

БАЗИСНАЯ ПЛАТФОРМА ПРОЕКТА «ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»

А.В. Филин

В статье рассказывается о системообразующей платформе проекта создания архитектуры и опытного образца отказоустойчивой ВС (ОВС), разрабатывавшейся в 80-х годах прошлого столетия и предназначавшейся для построения компьютерных систем управления после 2000 г. Это обстоятельство требовало прогноза развития техники надежных вычислений на 10 лет вперед и устанавливало тем самым будущие характеристики ОВС на уровне вычислительных систем следующего (четвертого) поколения. Когда страна, наконец, повернулась лицом к этой проблеме, мировое компьютеростроение было на подъеме и успешно осваивало производство ОВС третьего поколения. Общие сведения о содержании проекта «ОВС», прерванного по объективным причинам в 80-е годы прошлого столетия, описаны в [1].

1. Введение

В 80-е годы прошлого столетия зарубежная компьютерная техника (КТ) для решения задач управления в реальном времени развивалась исключительно интенсивно, тогда как отечественная существенно отставала от мирового уровня практически по всем показателям и, особенно, в части производительности, надежности, помехозащищенности, энергоэкономичности, микроминиатюризации и т.п. Обстановка, которая царил в те годы в сфере создания перспективных компьютерных систем управления, описана, например, в [2]. Учитывая значимость КТ, отставание в этой области ничего хорошего нашей стране не предвещало.

Поскольку в компьютерах для надежных вычислений нуждались многие системы государственного уровня значимости, в перспективе маячила угроза снижения уровня безопасности и эффективности управления страной в целом. Когда начиналась разработка нового поколения (НП) объектов гражданского и специального назначения, сразу же возникала задача выбора, существенной модернизации либо разработки новых адекватных средств управляющей компьютерной техники, которую просто негде было приобрести. Для опасных (в экологическом отношении) и дорого-

стоящих объектов своевременное и качественное решение задачи создания компьютерной техники нового поколения стало чрезвычайно актуальным делом. Проще говоря, чтобы отвечать новым требованиям управляющая компьютерная техника и автоматика, выпускавшиеся в стране, нуждались в коренном улучшении.

Осознавая негативную составляющую обстановки, директор ИПИРАН академик Б.Н. Наумов в 1985 г. предпринял масштабную попытку преодолеть ситуацию с общим отставанием в компьютерной отрасли на уровне руководства страны и Академии наук СССР. Как все происходило, и что было сделано в этом направлении на уровне двух конкретных проектов, описано в [1]. В частности, в направлении создания высокопроизводительных и высоконадежных средств компьютерной техники был открыт и начал реализовываться комплексный научный проект № 6 (КНП-6) «Отказоустойчивые системы». Проект, получив статус «научного», тем не менее имел своим главным конечным результатом создание физических образцов отказоустойчивых компьютеров для управления. В результате выполнения первого этапа проекта «ОВС» намечалось создать (помимо компьютерной архитектуры) также научную и инструментальную базы для перехода к следующему этапу работы – созданию экспериментального образца как прототипа ОУВК четвертого поколения.

Поскольку содержание проекта не оглашалось четверть века, воспользуемся юбилеем ИПИ РАН, чтобы познакомить читателя хотя бы с его фундаментообразующей платформой (парадигмой, подходом к проблеме, основными принципами и требованиями), опираясь на положения которой предполагалось решить задачу создания качественно новых компьютерных систем, которые в проекте именовались «компьютерами нового поколения» (КНП). Естественно, что в ходе реализации проекта, многое (в том числе и исходная концепция) могло бы измениться. Но поскольку проект был прерван, опишем его замысел в том виде, с которого проект стартовал. Начнем повествование с интегральной оценки ситуации тех годов, игнорировать которую было недопустимо.

2. Оценка ситуации в преддверии второй половины 80-х годов

Сегодня утверждение о том, что «основой современных систем управления процессами и объектами в реальном времени являются компьютеры», имеет статус аксиомы, не требующей до-

казательства. Однако только к середине 70-х годов специалисты осознали, что для этих целей обычные компьютеры не подходят, поскольку не отвечают требованиям надежной работы в составе автоматических (САУ) и автоматизированных (АСУ) систем управления. Не составляет труда назвать объекты (носители технологических процессов), которые являются опасными во многих отношениях: ядерные или химические реакторы, воздушный, морской и железнодорожный транспорт, ракетные системы, банковские структуры. Для названных объектов нужны были «умные» системы управления, создать которые можно лишь при ориентации на компьютеры. Системы управления такими объектами, *невозможные без уникальных возможностей компьютеров (ЭВМ)*, предъявляют жесткие и разнообразные требования к качеству их работоспособности. К обычным требованиям достаточной *производительности и точности* вычислений постепенно добавлялись требования к *достоверности вычислений, безопасности, живучести и бесперебойности* их работы в течение *длительного времени*. *Достоверность* трактовалась как вероятность получения неправильного результата; *безопасность* – как недопустимость нанесения вреда себе и другим (в том числе объекту управления); *живучесть* – как способность самостоятельно справляться со своими аномальными состояниями и сохранять при этом основные функции управления; *бесперебойность* в работе – как нечувствительность к отказам и сбоям без искажения реального времени. Со временем *доступность и долговременность* функционирования КСУ (и, соответственно, их компьютеров) вошли в число их качественных показателей.

3. Компьютеры – обычный и отказоустойчивый

Любой программно управляемый компьютер является своеобразным симбиозом трех составляющих: *аппаратуры, программ и данных*. Природа первой составляющей – *физическая*, двух других – *виртуальная*. Аппаратура является компонентом реального (видимого) мира, программы и данные – компоненты информационного (виртуального) мира, носителем которых является аппаратура. Продуктом гармоничной работы составляющих компьютера является *вычислительный процесс обработки потока данных*, поступающих на его вход, в результате которого порождается выходной поток новых данных (результатов счета). Выходные данные – это *результат* работы компьютера по обработке входных данных в соответствии с алгоритмом решаемой задачи, запро-

граммированном на языке компьютера. Предварительно программа решения задачи пишется на языке, понятном человеку, а затем транслируется на язык, понятный компьютеру. В зависимости от качества выполнения своего вычислительного процесса компьютеры подразделяются на *обычные* (не гарантирующие получения достоверного результата) и *гарантоспособные* (обеспечивающие получение точного результата в срок, несмотря на возникающие в процессе вычислений неисправности). Первые – относительно дешевые изделия, вторые – более дорогие (иногда существенно более дорогие).

