнитных весовых элементов на тороидальных сердечниках. Тезисы докладов XIII Всесоюзного совещания по магнит-

ным элементам автоматки и вычислительной техники. Минск, 1970.

5. Боярченко М.А., Мазо Б.Л. Характеристики магнитного адаптивного элемента с выходом на удвоенной частоте возбуждения, В сб. "Технические средства для адаптивной переработки информации и аналоговые запоминающие устройства". Изд. ИНЭУМ, М., 1969.

6. Мазо Б.Л. Характеристики неразрушающего считывания в элементах аналоговой памяти на тороидальных сердечниках. В сб. "Системы управления и вычислительная техника". Труды ИНЭУМ, Вып. 17, 1972.

7. Боярченко М.А., Мазо Б.Л. Обучающаяся матричная структура на магнитных адаптивных элементах, работающая совместно с ЭВМ. Рефераты докладов. XIV Всесоюзное совещание по магнитным элементам автоматки и вычислительной техники. М., "Наука", 1972.

8. Мазо Б.Л. "ОКА" - система для экспериментального исследования обучающегося классификатора на адаптивных элементах. Методы системного проектирования в НТИ. М., ВИНТИ, 1973 (в печати).

9. Зенкин Г.М., Мазо Б.Л., Петров А.П. Эксперименты с системой "ОКА" по распознаванию рукописных символов. Методы системного проектирования в НТИ. М., ВИНТИ, 1973 (в печати).

10. Мазо Б.Л., Потапов В.С. Адаптивное матричное устройство. Авт. свид. № 373775 с приоритетом от 27 февр. 1971 г.

11. Мазо Б.Л. Механизм возникновения второй гармоники в элементах аналоговой памяти при считывании информации токами прямоугольной формы. В сб. "Логические и запоминающие устройства на магнитных кристаллах". Труды ИНЭУМ, Вып. 21, 1973.

12. Боярченко М.А., Мазо Б.Л., Потапов В.С., Раев В.К. Вопросы построения специализированных адаптивных автоматов с параллельным вводом и переработкой информации на основе магнитных адаптивных элементов. В сб. "Вычислительная техника и системы управления." Изд. ИНЭУМ, М., 1970.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Цылкин И.З. Адаптация и обучение в автоматических системах ; М., "Наука", 1968.

2. Nagy G. Adaptive Devices and Systems. Electro-Technology. V.77, April 1966.

3. Вонсовский С.В., Щур Я.С. Ферромагнетизм, ОИЯЗ, 1948.

4. Петров А.П., Зенкин Г.М. Модель зрительного анализатора и эксперименты по узнаванию изображений. Сб. "Модели нейронных структур". М., "Наука", 1970.

Д-96674.

Зак.325.

Тираж 150 экз.

Ротапринт ИИЭУМ. Бесплатно.