



Центр стратегических оценок и прогнозов

www.csef.ru

Состояние и перспективы исследований в области создания нейроподобных сетей

Аналитический доклад

Москва - 2008

Содержание

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВАРИАНТОВ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЙРОПОДОБНЫХ СЕТЕЙ.....	3
2. СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НПС.....	4
2.1 Обзор зарубежных достижений аппаратной реализации НПС	4
2.2 Обзор отечественных достижений аппаратной реализации НПС.....	7
2.3 Обобщенные оценки современных возможностей аппаратной реализации НПС	10
3. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НПС	11
4. ВЫВОДЫ	12
ЛИТЕРАТУРА.....	14

1. Классификация вариантов реализации нейроподобных сетей

Нейроподобные сети могут быть реализованы как программно в традиционном алгоритмическом базисе, так и структурно (аппаратно) в некотором элементном базисе. Варианты реализации НПС могут быть классифицированы по следующим основаниям:

- по способу реализации (аппаратном, программном, программно-аппаратном);
- по типу представления и обработки информации (аналоговые, цифровые);
- по возможности переобучения (дообучения) НПС (адаптивные, неадаптивные);
- по физико-техническим принципам, лежащим в основе передачи и преобразования информации (электронные, оптоэлектронные, оптические);
- по уровню интеграции элементарных физических приборов в конструктивном элементе (малый, средний, большой, сверхбольшой).

В настоящее время известны следующие направления реализации НПС:

- программная реализация на цифровых ЭВМ традиционной архитектуры;
- аппаратная реализация на аналоговой ЭВМ;
- программная реализация на цифровых высокопараллельных ЭВМ;
- программно-аппаратная реализация на цифровой ЭВМ с архитектурой “универсальный процессор + специализированный процессор” (специализированный процессор ориентирован на быстрое выполнение операций нейронных преобразований);
- аппаратная реализация на цифровой элементной базе;
- аппаратная реализация на аналоговой элементной базе.

Исторически первые варианты реализации НПС относятся к первым двум указанным направлениям. Первое направление характеризуется универсальностью, дешевизной и низкой скоростью обучения и функционирования НПС. Для второго направления характерна высокая скорость моделирования функционирования НПС, но имеются серьезные физические ограничения по числу моделируемых элементов и связей между ними, и по возможностям обучения и дообучения. По мере развития элементной базы ЭВМ возникли и стали развиваться, как относительно самостоятельные, остальные из указанных выше направлений реализации НПС. Следует отметить, что между этими направлениями существует тесная взаимосвязь, которая объясняется следующими фактами.

1. Большинство цифровых высокопараллельных ЭВМ имеют многопроцессорную архитектуру и ориентированы на быстрое выполнение векторных и матричных операций; при этом на них могут выполняться и “обычные” программы. То есть, с точки зрения программиста, их архитектура может быть представлена в виде “универсальный процессор + несколько специализированных процессоров”.

2. Одной из базисных операций, которые реализуются нейроподобными элементами, является скалярное произведение векторов, что обязательно учитывается при разработке специализированных процессоров в рамках четвертого направления.

3. При аппаратной реализации НПС на цифровой и аналоговой элементной базе разрабатывается устройство обработки информации, которое с позиций системотехника можно назвать специализированным процессором, которое требуется интегрировать в систему обработки информации, обычно уже содержащую универсальную ЭВМ.

Вместе с тем, отличия в направлениях реализации во многом связаны с используемой элементной базой и полнотой учета специфики НПС в структуре аппаратных средств. Последнее имеет решающее значение, поскольку только учет особенностей реализуемых вычислений позволяет получить оптимизированные схемотехнические решения, которые воплощаются на различных уровнях аппаратурной реализации НПС. Будем различать два уровня аппаратурной реализации:

- 1) элементный;
- 2) системный.

На элементном уровне рассматривается структура интегральной схемы (конструктивного элемента). На системном уровне рассматривается структура связей конструктивных элементов. По мере повышения уровня интеграции элементной базы, все более функционально сложные схемотехнические решения по реализации НПС будут воплощаться на элементном уровне.

Рассмотрим подробнее современные возможности аппаратной реализации НПС и элементную базу, которая используется для реализации НПС. Отметим, что для программно-аппаратных реализаций НПС широко используется термин нейрокомпьютер (НК). В дальнейшем будем рассматривать только нейрокомпьютеры, построенные на микроэлектронной элементной базе, так как реализация практически значимых НПС на другой элементной базе рассматривается как перспективное направление.

