

УДК 681.03

В.А. КРАСНОБАЕВ¹, В.И. БАРСОВ², Е.В. ЯСЬКОВА¹¹*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенко, Украина*²*Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков*

ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МОДУЛЯРНОЙ АРИФМЕТИКИ: КОНЦЕПЦИИ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Рассмотрены концепции, принципы, методы и средства создания высокоотказоустойчивых и сверхбыстродействующих систем обработки цифровой информации на основе использования модулярной арифметики.

модулярная арифметика, система остаточных классов, отказоустойчивость, надежность, производительность

Введение

Современный этап развития науки и техники отличается всё более сложными задачами, которые требуют своего решения. Однако сложность решаемых задач опережает темпы нарастания мощности универсальных ЭВМ. В этом аспекте, основными направлениями совершенствования вычислительных систем обработки информации (СОИ) в реальном времени является повышения пользовательской производительности и безотказности функционирования, за счет обеспечения необходимого (заданного) уровня отказоустойчивости.

Анализ современной литературы. В зависимости от принятых архитектурных решений, все множество вычислительных систем в позиционных системах счисления (ПСС), как правило в двоичной, можно разделить на четыре основные группы: так, применение SISD-архитектуры (одиночный поток команд и одиночный поток данных) обеспечивает доминирующее положение в классической Фон-Неймановской архитектуры. В таких машинах обработка информации происходит последовательно, команды выполняются одна за другом, при этом каждая команда инициирует, как правило, одну скалярную операцию. В этом случае использование параллельной работы интерфейса ввода-вывода ин-

формации и процессора, совмещение операций, выполняемых отдельными блоками и узлами арифметико-логического устройства, не позволяют эффективно реализовать параллельные вычислительные системы реального времени. Следовательно, возможности по повышению быстродействию современных позиционных ЭВМ, базирующихся на классической архитектуре последовательного выполнения операторов, практически достигли своего предельного значения; вычислительные системы второй группы - MISD-архитектуры (множественный поток команд и одиночный поток данных) большой практической реализации не получили; эти задачи, в которых несколько процессоров могли бы эффективно обрабатывать один поток данных, в науке и технике пока неизвестны; основу третьей группы вычислительных систем составляют устройства, разработанные на основе SIMD-архитектуры (одиночный поток команд и множественный поток данных); использование SIMD-архитектуры позволяет реализовать высокоскоростные СОИ реального времени; с их помощью эффективно решаются задачи векторных и матричных вычислений, задачи определения корней систем алгебраических и дифференциальных уравнений и т.п.; особое место занимают задачи цифровой обработки сигналов, которые являются наиболее оптимальными для SIMD – струк-

туры. Данная архитектура вычислительной системы ориентирована на параллельно-конвейерное выполнение наиболее трудоемких вычислительных операций. Обеспечение предельной для данного уровня технологии производительности вычислительной системы возможно только за счет применения нетрадиционной арифметики, в которой процесс распараллеливания осуществляются на уровне арифметических операций (микроопераций); альтернативным решением проблемы решения задач повышенной вычислительной сложности в реальном времени является применение MIMD-архитектуры (множественный поток команд и множественный поток данных). Этот класс предполагает, что в вычислительной системе есть несколько устройств обработки команд, объединенных в единый комплекс и работающих каждый со своим потоком данных и команд (мультипроцессорные, многомашинные, кластерные и другие подобные вычислительные системы). Однако, несмотря на все преимущества, отмеченные выше, такие как, наличие собственной памяти у каждого процессорного элемента и независимость вычислительного процесса, системы с массовым параллелизмом породили целый ряд проблем, связанных с описанием и программированием коммутаций процессов и управления ими. В то же самое время отсутствие математического аппарата, позволяющего решить проблему повышения производительности вычислительных систем, является основным сдерживающим фактором широкого применения MIMD-систем с массовым параллелизмом.

Таким образом, очевидно, что дальнейшее поступательное развитие вычислительной техники и средств обработки информации в ПСС напрямую связано с переходом к параллельным вычислениям. Данный переход открывает новые возможности в области совершенствования и развития вычислительных устройств [1 – 10].

Цель статьи – показать эффективность использования кодов модулярной арифметики для повышения отказоустойчивости функционирования сис-

тем и средств обработки дискретной информации без снижения производительности решения задачи.

