

На правах рукописи



Романчук Виталий Александрович

**АЛГОРИТМЫ ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОГО
АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ
НЕЙРОПРОЦЕССОРОВ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и
обработка информации (технические системы)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2011

Работа выполнена на кафедре информатики и вычислительной техники ГОУВПО “Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина”.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ручкин Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ларкин Евгений Васильевич

кандидат технических наук, главный
специалист филиала ФГУП «ГНПРКЦ
«ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр»
Гриць Валерий Матвеевич

Ведущая организация: **ФГУП «Центральный научно-
исследовательский институт связи»**

Защита состоится 8 июня 2011 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в ГОУВПО "Рязанский государственный радиотехнический университет" по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д.59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО “Рязанский государственный радиотехнический университет”

Автореферат разослан 4 мая 2011 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



В.Н. Пржегорлинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время для классических процессоров практически достигнут технологический предел. Одним из выходов из данной ситуации является использование нового поколения вычислительной техники, например, нейрокомпьютеров. Нейрокомпьютер - ЭВМ, основной операционный блок (нейропроцессор) которой построен на основе нейронной сети, то есть реализует нейросетевые алгоритмы.

Сейчас нейрокомпьютерная технология является одним из наиболее быстроразвивающихся разделов вычислительной техники и новым - "интеллектуальным" этапом ее развития. Но для дальнейшего развития в этой области существует ряд проблем, одной из которых является небольшая частота нейронных (30-150 МГц). Для ее решения одним из лучших методов является использование многопроцессорных архитектур. Вычислительные системы на базе нейропроцессоров - нейропроцессорные системы (НПС) отличаются высокой эффективностью при их использовании вследствие следующих причин:

- алгоритмы нейроинформатики высокопараллельны за счет использования нейросетевого базиса;
- НПС можно легко сделать устойчивыми к помехам.

Одной из проблем, мешающих созданию эффективных многопроцессорных структур на базе нейропроцессоров является то, что анализ и оценка эффективности специализированных многопроцессорных систем на базе нейропроцессоров являются очень сложными процессами, так как для нейропроцессоров и систем на их базе нет необходимых подходов, алгоритмов и программных средств анализа. Исследования в этой области позволят проводить эксперименты, связанные с анализом и оценкой эффективности НПС различного вида и с различным числом процессорных модулей (ПМ). Поэтому актуальны исследования с целью создания методики, алгоритмов и программных средств на основе новых теоретико-множественных подходов к анализу и оценке эффективности НПС. Актуальность поставленной задачи будет увеличиваться с развитием вычислительной техники в области нейропроцессорных технологий.

Степень разработанности темы. Среди наиболее популярных работ в области исследования нейропроцессорных технологий можно выделить работы А.И. Галушкина, А.И. Горбаня, И.Я. Акушского, Л.Г. Комарцовой, А.В. Савельева, М.Г. Дорпера, Т.К. Kohonen, J.J. Hopfield, R. Hecht-Nielsen и др. В области многопроцессорных параллельных систем следует отметить труды В.В. Воеводина, Вл.В. Воеводина, А.В. Каляева, И.А. Каляева, В.П. Корячко, В.А. Курчидиса, О.М. Брехова и др., в области программного обеспечения для специализированных средств обработки информации – работы ученых М.С. Долинского, В.Ю. Зотова, В.Е. Чернова.

В работах научных коллективов под руководством А.И. Галушкина и А.И. Горбаня определены возможности организации многопроцессорных систем на базе нейропроцессоров, но не была разработана теория анализа таких систем. Также в работах А.И. Галушкина описаны подходы и даны алгоритмы оценки производительности нейрокомпьютеров, но этот подход не учитывает структуру нейропроцессора и результатом работы таких алгоритмов является количество выполненных специализированных операций, использованных в качестве тестов. В данной работе предлагается подход, согласно которому исследуются структурные связи и закономерности функционирования ПМ, на основе чего описываются аналитические выражения и разрабатываются алгоритмы оценки его эффективности.

В работах научных коллективов под руководством В.В. Воеводина, Вл.В. Воеводина, А.В. Каляева, И.А. Каляева, В.П. Корячко, В.А. Курчи-даса описана теория для анализа многопроцессорных систем, но нейропроцессоры не были рассмотрены как особый класс процессоров. В данной работе исследуются общие принципы функционирования и описывается обобщенная модель нейропроцессора, выделенного в особый класс.

Цель диссертационной работы состоит в разработке методики, алгоритмов теоретико-множественного анализа и оценки эффективности сложных вычислительных систем на базе нейропроцессоров.

Основные задачи исследования:

- аналитический обзор нейропроцессорных устройств с целью описания их принципов функционирования и сравнительный обзор программных средств анализа многопроцессорных систем и устройств;
- разработка методики теоретико-множественного анализа НПС;
- классификация нейропроцессорных структур;
- описание аналитических выражений оценок эффективности для каждого типа структуры НПС и отдельного ПМ;
- системный анализ и описание закономерностей функционирования нейропроцессоров, разработка алгоритмов их анализа и оценки эффективности;
- системный анализ и описание закономерностей функционирования НПС, разработка алгоритмов их анализа и оценки эффективности;
- разработка алгоритмов для реализации предложенной методики;
- разработка программных средств теоретико-множественного анализа НПС в соответствии с предложенной методикой.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используются теоретико-множественный подход, теория графов и конечных автоматов, теория планирования параллельных вычислительных процессов, теория математического и системного анализа.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Предложена методика теоретико-множественного анализа вычислительных систем на базе нейропроцессоров.

2. С использованием теоретико-множественного подхода предложена классификация многопроцессорных структур на базе нейропроцессоров.