2. Современные возможности аппаратной реализации НПС

Целью аппаратной реализации НПС является достижение предельных скоростей обучения и функционирования сетей. Чаще всего скорость моделирования НПС измеряется в числе переключения связей за секунду, что в алгоритмическом смысле близко к числу выполнения операций умножения в секунду. Скорость моделирования НПС зависит не только от характеристик элементной базы и принятых схемотехнических решений, но и от характеристик моделируемой НПС. К таким характеристикам НПС в первую очередь относят:

- число нейронов;
- число связей;
- разрядность синаптических коэффициентов и входных сигналов;
- вид активационной функции.

Поэтому для корректного сравнения различных реализаций НПС требуется использование сопоставимых (эталонных) НПС или разработка специальной методики оценки производительности нейрокомпьютеров различной архитектуры. Вместе с тем, имеющиеся сведения о реализациях НПС зачастую плохо сопоставимы из-за различий в моделируемых НПС, а методика сравнения нейрокомпьютеров в подобных условиях еще не разработана. После этих вводных замечаний перейдем к обзору зарубежных и отечественных достижений в области аппаратной реализации НПС.

2.1 Обзор зарубежных достижений аппаратной реализации НПС

Анализ зарубежной научно-технической литературы в области перспективных средств обработки информации, использующих элементы искусственного интеллекта (ИИ), свидетельствует о дальнейшем развитии исследований и разработок, направленных на создание и

аппаратное внедрение нейроподобных сетей. Данную ситуацию можно объяснить двумя объективными причинами. Во-первых, проведенные по широкому фронту исследования обнаружили ряд практических областей, в которых применение нейроинтеллекта позволяет получить эффективные результаты даже при условии программной реализации НПС на базе традиционной вычислительной техники. Во-вторых, успехи в области цифровой и аналоговой микроэлектроники обеспечили реальность создания нейрочипов, позволяющих в полном объеме реализовать возможности параллельной и распределенной обработки информации, характерных для НПС.

Компания Loral Space Information System развивает нейроэмулятор собственной разработки NET (Neural Emulation Tool), который используется в качестве ускорителя персональной вычислительной техники. Эмулятор выполнен в двух модификациях - сопроцессора и памяти. NET - процессор содержит четыре 32-разрядных чипа сигнальных процессоров с плавающей точкой TMS 320C30 компании Texas Instruments. В нем реализованы различные нейросетевые парадигмы. NET - память выполнена на одном чипе [15].

Характерный пример реализации НПС на современной мультипроцессорной ЭВМ описан в работе [12]. На транспьютерной ЭВМ Computing Surface была реализована многослойная НПС, обучающаяся по методу обратного распространения ошибки. ЭВМ содержала 32 транспьютера с 4 Мбайт памяти в каждом узле. При реализации НПС обеспечивалось равномерное распределение нейронов по транспьютерным узлам с обеспечением симметрии связей. В результате удалось получить скорость моделирования трехслойной НПС до 1,8 млн. переключений связей/с при общем числе нейронов до 5040, а связей - до 5 644 800.

В работе [13] описывается реализация трехслойной НПС с 256 нейронами и 131072 связями на специализированном клеточном процессоре ААР-2 фирмы NTT. Процессор ААР-2 содержит 65536 процессорных элементов. Каждый процессорный элемент представляет собой совокупность одноканального АЛУ, 144-битного регистрового файла и 8 Кбит локальной памяти. При обучении НПС была показана скорость 18 млн. переключений связей/с, что в 45 раз быстрее, чем на высокопроизводительной универсальной ЭВМ IBM-3090. Следует отметить, что размер моделируемой сети был ограничен объемом локальной памяти.

Фирмой Intel совместно с фирмой Nestor разработана СБИС NI1000 [14], которая ориентирована на решение задач распознавания на основе вероятностных НПС и НПС, реализующих алгоритмы окон Парзена. СБИС позволяет проводить распознавание со скоростью 40 тыс. образов/с при тактовой частоте 40 МГц или 20 млрд. коротких операций с 5 битными данными в секунду и 160 млн. операций с запятой/с. Образ представляется вектором с размерностью до 256 и разрядностью элемента вектора 5 бит. Характеристики этого нейрочипа в настоящее время являются рекордными в данном классе реализаций НПС.