Основная часть

Резервами повышения надежности, отказоустойчивости и живучести функционирования, а также пользовательской производительности вычислений являются использование вычислительных структур, специализированных вычислителей и спецпроцессоров, созданных на принципе распараллеливания решаемой задачи (алгоритма) на уровне одной микрооперации.

Концепция параллелизма давно привлекала внимание специалистов своими потенциальными возможностями повышения производительности и надежности вычислительных систем. Проводимые теоретические, экспериментальные и промышленные разработки в этом направлении позволили обосновать основные принципы построения параллельных вычислительных систем. Именно с подобными системами связывается в настоящее время перспектива дальнейшего наращивания вычислительной мощности и надежности.

В 2005 году исполнилось 50 лет после опубликования статьи чешского инженера М. Валаха, в которой впервые была выдвинута идея применить для операций над компьютерными числами вместо операций кольца вычетов по модулю $M = 2^n$ операции кольца вычетов по модулю $M = m_1 m_2 \dots m_n$, где m_1, m_2, \dots, m_n – попарно взаимно-простые числа. В вычислительной практике это была выдающаяся идея, так как все кольцевые операции по модулю $M = m_1 m_2 \dots m_n$ сводились к гомоморфной параллельной реализации тех же операций по малым модулям $m_1 m_2 \dots m_n$. Известная китайская теорема об остатках, которая до этого трактовалась как структурная теорема абстрактной алгебры, гарантировала указанный параллелизм в вычислениях над целыми числами, при условии, что результат кольцевых операций принадлежит диапазону целых чисел, определяемому произведением модулей $M = m_1 m_2 \dots m_n$. Эта идея привлекла вни-

мание большой группы ученых. Возникло новое научное направление – модулярная арифметика.

За истекшие 50 лет модулярная арифметика (система остаточных классов (СОК), класс вычетов) пережила периоды и бурного развития, и серьезных спадов. В настоящее время наблюдается прогрессирующий рост интересов к модулярной арифметике среди разработчиков сложных систем, связанных с обработкой сигналов и изображений, с криптографическими преобразованиями и т.п. [1, 3, 4].

На основе использования трех основных свойств (независимость, равноправность и мало-разрядность остатков, определяющих кодовую структуру) модулярная арифметика по сравнению с ПСС обладает следующими существенными преимуществами [1, 4, 5, 7]:

- возможность распараллеливания вычислений на уровне декомпозиции операндов, что существенно повышает их быстродействие;
- пространственное разнесение элементов данных с возможностью их последующей асинхронной независимой обработки;
- возможность табличного (матричного) выполнения арифметических операций базового набора и полиномиальных функций с однократной выборкой результата модульной операции;
- возможность создания цифровых устройств с эффективным обнаружением и исправлением сбоев и отказов, а также самокорректирующихся и высоконадежных цифровых устройств;
- возможность коррекции ошибок в динамике вычислительного процесса путем добавления малых (а, следовательно, и более надежных, чем в позиционных процессорах) резервных блоков, аппаратные затраты которых пропорциональны объему соответствующих сумматорных или табличных вычислителей;
- обеспечение высокой активной отказоустойчивости вычислительных структур на основе оперативной реконфигурации структуры вычислителя;
- меньшая вычислительная сложность вычислительных алгоритмов для отдельных классов (типов) задач;

- проявление особого свойства структуры модулярного вычислителя, обеспечивающего отсутствие эффекта размножения ошибок вычислений;

- приспособленность структуры СОИ в МА для проведения оперативной диагностики блоков и узлов системы;

- возможность повышения надежности СОИ в МА за счет эффективного использования пассивной и активной отказоустойчивости.

Основные принципы, положенные в основу построения параллельных вычислительных систем общеизвестны:

- модульность создания архитектуры вычислительных систем;
- способность системы к адаптации решаемых задач (алгоритмов, операций), к самонастройке и самоорганизации;
- возможность обеспечения необходимого уровня надежности, отказоустойчивости и живучести при меньшем, чем в ПСС, дополнительно вводимого количества оборудования.