3. На основе использования одного и того же теоретико-множественного подхода применительно к программным и аппаратным средствам системы, предложены аналитические выражения оценок эффективности различных структур НПС и отдельного ПМ.

4. На основе описания закономерностей функционирования сложных НПС и нейропроцессора, предложены алгоритмы оценки их эффективности и теоретико-множественного анализа.

5. Разработаны алгоритмы исследования и описания системных связей элементов нейропроцессорной структуры и определения вида структуры исходя из этого описания.

Достоверность основных положений подтверждается:

- результатами экспериментов, полученными при теоретико-множественном анализе различных вариантов НПС шифрования методом ГОСТ 28147-89 с использованием алгоритмов анализа, оценки эффективности НПС и ПМ, эмулятора нейропроцессора NM6403 и платы MC4.31;
- внедрением полученных результатов в НТЦ «Модуль».

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Разработанные алгоритмы анализа и оценки эффективности, описанная методика теоретико-множественного анализа НПС, позволяют оценить эффективность НПС и каждого ПМ и, в дальнейшем, повысить их эффективность, используя различные методы оптимизации.

2. Разработан программный комплекс “НейроКС”, обладающий функциональными возможностями, позволяющими осуществить теоретико-множественный анализ вычислительных систем на базе нейропроцессоров семейства NM640х или их моделей и эмуляторов.

На защиту выносятся:

- методика теоретико-множественного анализа НПС и классификация многопроцессорных структур на базе нейропроцессоров;
- аналитические выражения оценок эффективности НПС конвейерного, векторного, конвейерно-векторного, векторно-конвейерного, произвольного вида, а также отдельного нейропроцессора;
- алгоритмы теоретико-множественного анализа и оценки эффективности сложных НПС и ПМ на основе результатов системного анализа и описания закономерностей их функционирования;
- алгоритмы определения связей элементов вычислительной структуры на базе нейропроцессоров и определения вида структуры НПС

на основе описания связей ее элементов.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследования докладывались и обсуждались на пяти международных конференциях: «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2010); «Молодежь. Наука. Инновации» - по 2 доклада (Пенза, 2010, 2011); «Ломоносов» (Москва, 2010, 2011) и четырех всероссийских конференциях: «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань, 2009); «Информационные и телекоммуникационные технологии. Подготовка специалистов для инфокоммуникативной среды» (Рязань, 2009); «Приоритетные направления современной российской науки глазами молодых ученых» (Рязань, 2010); «Молодые исследователи – регионам» (Вологда, 2010).

Результаты исследований были представлены на конкурсах, где были получены следующие документы: диплом победителя всероссийской студенческой олимпиады «Конкурс компьютерных программ»; диплом лауреата премии по поддержке талантливой молодежи, установленной Указом Президента РФ; диплом Министерства образования Рязанской области за высокий уровень научно-исследовательского проекта; сертификат лауреата второй премии всероссийского конкурса научных работ; диплом победителя конкурса «Молодой ученый года» им. И.П.Павлова.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 25-ти печатных работах: 14 статей (из них 3 - в изданиях, рекомендуемых ВАК), 9 тезисов докладов, свидетельства о регистрации электронного ресурса.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследования внедрены в ЗАО «НТЦ “Модуль”» и в учебном процессе Рязанского государственного университета имени С.А.Есенина. Завершен НИОКР 1-го года и выполняется НИОКР 2-го года по заказу ООО «НАНИТ».

Результаты практических исследований были представлены на конкурсах, где были получены следующие документы: дипломы за лучший инновационный проект на международной конференции "Ломоносов" и I Фестивале науки стран СНГ; диплом полуфиналиста конкурса инновационных проектов "Зворыкинский проект"; почетная грамота победителя программы У.М.Н.И.К.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, библиографического списка (95 наименований) и 4-х приложений. Основной текст работы содержит 148 страниц, 4 таблицы и 102 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цель и задачи исследования, приведена структура работы.

Первая глава посвящена основным вопросам работы и анализа

нейропроцессорных устройств, систем на их базе. Исходя из аналитического обзора нейропроцессорных устройств, выделены их общие свойства и принципы функционирования. Проведен аналитический обзор программного обеспечения для анализа многопроцессорных устройств и процессоров, определены основные направления дальнейших исследований.

Описан предмет исследования - далее под нейрокомпьютером понимается вычислительная система с архитектурой аппаратного и программного обеспечения, адекватной выполнению алгоритмов, представленных в нейросетевом логическом базисе.

Далее в работе проведен анализ и выявлены общие принципы функционирования нейропроцессоров: основным операционным блоком является совокупность искусственных нейронных сетей (ИНС), а алгоритм для нейрокомпьютера - это множество операций умножения с накоплением и команд управления, выполняемых в определенном порядке; нейропроцессоры являются процессорами с высоким уровнем параллелизма; нет четкой привязки к разрядности операндов; наличие в системе команд специализированных операций. На основе перечисленных принципов описана обобщенная модель архитектуры нейропроцессора.

Был произведен обзор и выявлены недостатки программного обеспечения (ПО), близкого по функциональности к теме исследования. Его можно разбить на 2 группы: программы для анализа многопроцессорных систем (Tasking, MDK-ARM, System Studio, Incisive, MATRIXx, WInter) и программы анализа процессора, выполняющего параллельный код (AIMS, Jumpshot, Paradyn, Проект V-Ray).