Американской фирмой Intel разработан и серийно выпускается специализированный аналоговый нейрочип ETANN (80170NX) [2]. Он представляет собой электрически перепрограммируемую аналоговую НПС, со средствами для программирования весовых коэффициентов и других параметров. Микросхема смонтирована на 208-выводном корпусе типа PGA. Основной прирост производительности обеспечивается за счет применения параллельного аналогового перемножения входных сигналов на весовые коэффициенты НПС. Максимальная производительность достигается при реализации НПС с прямым распространением сигналов - 2 млн. связей/с.

От аналогичных разработок ETANN отличается законченностью архитектуры НПС достаточно большого размера, реализуемой одной микросхемой, и частичной реализацией алгоритма ее обучения. Все эти три основных составляющих обеспечивают нейрочипу широкий спектр применения в различных областях. Применение ЭППЗУ (СНМОС) технологии в НЧ обеспечивает высокую его производительность, малое энергопотребление, длительное

хранение весовых коэффициентов без существенного изменения параметров НПС и широкий диапазон применения.

Рассмотрим архитектуру нейрочипа. Внутри аналогового НЧ 80170NX размещены 64 аналоговых нейрона-сумматора. На входе и выходе НЧ расположены матрицы синаптических элементов размерностью 80 x 60. Они обеспечивают умножение входных сигналов НПС на хранящиеся весовые коэффициенты. Максимальная размерность НПС, реализуемая отдельным кристаллом равна 64. Максимально возможное число входных сигналов в этой сети - 128 на один нейрон. Матрицы 14 x 64 используются для задания начальных смещений нейронов. Нейрочип имеет встроенные средства для реализации некоторых алгоритмов обучения. Возможно использование НЧ для обработки цифровых сигналов в смешанной среде.

Корпорация Formulab Neuronetics (Уэст-Перт, Австралия) разработала нейрокомпьютер, быстродействие которого значительно выше, чем у существующих персональных компьютеров (ПК)[3]. Благодаря интуитивному визуальному интерфейсу, программирование для новой машины (Richter Paradigm Computer), моделирующей деятельность мозга и обучаемой пользователем, осуществляется просто и быстро.

Компьютер, содержащий 896 RISC-процессоров, выполняет приложения, основанные на технологии нейронной сети, в 180 раз быстрее, чем машина на базе процессора Pentium/166. В компьютере применены новые объектно-специфические архитектура и система адресации, обеспечивающие повышение скорости, гибкости и отказоустойчивости системы.

Вместе с компьютером разработано программное обеспечение (ПО) Richter Paradigm View, позволяющее создавать программы, просто соединяя ячейки на экране дисплея. Действия по написанию программы моделируют процесс принятия решения, происходящий в биологическом мозге. При этом может быть учтена вся необходимая информация, даже если некоторые данные неполны или отсутствуют, а также противоречивы и неясны.

Поскольку Richter Paradigm Computer может быть адаптирован к решению в реальном времени множества разнообразных задач, он представляет собой нечто большее, чем экспертная система или нейросеть. Систему можно расширять, наращивая число процессоров.

Важным компонентом новой технологии является плата Richter Paradigm Neurocard. Если ее установить в ПК или подсоединить его к внешнему порту, ПК превратится в настоящую “думающую” машину.

Руководство корпорации уверено, что благодаря невысокой стартовой цене:

- Richter Paradigm Computer - 3 тыс. долларов;
- платы Richter Paradigm View - 300 долларов;
- ПО Richter Paradigm Neurocard - 90 долларов;
- новая, способная “мыслить” машина (на разработку которой ушло более 14 лет) будет пользоваться значительным спросом.

Компания Formulab Neuronetics планирует выпуск на базе новой архитектуры суперкомпьютера, в котором будет задействовано 6 тыс. процессоров и специальная операционная система (ОС), способная расчленять вычислительную задачу на отдельные задания, а затем объединять полученные результаты. Разрабатывается также плата расширения для ПК, которая, изучив стиль работы пользователя, сможет помогать ему при общении с компьютером. Помимо того, компания исследует возможность встраивания усеченного варианта новой технологии в разнообразную радиоэлектронную технику. Компания Formulab Neuronetics намерена продавать лицензии на данную технологию другим фирмам. В течение 1997 года ожидается выпуск новых видов продукции.