К недостаткам модулярной арифметики следует отнести: трудности выполнения известных алгоритмов немодульных операций на современной элементной базе; ограничение сферы эффективности СОК только целочисленной арифметикой; некоторая сложность сопряжения с двоичной индустрией; недостаточная широта классов вычислительных задач эффективных модулярных вычислений; временная и аппаратная сложность преобразования чисел из позиционной системы в СОК и обратно; обработка данных в формате с плавающей запятой и обработка данных с высокой долей логических и немодульных операций.

Совокупность положительных свойств модулярной арифметики определяет следующие классы задач, в которых она существенно эффективнее позиционной арифметики: криптографические и модульные преобразования, обработка сигналов, обработка (сжатие) изображений, целочисленная обработка данных большой (сотни бит) разрядности в реальном времени, векторная и матричная обработка больших массивов информации, нейрокомпью-

терная обработка информации, реализация алгоритмов БПФ и ДПФ и оптоэлектронная табличная обработка информации.

Техническая реализация распараллеливания вычислений может осуществляться по-разному. В принципе распараллеливание может быть осуществлено на нескольких уровнях: на уровне программ, на уровне арифметических операций, на уровне обменов информации в вычислительных системах, ввода и вывода данных пр.

Одним из наиболее перспективных направлений в разработке высокоскоростных вычислительных систем является переход к распараллеливанию на уровне арифметических микроопераций. В современных и перспективных алгоритмах, использующих аппарат линейной алгебры, основными вычислительными процедурами являются операции типа перемножения векторов и матриц, обращение матриц, поиска собственных векторов и собственных значений матриц, решение систем линейных алгебраических уравнений и т.п.

Одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы повышения отказоустойчивости без снижения пользовательской производительности является переход к вычислениям в нетрадиционной арифметике с нетрадиционным представлением операндов. Из множества нетрадиционных арифметик наибольшее применение в вычислительных системах нашли следующие:

- модулярная арифметика в системе остаточных классов (в классе вычетов);
- коды Фибоначчи;
- арифметика в знакологарифмической системе счисления;
- модулярная комплексная арифметика Гаусса (комплексные, квадриплексные и триплексные числа, кватернионы, бикватернионы и пр.);
- арифметика в кольце полиномов;
- позиционно-остаточная система счисления.

Анализ нетрадиционных арифметик показал, что в настоящее время наибольшее практическое применение нашли вычислительные устройства, использующие непозиционные модулярные коды в СОК.

В [2] детально рассмотрено влияние основных свойств (независимость, равноправность и малоразрядность остатков, представляющих операнд) МА на структуру и принципы функционирования системы обработки информации. В частности, показано, что малоразрядность остатков в представлении чисел в модулярной арифметике дает возможность широкого выбора вариантов системотехнических решений при реализации модульных арифметических операций, основанных на следующих принципах: сумматорный принцип (на базе малоразрядных двоичных сумматоров [2]); табличный принцип (на основе использования таблиц ПЗУ [2, 4, 5]); прямой логический принцип реализации арифметических операций, основанный на описании модульных операций на уровне систем переключательных функций булевой алгебры [2]; принцип кольцевого сдвига, основанный на использовании кольцевых регистров сдвига [4].

Существующая в последние годы в вычислительной технике тенденция к распараллеливанию вычислений связана с непрерывным ростом требований к производительности вычислительных средств. В то же самое время процессоры, составляющие значительную часть аппаратной реализации СОИ, относятся к числу наименее надежных устройств, доля отказов и сбоев которых составляет более 50 процентов от общего числа отказов и сбоев аппаратуры. При этом среднее время ликвидации последствий последних, как правило, на несколько порядков превышает среднюю продолжительность выполнения одной задачи.

Наиболее перспективным путем разрешения данного противоречия является придание процессорам свойства отказоустойчивости. Вычислительная система или СОИ является отказоустойчивой (Fault-tolerant system), если при возникновении отказа она сохраняет свои функциональные возможности в полном (fail-safe) или ограниченном (fail-soft) объеме. При этом отказоустойчивость СОИ обеспечивается эффективным использованием как имеющейся, так и дополнительно введенной избыточности, а также и наличием процедур обнаружения и исправ-

ления отказов и сбоев. Fail-safe устойчивость к отказам характеризует способность вычислительной системы обеспечивать обслуживание, несмотря на возникновение отказа, хотя и с понижением качества, то есть находясь в состоянии постепенного снижения эффективности (деградации). Именно в таком контексте будет рассматриваться понятие отказоустойчивости СОИ в МА.