Поставлены основные задачи диссертационного исследования:

- необходима классификация и разработка методики анализа вычислительных систем на базе нейропроцессоров с использованием теоретико-множественного подхода и с учетом общих принципов функционирования нейропроцессоров;
- анализ эффективности необходимо разделить на статический, в котором эффективность оценивается в целом, и динамический, в котором исследуется эффективность на каждом шаге функционирования. Для статического анализа НПС и ПМ необходимо описание аналитических выражений эффективности для каждого вида структуры, а для динамического анализа необходима разработка алгоритмов анализа с учетом закономерностей функционирования НПС и нейропроцессоров;
- необходимо создание многофункционального программного комплекса, обладающего возможностями анализа и оценки эффективности НПС и отдельного нейропроцессора.

Во второй главе предлагается методика теоретико-

множественного анализа НПС. Описаны классификация структур НПС и выбор критериев анализа. Проведен системный анализ НПС и ПМ и описаны аналитические выражения оценок эффективности для каждого вида структуры и отдельного нейропроцессора.

С учетом задачи исследования объектом теоретико-множественного анализа является вычислительная система на базе нейропроцессора.

Важное значение для дальнейших рассуждений имеет множество подпрограмм $\{RO_l^{(j)}\}; l = \overline{1, L}$, загруженных на каждый ПМ в НПС и получаемых методами разделения программы $PR^{(j)}$ реализации некоторого алгоритма $A^{(j)}$, где программа представляет собой кортеж микрокоманд:

$$PR^{(j)} = \langle MK_1, MK_2, \dots, MK_i, \dots, MK_L \rangle. \quad (1)$$

Далее в работе предлагается методика теоретико-множественного анализа НПС. На входе имеем множество подпрограмм $\{RO_l^{(j)}\}; l = \overline{1, L}; j = \overline{1, N}$, загруженных на каждый ПМ в НПС. На выходе имеем оценки эффективности НПС $T_o^{(j)}, T_n^{(j)}, T_g^{(j)}, \dots$.

Рассмотрим каждый этап предложенной методики:

1. Исследование связей между ПМ в НПС, на которые загружены подпрограммы из множества $\{RO_l^{(j)}\}; l = \overline{1, L}; j = \overline{1, N}$.

2. На данном этапе необходимо определить вид НПС. Введем понятие структуры S_w , под которым понимается отношение параллельности выполнения подпрограмм R_{i1}, R_{i2} между i_1 -м и i_2 -м процессорными модулями $R_{i1}S_wR_{i2}; \forall R_{i1}, R_{i2} \in PR^{(j)}$. Отношение параллельности понимается как выполнение одновременно двух или несколько подпрограмм на разных ПМ. Тогда необходимо определить структуру $S_w \in S; w = \overline{1, W}$ из множества всевозможных структур $S = \{S_1, S_2, \dots, S_w, \dots, S_W\}$, позволившую j -й программе $PR^{(j)}$ (1) поставить в соответствие множество подпрограмм $\{RO_l^{(j)}\}; l = \overline{1, L}$:

$$S_w : PR^{(j)S_w} \rightarrow \{RO_l^{(j)}\}; l = \overline{1, L}; \forall j = \overline{1, N}. \quad (2)$$

3. На данном этапе необходимо осуществить анализ и получить оценки эффективности каждого нейропроцессора, входящего в состав НПС, например, $T_o^{(k)}, T_n^{(k)}, T_g^{(k)}, \dots$ для некоторого k -го нейропроцессора.

4. На этом этапе необходимо осуществить анализ и получить оценки эффективности НПС структуры S_w для реализации алгоритма $A^{(j)}$, например $T_o^{(j)}, T_n^{(j)}, T_g^{(j)}, \dots$.

Алгоритм для нейрокомпьютера – это алгоритм реализации совокупности ИНС, а связи между ИНС являются связями между ПМ в НПС.

То есть, все подпрограммы представляют собой однородные алгоритмы реализации ИНС. Поэтому одним из наиболее рациональных вариантов классификации структур является классификация с использованием теоретико-множественного подхода, основанного на понятии равенства подпрограмм. Введем понятие равенства подпрограмм обработки информации $RO_j = RO_k$, под которым будет подразумеваться равенство длин подпрограмм и совпадение подпрограмм с точностью до команды:

$$RO_j = RO_k = \left\{ \begin{array}{l} / RO_j / = / RO_k / \\ MK_l^{(j)} = MK_l^{(k)}, \forall l = \overline{1, |RO_j|} \end{array} \right. \quad (3)$$

Рассмотренное отношение $RO_j S_w RO_k$ структуры S_w указывает на то, что любые две произвольно взятые подпрограммы RO_j и RO_k , удовлетворяющие (3), могут выполняться одновременно на разных ПМ, т.е.:

$$\forall RO_j, RO_k \in PR^{(j)} : RO_j S_w RO_k. \quad (4)$$

Справедливо утверждение о том, что отношение структуры обработки S_w есть отношение эквивалентности. Это отношение позволяет разбить всю программу $PR^{(j)}$, определяемую согласно (1), на L классов эквивалентности, то есть на классы неравных между собой подпрограмм согласно (4):

$$PR^{(j)Sw} \rightarrow \{(RO_l)^q\}, \forall q = \overline{1, |a_l|}; \forall l = \overline{1, L}. \quad (5)$$

Этот подход позволяет классифицировать получаемые структуры.