Одна из последних разработок фирмы Siemens Nixdorf - специализированный компьютер Synaps1, который разработчики слишком смело назвали НК [4]. За счет масштабируемой мультипроцессорной архитектуры, архитектуры памяти, использования сигнальных процессоров, выполняющих наиболее интенсивные вычислительные операции, разработчикам удалось добиться производительности компьютера, равной нескольким миллиардам соединений (умножений и сложений) в секунду. Благодаря этим аспектам, становится возможной реализация большого спектра приложений, выходящих за рамки классических информационных технологий, включая моделирование деятельности мозга и органов чувств человека, решение комплексных вопросов оптимизации и управления, разработку самообучаемых и экспертных систем, то есть тех задач, которые составляют проблематику современной теории НПС.

Ориентация аппаратных и инструментальных программных средств Synaps1 на решение задач в нейросетевом исполнении, а так же архитектурная способность к наращиванию мощности и подключению внешних устройств “очувствления”, позволяют выделить эту вычислительную систему в отдельный класс специализированных вычислительных систем, подготовленных к быстрому прототипированию любых, даже самых сложных НПС, тестированию концепций и созданию нейроимитаций, доведению разработок до готового коммерческого продукта.

Приведенные сведения подтверждают реальность создания нейрокомпьютерных средств уже сегодня на базе интегральной цифровой микроэлектроники, что дает дополнительный стимул развития теоретических исследований, направленных на поиск решений широкого круга практических задач на основе нейросетевых парадигм вычислений.

2.2 Обзор отечественных достижений аппаратной реализации НПС

В настоящее время сложился ряд отечественных школ, занимающихся исследованиями в области искусственных нейронных сетей (ИНС) и имеющих значительный научно-технический потенциал:

- НЦН РАН (Галушкин А.И., Москва);
- Группа “НейроКомп” СО РАН (Горбань А.Н., Новосибирск);
- НТЦ “Модуль” и МАК “Вымпел” (Яфракков М.Ф., Москва);
- Лаборатория нейроинформатики СПИИРАН (Тимофеев А.В., Санкт-Петербург);
- Отделение “Нейронные сети, нейроматематика, нейрокомпьютеры” Международной Академии информатизации (Дунин-Барковский В.Л., Москва);
- НИ ВЦ РАН (Пушино);
- ЦНПО “Комета”(Москва);
- НИИ эволюционной морфологии РАМН (Санкт-Петербург);
- Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН (Москва);
- ВЦ РАН (Москва);
- НИИ многопроцессорных вычислительных систем (Таганрог);
- Институт прикладной физики РАН (Н-Новгород);
- НИИ нейрокибернетики РГУ (Ростов-на-Дону);
- Институт проблем управления РАН и другие.

Ежегодно проводятся конференции и симпозиумы, на которых докладывают о последних достижениях в области нейрокомпьютинга по основным направлениям развития и применения НК:

- нейрокомпьютеры общего назначения;
- нейрокомпьютеры для обработки изображений;
- нейрокомпьютеры для обработки сигналов;
- нейрокомпьютеры для управления динамическими системами;
- нейрокомпьютеры в финансовой деятельности;
- элементная база нейрокомпьютеров;
- перспективные технологии нейрокомпьютеров;
- теория нейронных сетей;
- нейрокомпьютеры в информационных и экспертных системах;
- нейрокомпьютеры и мягкие вычисления;
- нейробиологические модели нейронных сетей.

Научным центром нейрокомпьютеров (НЦН), Казанским авиационным институтом и НПО “Квант” разработан НК “Геркулес” с программно-аппаратной реализацией НПС, оценке производительности которого посвящена работа [5]. При построении нейрокомпьютера на базе транспьютерной СБИС T414 и специализированного конвейерного вычислителя, построенного на микросхеме КР 180ВРЗ. В работе показано, что пиковая скорость может достигать 16 млн. переключений связей/с при общем числе нейронов 2000 и числе связей 512000.

В работе [6] описываются принципы построения платы ускорителя нейровычислений на основе СБИС TMS320C40. Плата содержит 5 Мбайт быстрой памяти и обеспечивает до 1100 млн. коротких операций/с и 200 млн. операций с плавающей запятой/с. Характеристики скорости моделирования НПС в работе не приводятся, но, используя методику [5], можно получить оценку, что пиковая скорость составляет 200 млн. переключений связей/с, хотя более реалистичной, на наш взгляд, является оценка в два раза меньшая по величине.

В НЦН при активном содействии НПО “Квант” и НИИ Молекулярной физики на базе Базового матричного кристалла (БМК) “Исполин-60Т” созданы два цифровых нейрочипа (НЧ): НЧ1 и НЧ2, и в стадии опытно-конструкторских разработок (ОКР) находится аналогово-цифровой НЧ3 [7].