Свойство отказоустойчивости обеспечивает СОИ возможность выполнения заданных действий, и после возникновения отказов за счет снижения в допустимых пределах каких-либо показателей качества функционирования (например, путем постепенной деградации). Таким образом, учет вышесказанного обуславливает актуальность исследований в сфере разработки методов повышения отказоустойчивости в процессе функционирования высокоскоростных процессоров.

Основным методом, который широко применяется при построении отказоустойчивых вычислительных устройств и систем в ПСС является резервирование. Существует большое количество различных способов резервирования, но для любого из них характерна очень высокая избыточность. Даже при коррекции одиночных ошибок чаще всего приходится увеличивать объем оборудования как минимум в три раза. Столь высокая избыточность объясняется тем, что при применении резервирования практически полностью игнорируются все специфические свойства (если они имеются) конкретной СОИ.

Пусть на этапе проектирования необходимо обеспечить необходимый (заданный) уровень безотказности (надежности $H(t)$) системы обработки информации. Повышение (обеспечение) надежности, возможно, осуществить в том случае, если СОИ будет обладать определенным свойством, использование которого и позволит это сделать. Такое свойство определено и названо отказоустойчивостью [6].

Определение 1. Под отказоустойчивостью будем понимать свойство СОИ обеспечивать работоспособное состояние при отказах элементов, входящих в ее состав.

В [6] при определении термина отказоустойчивость выделяют три основные аспекты его использования:

- свойство отказоустойчивости закладывается разработчиками при проектировании с целью повышения безотказности СОИ; при этом необходимый уровень отказоустойчивости достигается в основном при использовании избыточных (дополнительных) технических средств (введение искусственной структурной и (или) другой избыточности) по сравнению с минимально необходимыми для выполнения всех требуемых функций СОИ в полном объеме;

- использования свойства отказоустойчивости позволяет сохранить полную или частичную работоспособность СОИ;

- считается, что отказ элементов не связан с воздействием, не предусмотренным условиями эксплуатации.

В большинстве случаев разработчиков интересует факт обеспечения отказоустойчивости только при сохранении полной работоспособности, т.е. без снижения качества функционирования СОИ. В дальнейшем при рассмотрении понятия отказоустойчивости нас будет интересовать только такой случай.

Для придания (обеспечения) СОИ свойства отказоустойчивости при проектировании необходимо предусматривать не только введение и использования искусственной избыточности (ИИ), т.е. использования различных видов резервирования: структурного, информационного, функционального, временного и нагрузочного, но и выявить и использовать возможную естественную (“природно”-имеющуюся) избыточность (ЕИ) систем. В этом плане основная задача проектировщиков по обеспечению необходимого уровня отказоустойчивости (значит и надежности $H(t)$) и состоит в том, чтобы на предпроектных стадиях в процессе исследований выявить (определить) и использовать имеющиеся резервы (ЕИ) СОИ по отказоустойчивости и с обязательным учетом этого и, в дальнейшем, выбирать и применять необходимые методы резервирования

(введение ИИ). Эти меры позволяют в конечном итоге сократить (уменьшить) эксплуатационные расходы на обеспечения необходимого уровня надежности функционирования СОИ в целом.

При исследовании и разработке методов повышения надежности СОИ может быть целесообразно и удобно разделить понятия отказоустойчивости на две составляющих, т.е. пользоваться двумя отдельными понятиями: естественная отказоустойчивость (ЕО) и искусственная отказоустойчивость (ИО). Введенные термины ЕО и ИО удобно использовать при анализе и синтезе надежностных структур СОИ и средств вычислительной техники (СВТ), так как на наш взгляд эти понятия достаточно полно отражают суть методов повышения надежности. Дадим определения введенным в статье терминам.

Определение 2. Естественная отказоустойчивость – это свойство СОИ (СВТ) сохранять работоспособное состояние за счет использования только ЕИ.

Определение 3. Искусственная отказоустойчивость – это свойство, заложенное при проектировании СОИ, использование которого позволяет сохранять работоспособное состояние при отказах элементов за счет использования как ЕИ, так и ИИ.