1. Если $L=1$, порядок класса $|a_q|$ и информация передается последовательно, то структура конвейерная, если параллельно - векторная. Число ПМ в этом случае $q = a_q$. (6)

2. Аналогичные рассуждения для случая, когда число классов эквивалентности равно L , порядок каждого класса равен $|a_l| = 1, l = \overline{1, L}$. Число ПМ в этом случае $q = L$. (7)

3. Если число классов эквивалентности равно L и порядок каждого класса равен $|a_l|$, то возможно несколько вариантов:

а) объединим все смежные подпрограммы, в которых информация передается параллельно, в K множеств $G_i = \{RO_{iM}^{(j)}, \dots, RO_{iN}^{(j)}\}, \forall i = \overline{1, K}$. Тогда $G = \{G_1, \dots, G_K\}$. Если все подпрограммы $RO_{iM}^{(j)}, \dots, RO_{iN}^{(j)}$ внутри множеств $G_i, \forall i = \overline{1, K}$, обмениваются информацией последовательно, то структура является конвейерно-векторной. Число ПМ будет равно

$$q = \sum_{i=1}^K |\{G_i\}|. \quad (8)$$

б) объединим все смежные подпрограммы, в которых

информация передается последовательно, в V множеств $G_i = \{RO_{iM}^{(j)}, \dots, RO_{iN}^{(j)}\}, \forall i = \overline{1, V}$. Тогда $G = \{G_1, \dots, G_V\}$. Если всем подпрограммам $RO_{iM}^{(j)}, \dots, RO_{iN}^{(j)}$ внутри множества $G_i, \forall i = \overline{1, V}$ информация необходима одновременно, то структура векторно-конвейерная.

Число ПМ будет равно $q = \sum_{i=1}^V |\{G_i\}|$. (9)

3. В остальных случаях имеем НПС с произвольной архитектурой.

Число ПМ в этом случае: $q = \sum_{i=1}^L |a_i|$. (10)

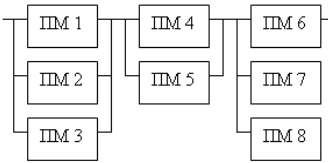
Одним из самых важных критериев эффективности, является производительность систем и устройств. Такие характеристики, как тактовая частота, позволяют оценить производительность достаточно неоднозначно, поэтому исходя из поставленных целей исследования из всего множества критериев эффективности были выбраны следующие величины:

- время проигрыша $T_n^{(j)}$ - время, равное разности времени выполнения программы на НПС и времени выполнения на одном ПМ;
- время выигрыша $T_o^{(j)}$ - время, показывающее выигрыш за счет обработки параллельных потоков данных за время обработки текущего потока.

И дополнительные величины:

- время выполнения $T_o^{(j)}$ - время, в течение которого обрабатывается программа $PR^{(j)}$ на НПС структуры S_w ;
- время простоев $T_{np}^{(j)}$ - суммарное для всех ПМ время, в течение которого ПМ простаивает в ожидании данных;
- время обработки $T_p^{(j)}$ - суммарное для всех ПМ время, в течение которого ПМ обрабатывает данные.

Далее произведен системный анализ каждого вида структуры НПС и определены аналитические выражения оценок эффективности. Например, если $TO_i^{(j)}$ - время выполнения i -й подпрограммы j -го алгоритма, то для конвейерно-векторной НПС (рисунок 1) оценки следующие:



Время:

- работы: $T_o^{(j)} = K * \max_{l \in L} TO_l^{(j)}, \forall l = \overline{1, L}$; (11)

- выигрыша: $T_o^{(j)} = \sum_{l=1}^K ((K-l) * \sum_{i=IM}^{IN} TO_i^{(j)})$; (12)

- проигрыша:

Рис. 1 – Пример конвейерно-векторной НПС

$T_n^{(j)} = K * \max_{l \in L} TO_l^{(j)} - \sum_{l=1}^q TO_l^{(j)}, \forall l = \overline{1, L}$; (13)

- простоев:
$$T_{np}^{(j)} = \sum_{l=1}^K ((K-l) * (\sum_{i=1M}^{IN} (\max_{i \in L} TO_i^{(j)} - TO_i^{(j)}))), \forall l = \overline{1, L}; \quad (14)$$

- обработки:
$$T_p^{(j)} = \sum_{l=1}^K ((K-l+1) * \sum_{i=1M}^{IN} (TO_i^{(j)})). \quad (15)$$

Далее произведен системный анализ нейропроцессора, представленного в виде самостоятельной параллельной системы, с применением такого же теоретико-множественного подхода, как к НПС, и определены аналитические оценки его эффективности. В качестве примера выбран процессор семейства NM640x как наиболее полнофункциональный представитель класса нейропроцессоров.

Блок процессора, выполняющий скалярные команды можно представить как показано на рисунке 2.

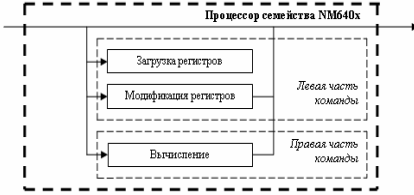


Рис. 2 - Выполнение скалярной команды процессора

Тогда:

$$L = 3, / a_i / = 1, \forall i = \overline{1, L};$$

$$MK_s^{(k)} = \langle TO_{1s}^{(k)}, TO_{2s}^{(k)}, TO_{3s}^{(k)} \rangle.$$

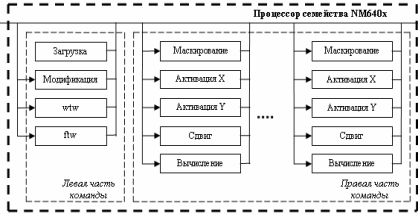
Время:

- проигрыша:
$$T_{ns}^{(k)} = T_{os}^{(k)} - \sum_{l=1}^3 TO_{ls}^{(k)}; \quad (16)$$

- простоев:
$$T_{nps}^{(k)} = 3 * T_{os}^{(k)} - \sum_{l=1}^3 TO_{ls}^{(k)}; \quad (17)$$

- обработки:
$$T_{ps}^{(k)} = \sum_{l=1}^3 TO_{ls}^{(k)}. \quad (18)$$

Блок процессора, выполняющий векторные команды можно представить как показано на рисунке 3.