Базовый матричный кристалл “Исполин-60Т” на основе комплиментарных металл-окисел-проводник(КМОП) транзисторов предназначен для создания в сжатые сроки быстродействующих СБИС широкой номенклатуры для применения в высокопроизводительной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА). Он является БМК нового поколения и обеспечивает заданные технические характеристики (ТХ) при $U_{пит} = 4,5-5,5$ В в диапазоне температур от -30 до +85 градусов С.

Отличительными особенностями и достоинствами БМК “Исполин-60Т” являются:

1. Высокая степень интеграции - 60000 эквивалентных вентилях типа 2И-НЕ.
2. Высокое быстродействие ($t_3 < 1$ нс, $F_{такт} > 100$ МГц).
3. Низкая потребляемая мощность элементов (5 мкВт/вент/МГц).

4. Высокоэффективное использование площади кристалла (850 вент/мм^2) за счет применения структуры типа “море транзисторов”, трех программируемых слоев коммутации, “интеллектуальной” САПР.

5. Развитая библиотека матричных элементов, оптимизированная для вычислений и РЭА.

6. Развитая библиотека периферийных элементов для работы с КМОП и ТТЛ микросхемах.

7. Наличие программируемых встроенных на кристалле резисторов “привязки” и зарядки магистралей.

8. Программируемые уровни выходных токов (от 1 до 12 мА).

9. Симметрия выходных характеристик по верхнему и нижнему уровням, обеспечивающая возможность работы на согласованных линиях связи.

10. Возможность создания комбинированных БИС, содержащих логические элементы и память (ОЗУ, ПЗУ).

11. Возможность создания БИС, реализующих цифровые и аналогово-цифровые функции.

12. Возможность расширения библиотеки элементов.

Базовый матричный кристалл “Исполин-60Т” изготавливается по современной 1,5 мкм КМОП технологии с двухслойной металлизацией и имеет размеры 9,3 x 9,7 мм. Внутренняя часть кристалла обеспечивает степень интеграции (ресурс кристалла), примерно равный 60 эквивалентных вентилях (типа 2И-НЕ или 2ИЛИ-НЕ), доступных для разводки. Количество внешних контактных площадок равно 188, восемь из которых предназначены для обеспечения питания, а 180 могут быть как сигнальными (входными, выходными, двунаправленными), так и использоваться для подведения питания. Базовый матричный кристалл “Исполин-60Т” упаковывается в корпуса с числом вводов от 64 до 208.

Проектирование БМК “Исполин-60Т” производится с помощью САПР НПО “Квант”, которая настроена на конструкцию и библиотеку элементов БМК, насчитывающую более 50 элементов.

Первая отечественная СБИС “Нейрочип” на основе БМК “Исполин-60Т” обеспечивает быстрое и эффективное выполнение базовых операций нейросетевого базиса (умножение, суммирование взвешенных сигналов и пороговое преобразование взвешенной суммы в выходной сигнал) и предусматривает возможность каскадирования, что позволяет строить НПС различной конфигурации [7].

Приведем основные технические характеристики СБИС “Нейрочип”:

1. Тактовая частота $F_{\text{такт}} = 20 \text{ МГц}$.
2. Потребляемая мощность $P_{\text{потр}} = 1,1 \text{ Вт}$.
3. Число логических выводов - 117.
4. Напряжение питания $U_{\text{пит}} = 5 \text{ В} + 10\%$.
5. Диапазон температур от -30 до +85 градусов С.
6. Степень интеграции 24000 вентилях.

СБИС “Нейрочип” содержит следующие блоки:

Четыре однотипных устройства “Нейрон”, выполняющих операции умножения и суммирования 8-разрядных чисел, представленных в дополнительном коде, а также преобразующих результаты вычислений в пороговую функцию сигнум.

Восемь 8-разрядных регистров входных данных.

Мультиплексор весовых коэффициентов.

Входной мультиплексор контроля.

Выходной мультиплексор.

Узел управления синхронизацией.

Восемь 8-разрядных входов, на которые подаются входные сигналы.

Четыре 8-разрядных выхода.

Четыре 1-разрядных входов, на которые подаются сигналы весовых коэффициентов.

Шесть 1-разрядных входов, на которые подаются сигналы управления режимами работы.

Пять 1-разрядных входов, на которые подаются сигналы управления синхронизацией.

Один 1-разрядный вход, на который подаются сигналы синхронизации.