Определение терминов ЕИ и ИИ относительно СОИ дано в [7, 8]. Очевидно, что ЕО обуславливает исходный (первичный) уровень надежности СОИ, а ИО – дополнительный (необходимый, задаваемый) уровень.

Общую задачу повышения надежности можно сформулировать как задачу обеспечения отказоустойчивости СОИ за счет одновременного эффективного использования ЕИ и ИИ.

Повышения надежности СОИ за счет использования ЕИ и ИИ можно осуществить способом пассивной или активной отказоустойчивости.

Определение 4. Способ пассивной отказоустойчивости (СПО) – это способ повышения отказоустойчивости за счет использования ЕИ и ИИ без перестройки структуры СОИ. Данный способ применяется на этапе проектирования для повышения надежности СОИ до заданного (необходимого) уровня.

Определение 5. Способ активной отказоустойчивости (САО) – это способ повышения отказоустойчивости за счет использования одновременно ЕИ и ИИ путем перестройки структуры СОИ. Данный способ также применяется на этапе проектирования для повышения надежности СОИ до заданного (необходимого) уровня.

Предложенная концепция создания отказоустойчивых и быстродействующих СОИ реального времени хорошо согласуется с моделями обработки информации в МА [1, 4, 7-10].

Анализ причин, по которым модулярная арифметика, имеющая явные преимущества перед ПСС при решении ряда важнейших вычислительных задач, не получила должного практического применения, показал следующее [1]:

- силовое прекращение работ по созданию модулярных ЭВМ в СССР стало мощным психологическим фактором на пути развития модулярной арифметики; разработки модулярных ЭВМ были закрыты в институтах, связанных с промышленностью, в результате, многие из ведущих специалистов прекратили свои работы в этой области, многие перешли в академические и учебные институты, т.е. в сферу чисто теоретических исследований;

- модулярная арифметика нетрадиционная, достаточно сложная математическая дисциплина и трудна для восприятия большинству специалистов в вычислительной технике и в микроэлектронике; в ВУЗах программа для этих специальностей и соответствующая математическая подготовка, как правило, не предусмотрены; о серийно производимых (“К 340”, “К 340А”, “АЛМАЗ” и пр.) и реально существующих и функционирующих модулярных ЭВМ (на строго засекреченных тогда объектах) научной общественности ничего известно не было, а слух о «провале» такого проекта получил широкую огласку, в результате, во многих учебных изданиях модулярная арифметика (как и о троичной системе счисления, кодах Фибоначчи и т.п.) представляется как реально теоретически возможное экзотическое, но малоперспективное направление, отвергнуто реальной практической жизнью; в этом аспекте уже

априорно програмується негативное отношение молодых специалистов к идеи разработки и практическому применению модулярной арифметике;

- с появлением микропроцессоров, БИС и СБИС высокой сложности, наряду с положительным их влиянием на вычислительную технику, превратившим ее из продукции штучного и мелкосерийного производства в продукцию массовую, имеется и негативная сторона этого явления; так, с появлением микропроцессоров многие разработчики ЭВМ были лишены возможности реализации своих новых идей и технических решений, они попали под диктат производителей микропроцессоров, были вынуждены применять фактически навязанные им стандартные микропроцессоры; в результате во всем мире количество коллективов, разрабатывающих новые ЭВМ, значительно сократилось, развитие вычислительной техники как науки резко затормозилось; за последние 30-35 лет практически ничего принципиально нового в серийно выпускаемых ЭВМ не появилось, в основном эксплуатируются идеи, рожденные в шестидесятых – семидесятых годах прошлого столетия; остатки вычислительной техники, как науки, с генерацией новых идей и решений, переместились в академические и учебные институты, в область теоретических исследований, что еще более усугубило проблемы развития модулярной арифметики, которая по иным причинам и на несколько лет раньше оказалась в подобном же положении; ситуация изменяется в настоящее время с развитием систем автоматизации проектирования на основе стандартных технологий и библиотек сложных элементов и дезинтеграции процессов создания интегральных схем с введением режимов Fables (разработка в автономных дизайн-центрах) и Foundry (производства по проектам других фирм), однако, для МА и здесь имеются определенные сложности: требуется создание специальных библиотек, хотя эта задача в научном плане не сложная, но требующая существенных организационных и финансовых затрат;

- в настоящее время существенным тормозом в развитии модулярной арифметики является организационная и информационная разобщенность уче-