Тогда для левой части команды:

$$L = 4, / a_i / = 1, \forall i = \overline{1, L};$$

$$MK_{vt}^{(k)} = \langle TO_{1vt}^{(k)}, TO_{2vt}^{(k)}, TO_{3vt}^{(k)}, TO_{4vt}^{(k)} \rangle.$$

Для правой части команды:

$$L = 5, / a_i / = 1, \forall i = \overline{1, L};$$

$$MK_{vr}^{(k)} = \langle TO_{5vr}^{(k)}, TO_{6vr}^{(k)}, TO_{7vr}^{(k)}, TO_{8vr}^{(k)}, TO_{9vr}^{(k)} \rangle.$$

Рис. 3 - Выполнение векторной команды процессора

- время проигрыша:
$$T_{nv}^{(k)} = N * (T_o^{(k)} - \sum_{l=1}^5 TO_{lvr}^{(k)}) - \sum_{l=1}^5 TO_{lvr}^{(k)} - \sum_{l=1}^4 TO_{lvt}^{(k)}; \quad (19)$$

- время простоев:
$$T_{npv}^{(k)} = 20 * (N-1) * T_o^{(k)} + (N-1) * \sum_{l=5}^9 TO_{l}^{(k)} - \sum_{l=1}^4 TO_{l}^{(k)}; \quad (20)$$

- время обработки:
$$T_{prv}^{(k)} = 20 * (N-1) * T_o^{(k)} + (N-1) * \sum_{l=5}^9 TO_{l}^{(k)} - \sum_{l=1}^4 TO_{l}^{(k)}. \quad (21)$$

Пусть $N_s^{(j)}$ - число скалярных команд, выполняемых в системе, $N_v^{(j)}$ -

число векторных команд. Тогда оценки эффективности НПС с учетом оценок каждого ПМ равны:

$$\text{- время проигрыша: } T_n = T_n^{(j)} + \sum_{k=1}^{N_n^{(j)}} T_{ns}^{(k)} + \sum_{k=1}^{N_{nv}^{(j)}} T_{nv}^{(k)} ; \quad (22)$$

$$\text{- время выигрыша: } T_\epsilon = T_\epsilon^{(j)} ; \quad (23)$$

$$\text{- время простоев: } T_{np} = T_{np}^{(j)} + \sum_{k=1}^{N_{np}^{(j)}} T_{nps}^{(k)} + \sum_{k=1}^{N_{npv}^{(j)}} T_{npv}^{(k)} ; \quad (24)$$

$$\text{- время обработки: } T_p = T_p^{(j)} + \sum_{k=1}^{N_p^{(j)}} T_{ps}^{(k)} + \sum_{k=1}^{N_{pv}^{(j)}} T_{pv}^{(k)} . \quad (25)$$

В третьей главе приведены алгоритмы определения связей элементов вычислительной структуры на базе нейропроцессоров и определения ее вида. Рассмотрены алгоритмы для анализа и оценки эффективности ПМ и НПС, описаны процесс системного анализа и закономерности функционирования ПМ и НПС.

- Разработаны алгоритмы определения связей элементов вычислительной структуры на базе нейропроцессоров. В основе этого алгоритма лежат алгоритмы заполнения элементов матриц:

- матрица $M' = [M'_{ij}]$ размерности $q \times N$, где q - количество ПМ, а N - это количество используемых элементов памяти. Элементы матрицы заполняются значениями, получаемыми по результатам работы синтаксического анализатора программы: '0' - элемент процессора не использовался в данной подпрограмме; '1' - элемент был присвоен; '2' - элемент был использован; '3' - элемент был использован, затем присвоен;

- матрица $M = [M_{ij}]$ размерности $q \times q$. Элементами матрицы являются значения: '0' - нет связи между подпрограммами ПМ; '1' - есть связь между подпрограммами ПМ; 'X' - запрещенные ячейки. Заполнение элементов реализуется с помощью реализации конечного автомата $K = (S, Z, W, \delta, \lambda, S_1)$ исходя из матрицы M' следующим образом:

$$((M'_{ik} = 1) \wedge (M'_{jk} = 2) \vee (M'_{ik} = 3)) \wedge ((M'_{nk} = 1) \vee (M'_{nk} = 3)) \rightarrow M_{ij} = 1; n = \overline{i+1}, j ;$$

$$((M'_{ik} = 3) \wedge (M'_{jk} = 2) \vee (M'_{ik} = 3)) \wedge ((M'_{nk} = 1) \vee (M'_{nk} = 3)) \rightarrow M_{ij} = 1; n = \overline{i+1}, j .$$

В остальных случаях $M_{ij} = 0$ (т.е. нет связи).