Обычный компьютер не содержит в себе специальных аппаратных средств, которые могли бы гарантировать получение достоверного результата. Имеющийся уровень обеспечивается корректностью разработки, качественно-количественными свойствами используемого программного обеспечения и технологией реализации аппаратуры компьютера. Гарантоспособный компьютер содержит в себе все необходимые атрибуты, которые обеспечивают получение достоверного результата в срок, несмотря на возможные (предопределенные) нарушения в его работе.

В проекте «ОВС» ставилась задача создания именно гарантоспособного ОУВК 4-го поколения для работы в замкнутых контурах управления непрерывными и дискретными технологическими объектами и процессами.

Свойство *гарантоспособности* для АСУ и САУ, таким образом, принималось в проекте как обязательное к реализации. Для пользователя оно означало только одно: *гарантоспособная вычислительная система обладает настолько высокими комплексными показателями надежности и продуктивности, что ей можно доверять выполнение любых функций по управлению, регулированию и защите оборудования дорогостоящих объектов, являющихся носителями опасных (во многих отношениях) технологических процессов.* (Здесь термин надежность применяется в обобщенном смысле, вбирающем в себя все показатели качества, перечисляющиеся выше).

Было установлено (с учетом 10-летнего срока реализации проекта «ОВС»), что свойство гарантоспособности достижимо, если основу элементной базы (ЭБ) для управляющих ОВС, призванных обозначить собою появление нового поколения управляющих компьютеров, составят *самопроверяющиеся* интегральные схемы (ИС) крупномасштабного исполнения (СБИС). И эти СБИС должны быть наделены рядом принципиально новых свойств, объединяемых в

понятия энергоэффективности, эксплуатируемости и технологического совершенства, а не только требуемой продуктивностью (производительностью, реактивностью и пропускной способностью). Совокупно это означало, что самопроверяющиеся ИС элементной базы для ОВС/НП сами должны были обладать свойством *гарантоспособности* изначально, т.е. олицетворять собой *новое поколение ИС*. В задачу создания нового поколения ИС входило также требование устранения противоречия в разных сроках жизни агрегатов ОУ и микроэлектронной основы синхронных ИС, применяющихся в управляющих компьютерах. Предстояло определить, на какой информационно-идеологической основе можно было бы обеспечить требования, предъявляемые к СБИС нового поколения.

4. Проблемная ориентация продукта, намечавшегося к разработке

Понятие «проблемная (прикладная) ориентация» ... чего-либо ... всегда означало одно и то же – формирование *облика конечного (искомого) продукта* в соответствии с *целевой функцией*, определяющей его назначение. Облик конечного продукта предполагалось получить в результате развертки исходной целевой идеи (парадигмы), сформулированной в постановке задачи на его проектирование. В рамках КНП-6 термином «конечный продукт» назывался ОУВК, предназначенный для работы в составе компьютерных АСУ и САУ реального времени. Главными признаками, отличавшими ОУВК от систем автономного использования, должны были быть свойства *гарантоспособности, продуктивности и оперативного взаимодействия с объектом управления*. Оперативное взаимодействие обеспечивалось набором устройств связи с объектом (УСО), образующих специальную подсистему. Сам же ОУВК изначально рассматривался как составная часть будущей гарантоспособной компьютерной системы управления (КСУ – ОУ – Оператор) каким-либо объектом.

Использование ОУВК в качестве основы для построения высоконадёжных систем реального времени предполагало также учет в ее архитектуре нижеследующих исходных положений, вытекавших из проблемной ориентации. В процессе реализации проекта предписывалось понять (в контексте обеспечения надёжности функционирования), как:

- 1) проектировать ОУВК как часть управляющей системы, в которую она должна входить;

2) обеспечивать соответствие продуктивных и надёжных показателей качества ОУВК в составе той КСУ, в которую она будет включена;

3) оперативно защищать информацию ОУВК от искажения при возникновении сбоев и отказов;

4) обеспечить устойчивость вычислительного процесса к внешним воздействиям на помехообразующих объектах;

5) ориентировать конструкцию ОУВК на долговременную, бесперебойную и безопасную работу в реальном времени (в том числе и в экстремальных условиях (это требовало обеспечение «запаса прочности» по всем показателям качества), но уже кратковременно и в ограниченном диапазоне внешних условий и времени);

6) оценивать общие и частные требования к надёжности функционирования гарантоспособной управляющей компьютерной техники.

Первое положение поддерживалось требованием изначально-го согласования общей пропускной способности системы с пропускной способностью всех внешних каналов связи, находящихся в активном состоянии, чтобы обеспечить надёжную обработку, хранение и передачу всех видов информации в реальном времени (на проходе и без существенных задержек и потерь).

Второе положение поддерживалось требованием наделить ОУВК способностью к адаптации (изменению) своей структуры и показателей назначения под требования надсистемы управления.

Третье положение поддерживалось требованием оперативно-го обнаружения места возникновения недостоверной информации и блокировку ее дальнейшего распространения по системе.

Четвёртое положение поддерживалось требованием сокращения частоты сбоев системы из-за внешних факторов.

Пятое положение поддерживалось требованием проектировать ОУВК как гарантоспособную систему с заданным диапазоном условий эксплуатации и пролонгированным сроком службы.

Шестое положение предполагало выбор соответствующих критериев эффективности и методик их оценки на предмет проверки соответствия назначенных и получаемых показателей отказоустойчивости.

Были определены также условия, выполнение которых предполагало успешное завершение планов разработки ОУВК в срок. Разработка должна:

- опираться на спецификацию требований, описывающую косвенным образом конечный облик ОУВК/НП (через перечень ожидаемых свойств и пользовательских требований к объекту разработки);
- опережать по сроку готовности проект объекта (его намечалось выбрать), которым предстояло управлять, обеспечивая, таким образом, резерв времени для ее эффективной интеграции в КСУ объектом;
- иметь равный приоритет относительно той КСУ, для которой она предназначалась;
- строиться с учетом технологии, как минимум, двойного (военного и народнохозяйственного) назначения, позволяющей разрешить многие проблемы снижения затрат на производство (обеспечение массовости) и эксплуатацию.

5. Требования к надежности управляющих ВС

Процессы промышленных объектов реального времени требуют, чтобы нештатные ситуации, возникающие в процессе работы (отказы, сбои, ошибки операторов и прочие аномалии) во всех видах ресурсов ВС (аппаратных, программных, информационных), нейтрализовались автоматически без срывов и задержек в выполнении режимов объекта управления, а также без обесценивания результатов, полученных ранее. При этом нормальная (не допускающая искажений реального времени) работа управляющей системы должна была обеспечиваться и в моменты агрессивного воздействия негативных факторов со стороны как внешней, так и внутренней среды, окружающей аппаратуру.