ных и инженеров, работающих в этом направлении; действительно, при огромном количестве публикаций по МА, они, как правило, труднодоступны, научные контакты между разрозненными группами специалистов недостаточно развиты, и доступная информация о проводимых исследованиях и результатах отсутствует, никакой координации исследований нет; все это существенно снижает эффективность проводимых работ, не позволяет в полной мере использовать имеющийся научный потенциал для достойного развития модулярной арифметики;

В настоящее время интерес к модулярной арифметике вновь существенно возрос, и это обусловлено двумя основными причинами:

- резко возросшими требованиями к вычислительным ресурсам СООИ в связи с бурным развитием криптографии, новых методов обработки и передачи сигналов и изображений и т.п.;

- развитием современных программируемых логических интегральных схем, а также достижениями систем проектирования в микроэлектронике, предоставившими инженеру-системотехнику возможность реализовать свои технические решения в виде, например, заказной интегральной схемы в режиме Fables и т.п.

За прошедшие 50 лет в развитии модулярной арифметики достигнуты значительные результаты. На первом этапе наибольшие успехи в становлении и применении МА были достигнуты в СССР под руководством И.Я. Акушского и Д.И. Юдицкого. Возглавляемым ими коллективом ученых и инженеров на элементной базе второго поколения были разработаны и построены ряд модулярных ЭВМ, по производительности, надежности и экономичности намного превосходивших всех своих отечественных и зарубежных современников. Так, например, ЭВМ “К-340А” выпускались в большом серийном производстве, они до сих пор (около 40 лет) работают на объектах военного назначения, демонстрируя свою высокую надежность. Однако по причинам, не имеющим ничего общего с научными, техническими или экономическими соображениями, в первой половине семидесятых годов работы по созданию

модулярных ЭВМ с СССР в административном порядке были прекращены. Сам факт прекращения работ, при полном отсутствии информации об его истинных причинах, сыграл очень негативную роль в развитии модулярной арифметики в стране. Центры дальнейших работ по модулярной арифметике переместились из промышленных институтов, имеющих свои производства и работающих по заказам для обеспечения вычислительной техникой мощных радиоэлектронных систем, переместились в академические и учебные институты, в сферу чисто теоретических исследований. Дальнейшие попытки создания реальных вычислительных устройств на основе МА подавлялись чиновниками, имевшими некоторую информацию о прекращении работ над модулярными ЭВМ и, не зная истинных причин, делавшими из этого искаженные выводы о недостаточной перспективности модулярной арифметики.

Однако усилиями множества ученых-энтузиастов модулярная арифметика продолжала развиваться. Были решены основные теоретические вопросы модулярной арифметики, разработан ее математический аппарат. Получен ряд интересных результатов не только в теоретическом плане, но и в практическом использовании модулярной арифметики. Наблюдается рост интереса к применению МА в смежных областях науки и техники, требующих наряду с быстрой обработкой информации и повышения отказоустойчивости, надежности, живучести функционирования и достоверности вычислений.

Теоретические исследования в ряде стран перешли в разряд проблемно-ориентированных: высокоотказоустойчивые и сверхпроизводительные арифметические расширители мощных стационарных ЭВМ, нейрокомпьютеры в МА, бортовые системы обработки информации реального времени, оптические устройства памяти и обработки, оптоэлектронные матричные процессоры, арифметические ускорители для ПЭВМ, процессоры быстрой обработки криптографической информации, разрядно-аналоговые моделирующие ЭВМ, спецпроцессоры реализации задач БПФ и ДПФ и пр.

За истекший срок модулярная арифметика сформировалась в самостоятельную научную дисциплину со следующими научно-теоретическими и научно-техническими направлениями и школами:

- теоретические основы модулярной арифметики (школа И.Я. Акушского и Д.И. Юдицкого, Россия);
- вычисления в комплексной плоскости (школа В.М. Амербаева, Казахстан);
- обобщенные системы остаточных классов (школа А.А. Коляды, Беларусь);
- конвейерные модулярные структуры (школы А.А. Коляды и И.Т. Пака, Беларусь и Казахстан);
- нейроматематика и модулярные нейрокомпьютеры (школа Н.И. Червякова, Россия);
- теория «безошибочных вычислений» (школа Е. Кришнаури, Индия);
- надежные, отказоустойчивые и живучие модулярные вычислительные структуры (школы В.А. Торгашева и В.А. Краснобаева, Россия и Украина);
- корректирующие свойства МА (школы Ю.Г. Дадаева и В.А. Торгашева, Россия);
- позиционно-остаточные системы счисления (школа В.Г. Евстигнеева, Россия);
- параллельные логические вычисления на основе модулярных арифметико-логических форм (школа О.А. Финько, Россия);
- комплексные и гиперкомплексные числа в МА (школы С.М. Онищенко, М.В. Синькова, Н.М. Губарени, Украина);
- модулярные вычислительные алгоритмы (школа С.А. Инютина, Россия).

Выводы

На основании результатов исследований, проведенных в данной статье, можно сделать следующие основные выводы.

1. Предложена новая концепция разработки метода повышения надежности в процессе проектирования СОИ, который основан на одновременном совместном учете и использовании ЕИ и ИИ. Основу этих методов составляют способы: СПО и САО которые основаны на совместном использо-

вании ЕИ и ИИ. Данное обстоятельство позволяет по новому ставить и решать задачу по достижению необходимого уровня надежности СОИ на этапе проектирования.

2. При реализации СПО или САО, суть которых заключается в выявлении (определении) ЕИ СОИ и в дальнейшем использовании ЕИ и ИИ на основе известных методов повышения надежности, может быть достигнута максимальное значение надежности $H(t)$ при заданных ограничениях на аппаратурные затраты, обусловленные суммарной избыточностью.

3. При принятии предложенной концепции повышения надежности, а также определений введенных в статье терминов ЕО, ИО, СПО и САО целесообразно рассмотреть возможность введения и корректировки некоторых существующих терминов и определений, относительно понятий отказоустойчивости и живучести данных в [6].

4. Результаты последних исследований показали, что данная концепция показывает высокую эффективность использования кодов МА для повышения отказоустойчивости СОИ реального времени [1].

Кроме этого, на основе вышеизложенного материала, можно сделать следующий вывод. Существует целый ряд классов (типов) задач, важнейших для современного уровня развития науки и техники, промышленности, экономики и систем безопасности обороны, которые на основе использования модулярной арифметики могут быть решены значительно эффективнее, чем на традиционных позиционно-двоичных ЭВМ.

Вместе с тем необходимо отметить, что модулярная арифметика развивается, разрабатываются новые методы и алгоритмы выполнения операций, что неуклонно расширяет сферу ее эффективности.

Литература

1. Материалы Международной НТК "50 лет модулярной арифметике". – МИЭТ, г. Зеленоград. Моск. обл., 23-25 ноября 2005 г.

2. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. – М.: Сов. радио. – 1968. – 440 с.

3. Лавриненко Д.И. Применение быстрого преобразования Фурье в криптографических преобразователях // Радиотехника. Всеукр. Межвед.науч.-техн.сб. – 2000. – Вып. 114. – С. 75-79.

4. Жихарев В.Я., Илюшко Я.В., Кравець Л.Г., Краснобаев В.А. Методы и средства обработки информации в непозиционной системе счисления в остаточных классах. – Житомир: Вольнь, 2005. – 220 с.

5. Краснобаев В.А. Методы реализации модульных операций в системах цифровой обработки информации // Радиотехника. – 2001. – Вып. 119. – С. 130-134.

6. ДСТУ 2606-94. Средства вычислительной техники. Отказоустойчивость и живучесть. Общие технические требования.

7. Краснобаев В.А. Методы повышения надежности специализированных ЭВМ систем и средств связи. – Х.: МО СССР, 1990. – 172 с.

8. Краснобаев В.А., Деренько Н.С., Зефирова О.В. Исследование влияния системы счисления на отказоустойчивость систем обработки цифровой информации // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь, 2006. – Вип. 43. – С. 11-19.

9. Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем / Н.И. Червяков, П.А. Сахнюк, А.В. Шапошников, С.А. Ряднов; Под. ред. Н.И. Червякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с.

10. Нейрокомпьютеры в остаточных классах. Кн. 11 (Червяков И.И., Сахнюк П.А., Шапошников А.В., Макоха А.Н.): Учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2003. – 272 с.

Поступила в редакцию 23.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.