- Разработаны алгоритмы определения вида структуры НПС на основе описания связей ее элементов, заключающиеся в проверке соответствия полученной матрицы всем признакам матриц для каждого типа структуры:

- отличием матрицы связей конвейерной структуры является наличие значений '1' по диагонали над главной диагональю матрицы (рис.4а);
- для векторной структуры: все значения ячеек равны '0' (рис.4б);

- для векторно-конвейерной структуры: все элементы равны '0', кроме некоторых значений '1' над главной диагональю матрицы (рис 4в);
- для конвейерно-векторной структуры: все значения '1' сгруппированы в прямоугольные контуры, которые упорядочены в матрице по принципу лестницы (рис.4г).

$$\begin{aligned}
 \text{а) } M &= \begin{bmatrix} X & \boxed{1} & 0 & 0 & 0 \\ X & X & \boxed{1} & 0 & 0 \\ X & X & X & \boxed{1} & 0 \\ X & X & X & X & \boxed{1} \\ X & X & X & X & X \end{bmatrix} &
 \text{б) } M &= \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & 0 & 0 \\ X & X & X & X & 0 \\ X & X & X & X & X \end{bmatrix} &
 \text{в) } M &= \begin{bmatrix} X & \boxed{1} & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & \boxed{1} & 0 \\ X & X & X & X & 0 \\ X & X & X & X & X \end{bmatrix} &
 \text{г) } M &= \begin{bmatrix} X & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & 0 \\ X & X & 0 & 0 & \boxed{1} \\ X & X & X & 0 & \boxed{1} \\ X & X & X & X & \boxed{1} \\ X & X & X & X & X \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Рис. 4 – Примеры матриц связи ПМ для каждого типа структуры

- Разработаны алгоритмы анализа и оценки эффективности нейропроцессоров на основе описания закономерностей их функционирования с помощью математического аппарата конечных автоматов.

Приведены конечные автоматы описания функционирования нейропроцессора при выполнении скалярной $KS = (S, Z, W, \delta, \lambda, S_1)$ и векторной команды $KV = (S, Z, W, \delta, \lambda, S_1)$, а также автоматов распознавания лексем кода для языка нейроассемблера. Алгоритмы анализа эффективности нейропроцессора используют выходные сигналы $W_i, i = \overline{1,3}$ автомата KS и сигналы $W_i, i = \overline{1,8}$ автомата KV .

- Разработаны алгоритмы анализа и оценки эффективности НПС на основе описания закономерностей их функционирования.

Цель состоит в получении матрицы загруженности MZ . Размерность матрицы MZ равна $l \times q$, где l - время выполнения программы на НПС (в тактах). Для получения значений элементов матрицы MZ были разработаны специальные алгоритмы с использованием математического аппарата конечных автоматов.

Конечный автомат $KNPS = (S, Z, W, \delta, \lambda, S_1)$ описания закономерностей функционирования НПС показан на рисунке 5.

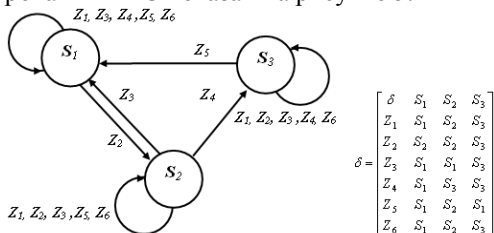


Рис. 5 – Конечный автомат $KNPS$ описания функционирования НПС

Значения элементов матрицы MZ можно определить по выходным сигналам алгоритма реализации конечного автомата $KNPS$:

$W_1 = \lambda(S_1)$ - ПМ находится в ожидании данных;

$W_2 = \lambda(S_2)$ - ПМ в момент времени t_i обрабатывает данные;

$W_3 = \lambda(S_3)$ - ПМ закончил обработку и ждет передачи данных следующему ПМ.

Алгоритмы анализа эффективности НПС используют полученную матрицу загруженности MZ и кортеж $TO = \langle TO_1, TO_2, \dots, TO_k \rangle$, где TO_i - время обработки подпрограммы i -м процессором. Пусть кортеж $T_0 = \langle T_{01}, T_{02}, \dots, T_{0k} \rangle$ содержит число нулевых элементов MZ для каждого ПМ, а $T_1 = \langle T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1k} \rangle$ - число ненулевых элементов MZ для каждого ПМ. Тогда, например, время обработки для системы равно: $T_{ps} = \sum_{i=1}^k T_{1i} = \sum_{i=1}^k (TO_i - T_{0i})$, время выигрыша: $T_a = T_{ps} - \sum_{i=1}^k TO_i$.

В четвертой главе описан программный комплекс "НейроКС" для теоретико-множественного анализа НПС на базе нейропроцессоров семейства NM640x. Рассматривается экспериментальное исследование программного комплекса "НейроКС" для анализа НПС шифрования информации по методу ГОСТ 28147-89.

Используя результаты исследования, разработан программный комплекс (ПК) "НейроКС", обладающий функциональными возможностями теоретико-множественного анализа НПС и нейропроцессора. В качестве инструментальных средств были использованы язык C# и среда Microsoft Visual Studio 2008. На рисунке 6 показана структура ПК "НейроКС".

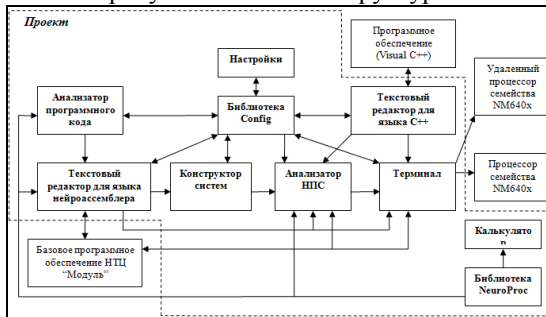


Рис. 6 – Структура ПК "НейроКС"

Результатами анализа нейропроцессора являются 25 оценок и 7 графиков, а для НПС - 18 оценок и 8 графиков.

Далее в соответствии с алгоритмом анализа НПС описан процесс теоретико-множественного анализа и оценки эффективности НПС реализации алгоритма шифрования по методу ГОСТ 28147-89 с различным количеством ПМ в ПК "НейроКС". Показано, что для данного алгоритма

наиболее рациональным выбором является конвейерная структура. С помощью ПК построены 11 зависимостей оценок эффективности НПС и каждого нейропроцессора от числа ПМ.