Четыре 1-разрядных выхода, через которые выдаются результаты контроля.

Таким образом, НЧ реализует свертку сигнала и хранение информации. А его каскадируемость позволяет синтезировать НПС с большим числом нейронов и синаптических связей.

Необходимо отметить, что организация и направленность проводимых в России исследований показывает высокий уровень теоретических работ и экспериментальных исследований по нейросистемам и нейроинформатике. Как следствие, в ближайшее время следует ожидать новых технологических прорывов в области аппаратной реализации НПС.

2.3 Обобщенные оценки современных возможностей аппаратной реализации НПС

Проведенный анализ позволил получить следующие обобщенные оценки современных возможностей аппаратной реализации НПС:

- число моделируемых нейронов - до 5 млн.;
- число моделируемых связей - до 5 млн.;
- скорость моделирования - до 500 млн. переключений связей/с.

Отметим, что на современном этапе при аппаратной реализации НПС придерживаются следующей технологии:

- распараллелить нейровычисления на низком уровне;
- ориентировать операционные элементы на выполнение базовой процедуры нейровычислений (умножение чисел с накоплением);
- эффективно использовать локальную память для хранения параметров НПС;
- эффективно использовать каналы межпроцессорной связи при передаче сигналов по моделируемой сети;

- сбалансировать быстродействие операционных элементов, каналов связи и локальной памяти для уменьшения простоев и исключения перегрузки выполнения нейровычислений;
- обеспечивать простоту наращиваемости возможностей по моделированию НПС.

При этом основными трудностями реализации НПС являются:

- полиномиальный рост числа синаптических связей при линейном росте числа нейронов в моделируемой сети;
- большая размерность НПС, которые необходимы для решения практически значимых задач обработки сигналов и изображений.

Для аппаратной реализации НПС в настоящее время широко используют процессорные СБИС, обладающие максимальными коммуникационными возможностями и ориентированными на быстрое выполнение векторных операций. К таким СБИС относятся транспьютеры фирмы NMOS (T414, T800, A100), сигнальные процессоры фирм Texas Instruments (TMS 320C40, TMS 320C80), Motorola, Analog Device. Отечественная элементная база представлена нейрочипами на базе БМК “Исполин-60Т” НЧ1 и НЧ2. Другим классом СБИС, который эффективно может быть использован для реализации НПС с небольшим числом и только локальных связей являются систолические процессоры.

3. Перспективные направления исследований в области аппаратной реализации НПС

Реализация НПС на СБИС в виде специализированных структур является одним из самых перспективных направлений аппаратной реализации НПС. При этом наиболее актуальными направлениями исследований являются следующие:

- разработка моделей и методик оценки быстродействия и структурной сложности аппаратной реализации НПС;
- развитие методов параметрической оптимизации вычислительных структур, ориентированных на реализацию НПС;
- разработка методов оптимального покрытия НПС базовыми структурными единицами;
- развитие методов оценки надежности аппаратных реализаций НПС;
- развитие технологии и средств программирования и проектирования реализаций НПС.

Единственной технологией аппаратной реализации НПС, способной в будущем прийти на смену оптике и оптоэлектронике, является нанотехнология, основанная на молекулярной сборке квантовой элементной базы (квантовых полевых транзисторов, резонансно-туннельных диодов, одномерных квантовых приводов, квантовых точек и т.п.) с помощью модернизированного сканирующего туннельного микроскопа (СТМ)[8].

Нанотехнология способна обеспечить не только физически предельно возможную степень интеграции субмолекулярных квантовых элементов (СМКЭ, размеры 1...10 нм, а межатомные расстояния 0,3...0,5 нм) с физически предельно возможным быстродействием ($f_{\text{такт}}=10...100$ ТГц), но и столь необходимую для аппаратной реализации НПС трехмерную архитектуру.

Нанотехнология сборки СМКЭ с помощью модернизированного СТМ не является интегральной технологией. СМКЭ будут собираться зондом СТМ ($f_{\text{такт}} = 1$ МГц) последовательно, один за другим, и тут же тестироваться. Если изготавливаемый СМКЭ получился неудовлетворительным, его тут же можно разобрать, сделать заново и снова протестировать. Таким образом можно обеспечить 100 % выход годных изделий.