Уровень требований к надежности определяется (в большой степени) назначением ВС и формулируется так: *непрерывная гарантированно надежная работа в составе системы реального времени в течение длительного интервала* (в пределах равного ее сроку службы или периоду активного существования).

Изучение соответствующей литературы показало, что обеспечение высокой готовности к использованию и отказоустойчивости ВС существовавшими методами возможно, что, собственно, и было доказано мировым опытом создания ОВС 80-х годов. Однако стоимость таких систем в те годы была очень высокой, и даже не возникал вопрос о возможности их массового использования

в силу высокой степени специализации*. К тому же количество применявшихся традиционных методов достижения высокого уровня отказоустойчивости (в особенности в КСУ реального времени) было крайне ограничено: в основном использовались различные версии метода дублирования и метод мажоритарного (тройного) резервирования аппаратуры с одним резервным каналом, динамически замещающим отказавший канал. Избыточность в последнем случае (по отношению к обычной одноканальной системе) приближалась к 350%, что и определяло высокую исходную стоимость управляющей системы.

Имевшие место попытки «лобового» решения задачи оперативной (в темпе реального времени) коррекции искаженной информации аппаратным маскированием («два из трех», «три из пяти») не имело развития. Применение корректирующих кодов для исправления ошибок сопровождалось накоплением поломок в системе. Дублирование аппаратуры не решало всех проблем надежности, но резко увеличивало стоимость. Возникла необходимость искать другие, может быть, даже принципиально новые, более эффективные и экономичные пути достижения высоких (гарантоспособных) показателей качества функционирования систем в предопределённых условиях.

Как уже отмечалось, комплексный научный проект «Отказоустойчивые системы» призван был решить значительную часть из обозначенных выше проблем. Главной идеей и конечной целью проекта являлась разработка *гарантоспособной компьютерной архитектуры, ориентированной на СБИС реализацию и перспективное развитие на долгие годы*. С целью отработки такой архитектуры предполагалось разработать экспериментальный образец (ЭО) ОУВК, удовлетворяющий требованиям применения в составе особо ответственных систем реального времени (в том числе и систем долговременного действия). При этом в ЭО предполагалось применить не твердотельные СБИС, а их аналоги на базе логически программируемых матричных кристаллов, чтобы позже реализовать их на транзисторном уровне по одной из монолитных технологий.

Исходя из этих соображений, были разработаны и утверждены общие требования к компьютерным системам со стороны перспективных объектов автоматизации и их интегральной эле-

* Отмеченная ситуация мало изменилась и после 2000 г., хотя надежность функционирования аппаратуры компьютеров существенно выросла (в основном, за счёт устойчивого прогресса в элементно-конструктивной и технологических базах компьютеров).

ментной базы. Важным свойством архитектуры для ОУВК признавалась *гибкость* на основе модульно-асинхронного принципа построения её частей, позволяющая создавать семейство моделей программно-совместимых компьютеров, различающихся уровнями гарантоспособности. КСУ, создаваемые на основе моделей семейства, должны были располагать возможностями и характеристиками, позволяющими относить их к разряду техники нового поколения (НП), появление которой прогнозировалось на стыке тысячелетий – после 2000 г.

6. Обеспечение соответствия продукта мировому уровню

Поскольку разработка архитектуры для ОУВК (с апробацией её на экспериментальных образцах) была рассчитана на поэтапную реализацию в течение 10-летнего периода, было принято специальное решение. Согласно этому решению *право на интеграцию в архитектуру имели лишь те идеи и решения, которые обладали значительным запасом новизны сравнительно с аналогичными атрибутами, использовавшимися в то время в ОВС для КСУ ответственными объектами*. Лишь такой подход мог гарантировать наделение ОУВК статусом продукта «нового поколения».

6.1. Путь обеспечения соответствия конечного продукта мировому уровню

Важным обстоятельством, повлиявшим на выбор пути создания ОУВК, явилось следующее наблюдение: не было обнаружено никаких попыток по стандартизации процессорных архитектур, что имело место в классе универсальных ЭВМ, но обсуждалась необходимость в разработке единого отказоустойчивого системного интерфейса. Эта работа была начата институтом IEEE с расчетом на его применение в ОВС следующего (четвертого) поколения. Уже к началу 90-х годов она воплотилась в жизнь в виде стандарта IEEE P896 «Futurebus+» на отказоустойчивую системную шину для построения любых классов ОВС. В рамках проекта «Futurebus+» велась разработка комплекта интерфейсных СБИС, реализующих протоколы взаимодействия устройств в системах. Отдел ИПИ РАН, ответственный за проект «ОВС», принимал активное (по переписке) участие на начальном этапе разработки этой шины вплоть до прекращения хода проекта «ОВС». Сегодня

IEEE Standard for Futurebus+ 896.xx представляет собой комплекс из 16 стандартов, охватывающих своими рекомендациями все проблемы проектирования отказоустойчивых ВС (Fault Tolerant Computing Systems – FTCS).

В конечном итоге (и с учетом выявленных тенденций), источником новизны проекта была выбрана *нетрадиционность* в подходе к разработке компьютерной архитектуры (КА) для ОУВК, заключающаяся в учете:

- результатов выявления корней кризиса классической (фоннеймановской) архитектуры;
- итогов прогнозирования тенденций в развитии современных ЭВМ (в том числе систем повышенной готовности и отказоустойчивости);
- необходимости упреждающей разработки концептуальной платформы проекта, определяющей идеальный конечный результат, к которому следует стремиться;
- лучших (отобранных временем) решений в области организации отказоустойчивых вычислений, полученных иностранными компаниями при разработке проектов ОВС и ЭВМ/НП;
- нетрадиционных путей построения ОВС и ЭВМ/НП, позволяющих преодолеть недостатки известных решений, методов и технологий;
- естественных научных и природных законов в применении к сложным в техническом отношении объектам, каковыми являются модели ОВС;
- методов выявления и преодоления технических противоречий при выборе решений;
- технологий и программных инструментальных систем на их основе, автоматизирующих наиболее трудные этапы процесса проектирования ОВС.

Такой (комплексный) подход, при котором ни одна сторона или составная часть проекта не остается без внимания с самого начала проектирования, должен был вывести разработчиков на компьютерную архитектуру (КА), способную создавать семейство моделей отказоустойчивых комплексов для разных применений и тем самым окупить финансовые и другие затраты, которые потребуются на их реализацию. Тщательное изучение литературы по методам и средствам обеспечения надежных вычислений (при глубоком понимании функционального назначения конечного продукта) позволило сформулировать требования к архитектуре для построения управляющих ВС нового поколения.