На рисунке 7 показаны зависимости времени проигрыша и выигрыша в зависимости от числа ПМ в НПС.

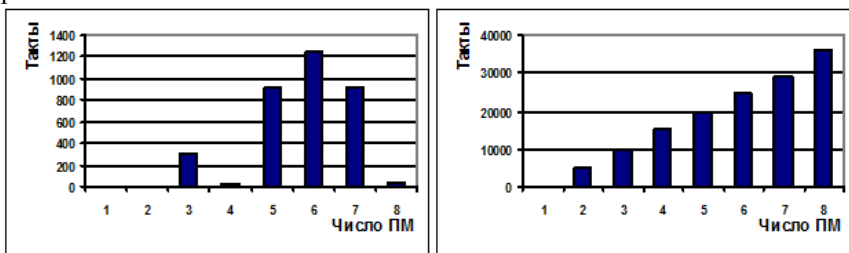


Рис. 7 – Зависимости времени проигрыша и выигрыша от числа ПМ

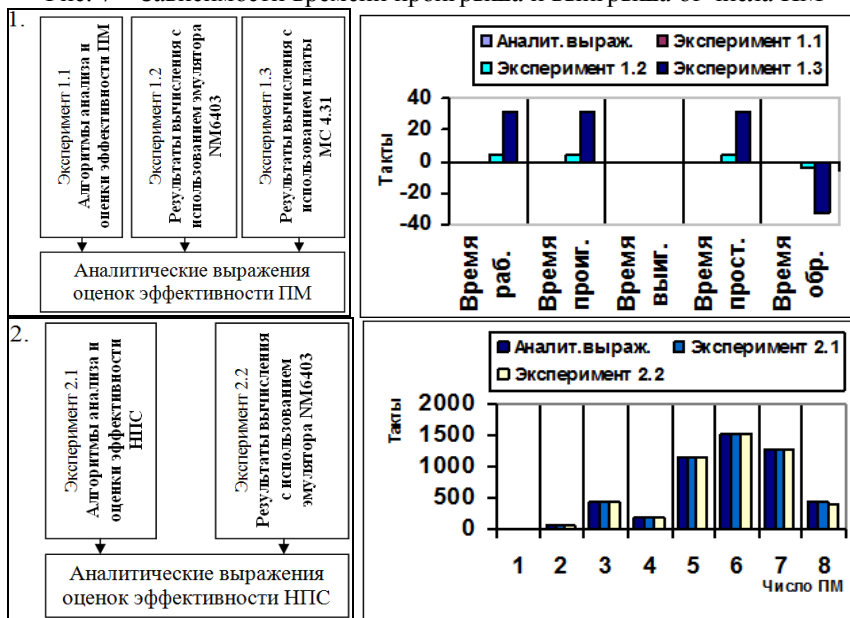


Рис. 8 – Методика и результаты исследования

На рисунке 8 рассмотрены результаты экспериментов 1.1-1.3 и экспериментов 2.1, 2.2 на примере времени работы за вычетом 10000 тактов для восьми вариантов НПС шифрования по методу ГОСТ 28147-89. Также проведен анализ системы фрактального сжатия изображений. Отклонения результатов вычисления аналитических выражений для данной задачи: - от результатов вычисления при выполнении эксперимента 2.1 состав-

ляют 0.0032 %.

- от результатов вычисления при выполнении эксперимента 2.2 составляют 0.0036 %.

***В приложениях** приведены описание нейропроцессоров семейств TMS320DMxxx и NM640x, программа шифрования по методу ГОСТ 28147-89 на языке нейроассемблера, результаты анализа эффективности этой программы на НПС с различным количеством ПМ, а также акты внедрения и дополнительные документы.*

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана методика теоретико-множественного анализа вычислительных систем на базе нейропроцессоров, позволяющая оценить эффективность НПС с учетом эффективности каждого ПМ.

2. Предложена классификация многопроцессорных структур на базе нейропроцессоров, позволяющая определить аналитические выражения оценок эффективности для каждого типа структуры. Теоретико-множественный подход, использованный для классификации вычислительных структур, может являться основой для разработки алгоритмов распараллеливания программного кода в НПС.

3. Предложены аналитические выражения оценок эффективности НПС и отдельного нейропроцессора: время работы, время проигрыша, время выигрыша, время простоев и время обработки. Их использование позволяет впоследствии разработать методы оптимизации НПС и каждого ПМ с целью повышения эффективности их функционирования.

4. Предложены алгоритмы теоретико-множественного анализа, оценки эффективности ПМ, на основе результатов системного анализа и описания закономерностей функционирования нейропроцессоров, позволяющие оценить эффективность ПМ, входящих в состав НПС.

5. Предложены алгоритмы теоретико-множественного анализа, оценки эффективности сложных НПС, на основе результатов системного анализа и описания закономерностей функционирования вычислительных систем на базе нейропроцессоров, позволяющие оценить эффективность таких систем.

6. Разработаны алгоритмы для реализации методики теоретико-множественного анализа НПС, включающие в себя:

- алгоритмы определения связей элементов вычислительной структуры на базе нейропроцессоров, позволяющие впоследствии определить вид структуры исходя из описания этих связей.
- алгоритмы определения вида структуры на основе описания связей ее элементов, позволяющие впоследствии использовать аналитические выражения оценок эффективности для этого вида структуры.

7. Разработаны программные средства, обладающие функциональными возможностями для реализации всей предложенной методики теоретико-множественного анализа НПС. Показано применение разработанного программного комплекса для разработки и анализа различных вариантов НПС шифрования информации по методу ГОСТ 28147-89. Результаты экспериментального исследования доказывают достоверность полученных в результате исследования алгоритмов, методики и программных средств.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Романчук В.А., Ручкин В.Н. Анализ архитектуры процессора NM6403 как системы параллельной обработки // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГУ им. С.А.Есенина, 2009. С.86-90.