Нарастив на подножку один двухмерный слой СМКЭ аппаратно реализующих двухмерную матрицу входов или нейронов, можно его замаскировать и вырастить второй двухмерный слой СМКЭ аппаратно реализующих двухмерную матрицу нейронов. При выращивании маскирующего слоя можно встроить в него четырехмерную систему одномерных квантовых приводов, аппаратно реализующих четырехмерную систему синапсов с весовыми коэффициентами. Одномерные квантовые приводы слишком тонки (1..3 нм), чтобы мешать друг другу в трехмерной толще маскирующего слоя. Повторяя описанные выше операции, можно вырастить трехмерное устройство, аппаратно реализующее многослойную НПС с двухмерными матрицами входов и выходов.

Нанотехнологию безусловно можно назвать абсолютной, конечной технологией, которая отражает значительное влияние на другие технологии, а возможно и вытеснит их. Однако, субмолекулярная квантовая элементная база только создается. Большим успехом считается создание примитивных СМКЭ, способных не деградировать в течении первых трех часов после создания. Во время эксперимента, в феврале 1996 года, квантовый полевой нанотранзистор сохранял (без деградации) свои вольтамперные характеристики (ВАХ) в течении трех недель. На весну 1996 года это самое значительное отечественное достижение. Информации из-за границы не поступает - там идут грандиозные, но закрытые работы. Промышленная технология изготовления наносхем и системы автоматического проектирования (САПР) находятся в стадии опытно-конструкторских разработок.

Значительным достижением отечественной нанотехнологии является “Нанотехнологический комплекс 500”, разработанный НИИ Микроэлектроники и Нанотехнологии “Дельта” и предназначенный для проведения нанотехнологических процессов и измерения характеристик поверхности.

Выполнение данной задачи обеспечивается использованием пьезоманипуляторов нового типа, сочетающих большой диапазон перемещения и высокую механическую жесткость конструкции. Управление комплексом (сканированием, литографией, спектроскопией) осуществляется специальной аналого-цифровой системой со встроенным сигнальным процессором.

Важнейшей характеристикой комплекса является возможность управления составом газов в технологическом модуле и осуществление локально-стимулированных химических реакций, протекающих при увеличении напряжения между образцом и зондом. Отличительной особенностью комплекса является возможность дистанционного управления не только быстродействующим и широкодиапазонным плавным сканированием, но и пошаговым перемещением образца и зонда друг относительно друга независимо по трем координатам в диапазоне до 10 миллиметров.

По прогнозам специалистов, нанотехнология будет развиваться значительно быстрее, чем развивалась полупроводниковая электроника и кардинально изменит технологию аппаратной реализации нейрочипов [8].

4. Выводы

Роль технологий микроэлектроники в развитии архитектуры ЭВМ является очевидной. Более того, именно развитие технологии порождает новые архитектуры вычислительных машин. Так было и в середине 70-х годов, когда появление СИС породило ЭВМ с архитекту-

рой SIMD, и в начале 80-х годов, когда развитие БИС породило транспьютер (TP) и ЭВМ с архитектурой MIMD.

Именно развитие технологии микроэлектроники сделало реальным активное развитие тематики НК во второй половине 80-х годов. Подобно тому, как TP объективно мог появиться только тогда, когда реально технологически стало возможным изготовление в одном кристалле 32-разрядного микропроцессора, внутрикристалльной памяти и канальных адаптеров, НК стали активно развиваться после того, как в одном кристалле стала возможной аппаратная реализация каскадируемого фрагмента НПС с настраиваемыми и фиксированными коэффициентами.

Развитие элементной базы широкого применения связано с двумя направлениями развития вычислительной техники:

- рабочие станции;
- сверхвысокопроизводительные ЭВМ с массовым параллелизмом.

Сверхпроизводительные ЭВМ занимают особое место в военных системах. Они решают ряд сложных и сверхсложных задач в стационарных и бортовых условиях и в значительной степени определяют технический уровень той техники военного и гражданского применения, в которой используются.

Два основных направления развития архитектуры и элементной базы суперЭВМ с массовым параллелизмом связаны с наличием транспьютерного ядра для реализации первого уровня распараллеливания (Т800 или Т9000).

На первом пути второй уровень распараллеливания практически отсутствует. Реализация второго слоя вычислительной системы (если первый транспьютерный) связана с применением универсальных микропроцессоров с различной производительностью (i860, Power PC, Альфа, Р6).

Второй путь связан с реализацией на втором уровне собственной вычислительной структуры с массовым параллелизмом. Таких структур в настоящее время предложено несколько: от классической сети однобитовых процессоров с локальной памятью, до современных нейроструктур.