6.2. Условия обеспечения запаса прочности КА

При разработке спецификационной модели КА для ОУВК/НП пришлось учитывать, что:

- конечный продукт проекта (гарантоспособный компьютер – ОУВК) появится на рынке спустя десятилетие (почти полный срок жизни одного поколения компьютеров);
- к концу этого срока вся компьютерная отрасль (с ее классами компьютеров) существенно изменится – «уйдет» вперед;
- как следствие, возникла необходимость в предсказании (с десятилетним упреждением) будущего облика продуктов сектора надежных вычислений;
- достичь нужного уровня гарантоспособности можно только, если постулировать, что «ошибки были, есть и будут», и надо обучить систему *саму* бороться с ними;
- распространить действие постулата «самости» на аппаратные, программные и информационные (базы данных) ресурсы, разрабатывая их как самодостаточные гарантоспособные составляющие архитектуры ОВС;
- необходимо также обеспечить запас прочности на развитие архитектуры и в период ее активного существования в будущих моделях ОВС типа ОУВК.

6.3 Лейбл «новое поколение» как способ улучшения возможностей ВС

Опыт отрасли компьютеростроения показывает, что очередное поколение компьютеров появляется, когда преодоление накапливающихся противоречий в компьютерах текущего поколения с помощью наличного арсенала методов, средств и технологий становится экономически невыгодным. В свою очередь, человеческий опыт гласит: решение новых задач старыми методами – занятие бесперспективное. Отсюда следует, что введение любого новшества в компьютер всегда является следствием необходимости преодоления какого-то противоречия (являющегося причиной будущего следствия), для устранения которого следует искать адекватный метод. Констатация данного факта особенно актуальна, если соотнести ее с созданием нового поколения средств компьютерной техники.

Для подтверждения сказанного рассмотрим лишь три примера такого преодоления противоречий, считающихся в компьютерной технике классическими (хотя их достаточно много). *Первый*

объясняет природу конфликта между производительностью и надежностью, *второй* – устанавливает причинную связь между возможностями элементной базы и новыми поколениями ВС, *третий* – между требованиями к прикладным программам для ОВС и трудностями написания бездефектных программ.

Все конфликтные примеры вспоминаются сейчас потому, что в свое время способствовали принятию ряда принципиальных (стратегического уровня значимости) положений системного плана, составивших фундамент отказоустойчивой архитектуры для ОУВК/НП.

6.4. Конфликт между производительностью и надежностью

Данный конфликт объясняет причину интеграции в ВС свойства отказоустойчивости, позволяющего им работать без вынужденных остановов. Установлено, что вся история развития компьютеров связана с погоней за производительностью, за прирост которой приходится платить усложнением архитектуры, ростом объема аппаратуры и увеличением частоты работы элементной базы.

6.4.1. Ситуация в сфере автономно эксплуатируемых суперкомпьютеров. Особенно сильно эта тенденция действовала в классе суперкомпьютеров и систем на их основе. В результате надежность таких систем возрастала настолько медленно, что в итоге привела к возникновению явного противоречия между их полезной вычислительной мощностью и теряемой (из-за частых простоев по разным причинам).

Вот данные, подтверждающие сказанное в отношении компьютера CRAY-1, который считался не только самым продуктивным для второй половины 70-х годов, но и достаточно надежным среди действовавших супермашин того периода. Суперкомпьютер CRAY-1 имел следующие показатели надежности: средняя наработка на отказ – 4 часа, средняя продолжительность ремонта – 1 час, коэффициент готовности – 0,8. Иначе говоря, компьютер, способный выполнять до 80 *MFlops* (млн операций с плавающей запятой в секунду), простаивал в среднем в течение времени, равном продолжительности выполнения (с учетом коэффициента готовности) порядка 200 млрд операций. Легко также подсчитать, что средняя продолжительность операции восстановления работоспособности в 10^{11} раз превышала среднюю продолжительность выполнения одной типовой операции.

Такая диспропорция объяснялась тем, что в системе CRAY-1 не было предусмотрено средств контроля правильности функционирования, существенно уменьшающих время обнаружения причин неисправностей. Даже несмотря на постоянное присутствие ремонтного персонала самой высокой квалификации (эту роль на первой системе CRAY-1 выполняли ее разработчики), относительное время восстановления составляло астрономическую величину (относительно времени выполнения операции), в результате чего потери вычислительной мощности, на достижение которой были затрачены огромные ресурсы, оказались несоразмерно велики.

Данный пример выявлял *очевидный факт: для повышения интегральной производительности ВС необходимо стремиться к сокращению ее времени восстановления работоспособности из любых нештатных состояний.*

В рассмотренном примере имеет место случай, когда ВС автономного использования под давлением обстоятельств, связанных с фактом существенной потери ею своей вычислительной мощности, обратила внимание разработчиков на необходимость улучшения их показателей надёжности. Как следствие, был установлен факт прямой и обратной зависимостей показателей продуктивности системы с ее же показателями надёжности. В итоге четко обозначился *интегральный критерий качества (ИКК) системы, требующий учитывать взаимоотношения двух полярных показателей качества «продуктивности» и «надёжности».* ИКК позволял оценивать показатели как автономно (независимо друг от друга), так и совместно (во взаимодействии) для получения оценки, показывающей их совокупное влияние на систему. В этом заключалось его достоинство по отношению к точечным показателям качества, принимавшимся как критерии оценки.

6.4.2. Ситуация в сфере управляющих компьютеров.

В управляющих системах изначально ситуация была несколько другая, хотя общность с ВС автономного использования имела место. При их создании требовалось обеспечивать не только заданный уровень производительности и точности вычислений, но и надёжность хода вычислительного процесса в любых возможных аномалиях в работе аппаратных и программных средств системы. Это требовало иметь запас производительности (временной запас) в системе на случай преодоления собственных аварийных состояний.

Диктовали такой подход объекты управления с непрерывным характером технологического процесса, прерывание хода кото-

рого было явлением крайне нежелательным (к таким процессам, например, можно отнести процессы выработки электроэнергии). Здесь также просматривалась прямая взаимосвязь показателей продуктивности и надежности, особенно в системах, работающих в режиме «on-line», требующем восстановления работоспособности «на ходу» без потери темпа управления либо регулирования (т.е. опять же за счет улучшения показателей ремонтоспособности системы). Здесь также возникала необходимость рассматривать меры по повышению надежности одновременно как меры, повышающие интегральную производительность управляющей ВС. Это позволило применить тот же критерий и для оценки управляющих ВС, учитывая, что понятия продуктивности и надежности включают в себя все свои совокупности показателей (параметров и характеристик) качества.