2. Романчук В.А., Ручкин В.Н. Разработка программных средств анализа нейропроцессорных систем // Вестник РГРТУ, 2010. №2. Вып.32. С.61-67.

3. Романчук В.А. Алгоритм заполнения матрицы связи подпрограмм на языках нейроассемблера // Молодежь. Наука. Инновации: тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. Пенза: РГУ инновационных технологий и предпринимательства, 2011. URL: <http://rgu-penza.ru/mni> (дата обращения: 22.03.2011).

4. Романчук В.А., Ручкин В.Н. Разработка программного комплекса для моделирования и анализа нейропроцессорных систем обработки изображений // Цифровая обработка сигналов, 2010. №1. С.53-58.

5. Романчук В.А. Разработка алгоритмов получения нейропроцессорной системы для заданного программного кода // Аспирантский вестник РГУ: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГУ им. С.А.Есенина, 2010. №16. С.34-38.

6. Романчук В.А. Разработка методик, моделей и алгоритмов для анализа многопроцессорных структур на базе нейропроцессоров // Ломоносов-2011: материалы межд. молодежного научного форума. М.: МГУ им.М.В.Ломоносова, 2011. С.143-145.

7. Романчук В.А. Обобщенная структурная схема абстрактного нейрокомпьютера // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГУ им. С.А.Есенина, 2010. Вып.16. С.111-116.

8. Романчук В.А., Ручкин В.Н. Описание комплекса анализа и моделирования систем на базе нейропроцессора семейства NM640x // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГУ им. С.А.Есенина, 2009. С.90-93.

Романчук В.А. Разработка программно-аппаратного модуля шифрования информации // Молодежь. Наука. Инновации: тез. докл. между-

нар. науч.-практ. конф. Пенза: РГУ инновационных технологий и предпринимательства, 2010. URL: <http://rgu-penza.ru/mni> (дата обращения: 6.03.2011).

10. Романчук В.А., Ручкин В.Н. Разработка программного комплекса проектирования программ для нейропроцессоров NM6403, NM6404 // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГУ им. С.А.Есенина, 2008. С.44-46.

11. Романчук В.А., Ручкин В.Н. Разработка программного комплекса моделирования нейропроцессора и нейропроцессорных систем // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГУ им. С.А.Есенина, 2009. С.23-25.

12. Романчук В.А. Моделирование процессов обработки информации на базе нейропроцессорных структур // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций : тез. докл. 16-й междунар. науч.-техн. конф. Рязань: РГРТУ, 2010. С.153-155.

13. Романчук В.А., Ручкин В.Н., Колмыков М.В. Возможности программного комплекса NM Model для разработки и отладки программ обработки изображений // Вестник РГРТУ, 2008. №2. Вып. 24. С.83-85.

14. Романчук В.А. Разработка модели нейропроцессора и нейропроцессорных систем // Аспирантский вестник РГУ: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГУ им. С.А.Есенина, 2009. №14. С.16-21.

15. Романчук В.А. Возможности комплекса “НейроКС” для разработки программы шифрования по методу ГОСТ 28147-89 // Аспирантский вестник РГУ: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГУ им. С.А.Есенина, 2010. №15. С.11-15.

16. Романчук В.А., Ручкин В.Н. Разработка программного комплекса моделирования нейропроцессора и нейропроцессорных систем // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ, 2009. Ч.1. С.20 – 23.

17. Романчук В.А., Ручкин В.Н. Эмулятор команд нейропроцессора NM6403/04 // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГУ им. С.А.Есенина, 2007. С.63-67.

18. Романчук В.А. Программный комплекс “НейроКС” // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование», № 5, 2009. URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2009/5.doc>. (дата обращения: 20.02.2011).

19. EVECОМ-Эмулятор векторных команд нейропроцессора NM6403: свидетельство о регистрации электронного ресурса №7918 / В.А. Романчук. № 50200700586 ; опубли. 20.03.2007.

20. Программный комплекс “НейроКС”: свидетельство о регистрации электронного ресурса №15002 / В.А. Романчук. № 50200901056;

опубл. 23.10.2009.

21. Романчук В.А. Программный комплекс «НейроКС» // Приоритетные направления современной российской науки глазами молодых ученых: тез. докл. всерос. конф. Рязань: РГУ им.С.А.Есенина, 2009. С.111-114.

22. Романчук В.А. Программный комплекс «НейроКС» [Электронный ресурс] // Ломоносов-2010: материалы межд. молодежного научного форума. М.: МГУ им. М.В.Ломоносова, 2010. CD-ROM.

23. Романчук В.А. Программный комплекс «НейроКС» // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: тез. докл. XIV всерос. науч.-техн. конф. Рязань: РГРТУ, 2009. С.254-255.

24. Романчук В.А. Программный комплекс «НейроКС» как инновационный продукт // Молодежь. Наука. Инновации: тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. Пенза: РГУ инновационных технологий и предпринимательства, 2010. URL: <http://rgu-penza.ru/mni> (дата обращения: 6.03.2011).

25. Романчук В.А. Разработка программных средств для проектирования систем на базе нейропроцессора // Молодые исследователи – регионам : тез. докл. всерос. науч. конф. Вологда: ВоГТУ, 2010. Т.1. С.125-127.

Романчук Виталий Александрович

АЛГОРИТМЫ ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ НЕЙРОПРОЦЕССОРОВ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д.59/1.