Разработка нейрочипов является кардинальным направлением развития разработок НК. Структура НЧ следует из результатов разработки структур и алгоритмов настройки многослойных НПС (для НК общего назначения) и из нейросетевых алгоритмов решения задач (для проблемно-ориентированных и специализированных НК).

На современном этапе развития технологии микроэлектроники и других смежных областей, нейронная технология стала адекватна не только различным типам микроэлектронной полупроводниковой технологии, но и оптической, оптоэлектронной, молекулярной, квантовой и некоторым другим.

Необходимо отметить, что рождение технологии систем на пластине и нанотехнологии, аналогично предыдущим этапам, приведет к рождению новых сверхпараллельных архитектур. Уже сейчас ясна адекватность нейросетевых архитектур технологии на пластине. Поэтому всякие попытки на уровне наноэлементов делать функциональные блоки со старой архитектурой, адекватной однопроцессорным машинам, можно считать тупиковыми. Современные технологии достигли того рубежа, когда стало возможным изготовление технической системы из 3...4 млрд. нейронов (именно такое количество их в мозгу человека), однако продолжает оставаться проблемой, как их соединить.

Из всех направлений вычислительной техники, а именно:

- однопроцессорные ЭВМ (персональные ЭВМ, ЭВМ среднего класса);
- малопроцессорные ЭВМ;
- многопроцессорные ЭВМ (ЭВМ с массовым параллелизмом, транспьютерная ЭВМ, псевдотранспьютерная ЭВМ, ЭВМ с транспьютерным ядром и периферийными процессорами типа i860, Power PC, Альфа, Р6);
- нейрокompьютеры;
- приоритет российской вычислительной науки и техники максимально может быть проявлен в ближайшие годы именно в направлении НК, как в максимально наукоемком и менее зависимом от технологического уровня. [15]

Организация и направленность проводимых в России исследований показывает высокий уровень теоретических работ и экспериментальных исследований по нейросистемам и нейроинформатике. Удачно выбрана форма взаимодействия между организациями через координацию ИЦН РАН. Активно сотрудничает с ним Российский научный центр "Нанотехнология" - один из признанных мировых лидеров по разработкам в области нанoeлектронной технологии. Таким образом, все необходимые компоненты для технологического рывка в нашей стране существуют. Это высокий уровень разработок по нейросистемам, мировой уровень работ по нанoeлектронной технологии, организация и координация проводимых исследований и ОКР.

Литература

1. Кирсанов Д.В. Архитектура, производительность и использование нейрочипа ETANN. - Зарубежная радиоэлектроника, 1997, № 2, с. 19-23.
2. Австралийская компания разработала нейрокompьютер высокого быстродействия. - Computer Week (Москва), 1997, № 1-2, с.5.
3. Истратов А.Ю. Новинка компьютерной индустрии фирмы Siemens Nixdorf - нейрокompьютер Synaps1 N110. - Зарубежная радиоэлектроника, 1997, № 2, с. 19-23.
4. Кирсанов Д.В. Оценка производительности нейрокompьютеров. - Нейрокompьютер, 1992, № 2, с.37-42.
5. Бочаров А.В. и др. Аппаратная реализация ускорителя нейровычислений.- Изв. вузов. Приборостроение, 1995, № 1-2, с.60-62.
6. Нейрокompьютеры и их применение: Материалы III Всероссийской конференции "НКП-97". Под ред. А.И. Галушкина: М. 1997.
7. Степанов М.В. Оптические нейрокompьютеры: современное состояние и перспективы. - Зарубежная радиоэлектроника, 1997, № 2, с. 32-56.
8. Галушкин А.И. и др. Некоторые концептуальные вопросы развития нейрокompьютеров. - Зарубежная радиоэлектроника, 1997, № 2, с.3-10.
9. Computers // International defense review. Defense electronics & computing. №. 3 , 1991, - p.77.
10. Kamagar F.A., Duderstart R.A., Smith J.O. Implementing the Back Propagation Algorithm on Meiko parallel Computing Surface.//Int. Conf on Application transputers. Univ. of Liverpool, 22-25 August, 1989.
11. Watanabe T., Sugiyama Y., Kondo T., Kitamura Y. Neural Network Simulation on a Massively Parallel Cellular Array Processor: AAP-2. // ICNN-89. - p.155-161.

12. Park Ch., Buckman K., Diamond J. and others. A Radial Basis Function Neural Network with On-Chip Learning. Intel. 1992.- 4p.