Общий вывод по обоим классам ВС сводится к следующему. Поскольку быстродействие операционной логики компьютеров намного превзошло скорость выполнения ручного техобслуживания, то только внедрение в архитектуру, аппаратную и программную среду ВС принципа *самовосстановления работоспособности* (т.е. ремонта своими силами), способно было приблизить скорость восстановления к величинам, близким к скорости выполнения операций компьютерной системой. Только возложив на систему обязанность самой справляться с отказами и другими аномалиями, получаем возможность устранить возникшее противоречие так быстро, что этого не будет замечать ни оператор-технолог, ни объект управления.

6.4.3. Обобщение результатов исследования противоречия.

Сделанный вывод объясняет шуточный афоризм, в котором, как оказывается, скрыт закон (принцип) природы: «*Спасение утопающих есть дело рук самих утопающих*». Таким образом, ОВС – это система, в которой данный закон реализован. И чем полнее он реализован, тем выше уровень гарантоспособности ВС.

Общий вывод из проведенного исследования конфликта таков:

а) свойство отказоустойчивости в управляющих вычислительных структурах следующего (4-го) поколения не только сохранится, но и получит дальнейшее развитие;

б) для получения максимальной отдачи от его внедрения, его необходимо интегрировать в компьютерную архитектуру на уровне органической неотделимости;

в) интеграция свойства отказоустойчивости в управляющие системы для «онлайновой» работы должно рассматриваться как

«само собой разумеющееся действие», гарантирующее системе заданный уровень производства надёжных вычислений;

2) только та элементная база, которая не только отвечает требованиям производительности, но и поддерживает требования отказоустойчивости (как неотъемлемого свойства компьютерной архитектуры), естественным образом способствует решению проблемы создания отказоустойчивой системы нового поколения (этот тезис является определяющим в процедуре выбора ЭБ для ОВС/НП).

6.5. Конфликт между функциональными возможностями статике и динамике

Мы имеем дело и с другим «дежурным» противоречием, периодически возникающим в отрасли компьютеростроения. Суть его заключается в постепенном нарастании несоответствия между *фиксированными* функциональными возможностями используемой в системах элементной базы (статика) и изменяющимися функциональными возможностями систем, провоцируемыми появлением все более сложных прикладных задач (динамика).

Наращивание функциональных возможностей систем (равно как и производительности) сопровождается прежде всего ростом объема аппаратуры и программного обеспечения для их реализации. «Дежурным» данное противоречие названо потому, что оно регулярно обостряется к концу «жизни» каждого поколения ЭВМ и преодолевается каждый раз одинаково – путем применения новой, более качественной физической (схемотехнической и элементно-конструктивной) базы. Новая элементная база, свободная от недостатков и противоречий заменяемой (исчерпавшей себя) ЭБ, открывает каждый раз возможность «подъема» внутренней организации ЭВМ на качественно новый уровень. Она разгружает верхние уровни архитектуры ЭВМ от выполнения несвойственных им функций, существенно (иногда в «разы») улучшает их пользовательские показатели назначения и технические характеристики качества функционирования и, как следствие, функциональные возможности. Расширение же возможностей компьютера, как известно, приумножает потребность в них. Вот почему переход к новой (во всех отношениях) элементной базе – *объективная необходимость, не считающаяся с которой при переходе к новому (следующему по порядку) поколению компьютеров нельзя*. Он позволяет уменьшить дисбаланс между статикой и динамикой.

Напомним о том, что ОВС 3-го поколения (середины 80-х годов) строились на элементной базе в виде синхронных интегральных схем (ИС), показателем развития которых являлась плотность упаковки элементов логической схемы на единицу площади кристалла. Эта динамическая характеристика классифицировала ИС только по количественному признаку (числу транзисторов, размещаемых на кристалле) [3], чем вносила элемент неопределённости в поколения средств компьютерной техники. Между тем деление ИС на поколения не по количественному признаку (ИС, СИС, БИС, СБИС...), а по качественному позволяет увидеть принципиальную разницу в возможностях и свойствах ИС разных поколений. Отсюда вывод: для выбора ЭБ для компьютерной системы нового поколения, необходимо учитывать оба полярных признака как взаимно дополняющих друг друга.

Качественно-количественный подход к поколениям электронных схем позволяет более точно определиться с ЭБ для компьютеров 4-го поколения. Если, например, 3-е поколение ИС характеризовалось «жесткими» параметрами (функционально не изменяемыми логическими и физическими параметрами с момента их заводского изготовления) и не имело внутри себя средств самоконтроля правильности функционирования, то от ИС 4-го поколения следовало ждать большей гибкости (например, программируемости функций), наличия самопроверяемости, меньшей рассеиваемой мощности и т.д. Спустя десятилетие сделанный тогда прогноз во многом подтвердился.

Для преодоления неопределенности в делении ЭВМ на поколения учитывался реальный факт, согласно которому выход ЭБ на качественно новый уровень осуществлялся не сразу, а после окончательного вытеснения остатков предыдущего уровня. Это означало, что пресловутой стопроцентности новой элементной базы (ЭБ) в первых ЭВМ нового поколения вовсе не требовалось, поскольку предыдущая элементная база никуда не исчезает, а интегрируется в новые структуры и продолжает там существовать на новых условиях. Достаточно было использовать новую элементную базу в основных системообразующих узлах (процессорах, модулях оперативной памяти и каналах связи), чтобы затем постепенно подтягивать и остальные функциональные узлы компьютера, не требующие сверхскоростей.

Если под этим углом смотреть на историю вычислительной техники, то окажется, что свой переход на новые поколения ЭВМ совершали приблизительно в арифметической прогрессии с ша-

гом (примерно) 12 лет, начиная с 1939 г., когда была построена первая электронная (ламповая) ЭВМ «АВС». С тех пор ЭВ компьютеров развивалась под флагом повышения рабочей частоты, что обеспечивалось уменьшением размеров элементов и повышением плотности их монтажа. На этом пути постепенно возникло и стало усиливаться очередное, ставшее дежурным, противоречие. С уменьшением энергетики и возрастанием частоты сигналов уменьшалась их помехозащищенность и росла частота сбоев, влиявших, в первую очередь, на искажение информации, циркулирующей в системе.

В те годы имела хождение следующая статистика, подтверждавшая обозначенную выше тенденцию. При одном сбое на 100 млрд операций (10^{11}) тогдашняя ЭВМ с производительностью 10^5 оп/с сбила 1 раз/ 12 дней (в среднем). Прогнозировалось, что ЭВМ с производительностью 10^6 оп/с будет сбить 1 раз/сутки, а перспективная ЭВМ с производительностью 10^9 оп/с – каждые полторы минуты (если, конечно, никаких мер по улучшению ситуации не предпринимать).

Нетрудно было сделать вывод о том, что с ростом производительности интерес к методам обеспечения отказоустойчивости (к помехам и неисправностям различного вида) должен возрастать от системы к системе и от поколения к поколению.

Более глубокое исследование этого вопроса показало, что:

а) частое искажение информации требует ее оперативной (в такте выполняемой операции) коррекции;

б) никакие программные методы коррекции сбоев (например, реализованные по методу контрольных точек) непригодны для применения в управляющих ВС из-за необходимости часто прерывания выполняемой программы для повторных вычислений;

в) возможности известных методов помехоустойчивого кодирования на основе безыбыточной двоичной системы счисления (ДСС) фактически уже исчерпаны;

г) известные методы коррекции информации, основанные на искусственном введении избыточности, улучшая показатели достоверности и готовности, приводят к ухудшению показателей производительности, увеличению энергопотребления, габаритов, и часто не согласуются с реальными ошибками в схемотехнических узлах;

д) коды с искусственно вводимой избыточностью, порождаемые ДСС, будучи пассивными информационными образованиями,

не в состоянии решить (на требуемом уровне) проблему контроля функционирования аппаратных средств ЭВМ на основе единого метода кодирования, а следовательно, и проблему обеспечения надёжных вычислений;

е) необходимо искать (для применения в схемотехнике ИС нового поколения) другие (активные) системы и методы информационного кодирования и резервирования, способные обеспечить наилучшую защиту от ошибок любого происхождения.

Таким образом, было установлено, что разрешение перечисленных источников противоречий возможно лишь на пути выбора новой идеологии избыточного кодирования информации в ЭВМ и передачи функций обнаружения и коррекции ошибок низовому звену аппаратных средств – СБИС. Было установлено, что сущностная основа этой идеологии состоит в *интеграции рабочих и обнаруживающих (корректирующих) процессов в единое целое*. Это приводит к созданию естественно-избыточных самопроверяющихся функциональных узлов ЭВМ автоматного (самодостаточного) типа, в которых процессы контроля правильности функционирования являются органически неотъемлемыми элементами их информационных процессов.

Описанный конфликт предопределил необходимость серьезного подхода к выбору такой элементно-конструктивной базы для УОВК 4-го поколения, которая могла бы должным образом поддерживать концепцию надёжных вычислений. Элементная база ОВС 3-го поколения (обычные синхронные СИС и БИС) ей не соответствовала, поскольку базировалась на неизбыточной (ненадежной) логике двоичных вычислений.

6.6. Конфликт между пользователем и программами для ОВС

Данный пример идентифицирует конфликт между пользователями ОВС и трудностью написания безупречных (не содержащих ошибок) программ, требующихся для обеспечения надёжности вычислений в реальном времени. Требования к бездефектным программам возрастают на стыке поколений ЭВМ и выливаются в необходимость смены систем программирования (аналогично тому, что говорилось выше об ЭБ). Очевидно, что в основе этого конфликта лежит принудительная необходимость перевода пользователя на новую систему программирования, усугубляемая особенностями функционирования ОВС.

Основным критерием качества труда программиста является создание программы, не содержащей ошибок. Взгляд на программирование в таком ракурсе не вызывает возражений. Хотя цель прозрачна, не следует забывать, что ее решением занимается человек (программист), способный ошибаться. Очевидно, что от сложности задачи и уровня квалификации и опыта программиста зависит, какого качества программа будет создана. Требование подтвердить факт, что созданная программа не содержит ошибок, является обязательным для ее разработчика. Для этого служит специальная процедура, называемая тестированием. Но и тестирование программы (особенно большой протяженности) не исчерпывает до конца проблемы, поскольку путем тестирования невозможно доказать факт отсутствия ошибок в программе. Короче говоря, существует немало препятствий на пути создания правильно работающих программ, без которых применение ОВС на особо опасных объектах становится бессмысленным делом.

Подобно тому, как для текущего поколения ЭВМ определяющим является *качественное состояние их элементной базы*, так и для поколений систем программирования основной является *качественная характеристика технологии программирования (ТП) задач*. Потребность в адекватной (ЭВМ/НП) технологии велика, ибо имеет место та же перегруженность количественной характеристики языкового уровня: «низкий», «средний», «высокий», «сверхвысокий» и т.д. Говоря о языках программирования первых поколений, обычно выделяют лишь их качественную специфику: первые три поколения языков характеризуют собой переход от кодирования операций (цифрового и символического) к алгоритмизации программ. Для нового поколения ОВС необходимо столь же качественно и чётко определить содержание системы программирования (языков – компиляторов – методов и средств тестирования – инструментальных программных систем, облегчающих процесс подготовки задач к решению на компьютерах), особенно той, что будет использоваться через десять лет.

Таким образом, практика требует написания программ, которые бы *с самого начала не содержали в себе ошибок*. Существовавшая технология ручного программирования задач не способна была обеспечить выполнение этого очевидного требования. Пользователи остро нуждались в более дружеской и эффективной (компьютерной) технологии поддержки написания бездефектных программ. В рамках разработки проекта «ОВС» предполагалось найти путь устранения конфликта между ограниченными возмож-

ностями пользователей и увеличивавшейся сложностью написания бездефектных программ.

Следует отметить, что в описываемый период в сфере программного обеспечения наблюдался кризис методологии модульного программирования (ММП), которая все еще считалась передовой, но уже не поспевала за ускоряющимся темпом деловой жизни. Цикл разработки программных продуктов с использованием модульной технологии был слишком велик, так что приложение успевало устареть прежде, чем попадало от разработчика к потребителю. Цикл жизни программ, напротив, был очень мал из-за быстрого развития компьютерных систем. Сразу же вспоминается программистский фольклор того времени: *«Когда программа написана и отлажена, она становится ненужной»*.

Основная причина кризиса лежала в недостаточной универсальности, невозможности или сложности повторного использования программного кода модулей. Были и другие причины, в частности, исчезала прежняя консервативная среда, в которой работали модульные программные продукты. Ими можно объяснить, зачем потребовалось переходить от привычной модульной технологии к *объектно-ориентированной технологии программирования (ООТ)*, которая отвечала новым динамичным условиям существования пользователей. Новая ООТ устраняла недостатки ММП уже тем, что была ориентирована на *повышение степени повторного использования программного кода и на упрощение сопровождения программного продукта на всей протяженности его жизненного цикла*.

Таким образом, путем разбора конфликтных ситуаций третьего примера, имеющих отношение к программному обеспечению ОВС/НП, было установлено, что:

а) в процессе смены одного поколения ЭВМ другим замене подвергается и программное обеспечение;

б) целесообразно ориентироваться на атрибутику зарождавшейся объектно-ориентированной технологии программирования прикладных задач;

в) необходимо (в опережающем режиме) создать технологию процесса разработки бездефектных прикладных программ;

г) необходимо создать (на основе технологии предыдущего пункта) инструментальные средства, обеспечивающие автоматизацию процесса создания программ, не содержащих дефектов и ошибок различного происхождения.

Перечисленные требования были своевременно сформулированы и включены в планы работ по проекту «ОВС».

К знаниям стратегического плана (законы и принципы), которые описаны выше, оставалось добавить знания тактического плана (методы и приемы). Но их можно было получить, лишь изучив зарубежный опыт создания отказоустойчивых ВС.

7. Сводные итоги изучения зарубежного рынка ОВС

Ознакомление с реально существовавшими вычислительными системами, обладавшими повышенной устойчивостью функционирования, разработанными в различных странах за период с 1950 по 1985 г., показывало, что в каждой из реализованных систем для обеспечения отказоустойчивости процесса вычислений применялись решения, весьма различавшиеся в архитектурном и функционально-структурном планах. Это создавало впечатление, что не существует единого подхода к обеспечению отказоустойчивости, и потребовало более глубокого проникновения в проблему. Задача погружения состояла в том, чтобы вычлнить в проблеме общую часть, свойственную всем системам класса, и специальную часть, свойственную каждой системе.

7.1. Целевая направленность изучения рынка ОВС

Углубленный анализ зарубежных вычислительных систем повышенной надежности (в том числе отказоустойчивых), предлагавшихся на рынке к середине 80-х годов прошлого столетия, позволил получить ряд полезных результатов тактического плана, перечисляемых ниже. Эти результаты позволили сформулировать содержательную часть проекта КНП-6 «ОВС», реализация которой должна была завершиться созданием конечного продукта (экспериментального и рабочего образцов) с характеристиками, полученными путём экстраполяции параметров обобщенной «зарубежной» ОВС на 10-летний период ее развития. Чтобы получить итоговые результаты, были выполнены следующие поисковые работы, цель которых заключалась в том, чтобы:

1) охарактеризовать состояние рынка компьютерных систем повышенной надежности (СПН) и специфицировать области применения, нуждающиеся в надёжных вычислениях;

2) выявить тенденции, определяющие направления развития СПН в акватории этого класса компьютерной техники;

3) составить спецификацию «горячих» микропроблем, на которые предстояло обратить особое внимание в ходе разработки ОВС/НП;

4) найти сектор рынка надежных вычислений, который еще не был охвачен СПН или только начинал развиваться;

5) составить библиотеку структурных схем существовавших СПН и установить их главные особенности;

6) составить обобщенный портрет (облик) отказоустойчивого компьютера 2000 г. выпуска (в ранге компьютера нового поколения);

7) составить обобщенный алгоритм обеспечения отказоустойчивости (не «привязанный» к методам, средствам и технологиям);

8) достаточно глубоко разобраться в подходах и технологиях проектирования СПН, позволяющих «с открытым забралом» приступить к этому процессу;

9) сформулировать требования к интегральной элементной и конструктивной базе для ОВС 2000 г. и последующих годов.

Результаты изучения сектора рынка СПН по всем озвученным выше направлениям позволили составить трехэтапный план работ на 10-летний период, включавший в себя полный перечень НИР, которые предстояло выполнить. В частности, этап I завершался разработкой теоретического обеспечения и архитектуры для семейства управляющих отказоустойчивых систем, созданием инструментальных САПР для поддержки процессов проектирования аппаратуры и программ. На этапе II планировалось создание экспериментального образца управляющего отказоустойчивого вычислительного комплекса (ОУВК) с целью исследования характеристик его аппаратных средств и отладки программного обеспечения. Этап III выделялся для разработки рабочей документации, изготовления и наладки опытного образца ОУВК, предназначенного для использования в составе КСУ ответственными объектами, под которыми понимались объекты, являвшиеся носителями опасных (для людей и окружающей среды) технологических процессов.

7.2. Обобщенная характеристика ОВС середины 80-х годов

Что представляли собой зарубежные образцы ОВС к середине 80-х годов? Прежде всего, отметим, что существовали отказоустойчивые компьютеры, комплексы и системы, различавшиеся

своим назначением и функциональными возможностями. Отметим также, что нами изучались в основном системы наземного базирования. Обобщенная отказоустойчивая ВС тех годов характеризовалась следующими основными свойствами: модульной структурой своих ресурсов (модульностью), магистральной организацией системных шин (интерфейсов) связи, избыточностью (запасом резервных модулей), наличием средств обнаружения, локализации и устранения неисправностей (реконфигурация) и возможностью самовосстановления режима нормальной работы после возникновения неисправности.

К моменту изучения проблемы многие ОВС, установленные на объектах, уже сохраняли свою работоспособность в течение нескольких лет и, как ожидалось, должны были сохранять ее еще в течение многих лет. Секрет их долголетия (за счёт принципа отказоустойчивости) заключался не в использовании абсолютно надежных составных частей или способности ремонтировать (в буквальном смысле этого слова) самих себя – просто они содержали в себе достаточное количество резервных компонентов, чтобы при отказе какой-либо составной части самостоятельно заменить ее такой же исправной, взятой из имеющегося резерва. Внешний (ручной) ремонт неисправных устройств и своевременный возврат их в состав фонда резервных модулей позволял ОВС функционировать непрерывно и, теоретически, бесконечно долго, а на практике – в течение установленного для нее срока службы.

В тех случаях, когда ремонт отказавших устройств не предусматривался, система могла работать до исчерпания фонда резервных модулей и устройств. В дальнейшем каждый следующий отказ мог сопровождаться деградацией структуры системы и утратой соответствующих функций.

7.3. Разложение общей проблемы создания ОВС/НП на микропроблемы

В ходе изучения проблемы реализации отказоустойчивости выяснилось, что существует необходимость в ее разложении на составляющие, без знания ответов на которые невозможно специфицировать конечный продукт проекта и перейти к разработке его отказоустойчивой архитектуры. Роль конечного продукта в проекте КНП-6 играл, как известно, ОУВК/НП. Основные опорные микропроблемы (составляющие) были выявлены и обоснуде-

ны. Цель этой операции заключалась в том, чтобы каждый участник проекта знал, на что обращать особое внимание в процессе проектирования своего компонента системы. Этим достигалось также единство в понимании того, какие показатели качества следует улучшать. Фактически этим приемом все участники проекта пользовались в своих поисках (в нужном для проекта направлении). Спецификация основных опорных микропроблем (проблем точечного масштаба значимости) представлена ниже. В соответствии с этой спецификацией, каждый разработчик должен был:

- применять системный подход к выбору методов и средств повышения производительности и надежности всех атрибутов системы, распространяя его на все уровни и компоненты структурной организации;
- использовать для оценки эффективности системы (и всех ее функционально самодостаточных компонентов) общий критерий, связывающий отношения полярных показателей качества типа: «продуктивность / надежность ↔ надежность / продуктивность», «надежность / стоимость ↔ стоимость / надежность»;
- достигать гармоничного (сбалансированного) распределения функций (в части обеспечения свойства отказоустойчивости) между программным обеспечением и аппаратурой; в качестве связующей (разделяющей) среды между аппаратными и программными средствами предлагалось рассматривать всю совокупность обрабатываемых данных;
- обеспечивать в системе резерв производительности на случай парирования собственных аномальных (аварийных) состояний;
- стремиться к достижению времени восстановления работоспособности, не выходящему за пределы такта выполнения текущей операции («движение» в сторону системы с «нулевым» временем восстановления);
- обнаруживать с большой степенью вероятности ошибку в момент возникновения неисправности (стремиться к 100% обнаружению константных неисправностей)*;
- не допускать распространения искаженной информации за пределы узла, в котором обнаружена неисправность. Способность к самопроверке делает резервируемые модули отказобезопасными (ошибка изолируется простой блокировкой выхода схемы и

* Из этого требования вытекает необходимость разработки единиц резервирования (аппаратных модулей – плат и микросхем всех степеней интеграции) как самопроверяющихся съемных конструкций.

сигнализацией о своем отказе в систему восстановления работоспособности). В других вариантах реализация этого требования существенно сложнее, а главное – требует дополнительного времени на проведение диагностики и локализации места неисправности;

- обеспечивать, по возможности, тотальный контроль правильности преобразований информации – от входа в систему и до выхода из нее;

- стремиться к усилению защиты информации от искажений со стороны внешних воздействий различного толка (электромагнитных наводок, помех по питанию и др.);

- обеспечивать выполнение операций замены неисправных аппаратных модулей исправными модулями «на ходу»: без останова системы и выключения электропитания;

- стремиться к усилению независимости (самодостаточности) компонент системы (естественно, в контексте надежности);

- рассматривать самодостаточность структурных компонент в качестве способа, повышающего прозрачность всей структуры и упрощающего процедуру саморемонта без нарушения ее концептуальной целостности;

- защищать места хранения данных от повреждения и от несанкционированного использования;

- обеспечивать слежение за параметрами окружающей среды и состоянием средств жизнеобеспечения ОВС – системой электропитания, средствами сигнализациями, фондами резервных аппаратных и программных модулей;

- уделять максимальное внимание повышению достоверности и непрерывности обработки информации в условиях сбоев;

- сформулировать требования к элементной базе для ОВС 2000 г.;

- учитывать требования в части снижения энергопотребления, улучшения эксплуатационной и производственной технологичности ОВС выпуска после 2000 г.*;

- распространять (в разумной мере) сформулированные требования на все виды устройств системы.

* Учитывая прогресс в микроминиатюризации интегральных схем, это могло означать только одно: ОВС 2000 г. будут строиться на СБИС и проблем с экономией транзисторов и объемов оперативной памяти не будет. Как следствие, доступными для реализации станут структуры, допускающие наращивание избыточности с целью повышения не только надежности, но и производительности.

8. Обобщающие выводы

Представленный выше материал дает некоторое представление об идейно-принципиальной платформе, на которой предполагалось строительство «здания», именуемого Комплексным научным проектом № 6 «Отказоустойчивые системы». Если обобщить сущностное содержимое платформы, то можно выделить в ней главные составляющие:

1. Отказоустойчивость (как и все остальные показатели качества) должна интегрироваться в архитектуру ВС, начиная с уровня абстрактного проектирования, и присутствовать на всех уровнях организации, начиная с уровня пользовательского языка программирования и кончая физическим (уровнем топологии СБИС).

2. Изучение нетрадиционных принципов (стратегия) и методов (тактика) обеспечения гарантоспособных вычислений на совместимость выявила необходимость разработки «Концепции построения и развития архитектуры для семейства ОУВК/НП».

3. Фундаментом «Концепции...» должна служить система положений и принципов, естественность происхождения которых следует из анализа результатов принятого подхода: тенденций развития ВТ, элементной базы и программного обеспечения, опыта её изготовления, эксплуатации и перспектив применения и т.д.

4. Была принята следующая иерархия взаимоотношений между понятиями: принципы поддерживаются методами, методы (способы) – приемами; системообразующие положения поддерживаются свойствами, свойства – требованиями.

5. В частности, было определено, что свойство отказоустойчивости должно поддерживаться следующим набором требований:

- случайные нарушения в работе ресурсов системы должны трактоваться как естественные, допустимые события;
- все виды потенциально возможных нарушений должны выявляться (путем компьютерного моделирования) заранее, чтобы система могла их идентифицировать при появлении;
- система должна оперативно реагировать на допустимые нарушения с целью оперативного устранения либо амортизации;
- свойство гарантоспособности системы должно подтверждаться соответствующим сертификатом, удостоверяющим ее пригодность для использования в КСУ ответственными объектами;
- аппаратура системы должна создаваться на базе экономически рентабельных функционально законченных СБИС, которые, кроме необходимого быстрого действия, должны обладать рядом

новых свойств, объединяемых понятиями эксплуатируемости и технологического совершенства;

- СБИС должны ориентироваться на обладающую значительными резервными возможностями технологию CMOS, удовлетворяющую требованиям применения в системах реального времени;
- архитектура и схемотехника каждой СБИС должны быть оптимизированы на обнаружение прежде всего отказов их компонентов и на устойчивость к случайным сбоям, которые с ростом степени интеграции и частоты переключений компонентов СБИС становятся основной причиной их недостоверной работы.

Опираясь на положения озвученной платформы, была начата разработка (силами академических подразделений ГДР, СССР и ЧССР) «*Концепции создания многоцелевого ОУВК нового поколения и средств поддержки процессов его создания и эксплуатации (с проведением необходимого комплекса научных исследований)*», которая охватывала период до и после 1995 г. Ее стержнем являлся пакет из 24 НИР, НИОКР и ОКР под общим именем «Перспектива-□□» (на местах квадратиков ставились порядковые номера НИР, НИОКР и ОКР, намечавшиеся в рамках этого проекта). Этим приемом проект общенаучного назначения переводился в конкретную плоскость, для которого мыслилось выбрать конкретный (наиболее представительный) объект управления нового поколения.

С момента создания экспериментального образца планировались работы по подготовке отечественных предприятий к серийному производству ОУВК, которые, в основном, не соответствовали аналогичным зарубежным предприятиям. Решение задачи серийного выпуска ОУВК/НП к 2000 г. исходило из необходимости объединения усилий стран на основе кооперации серийного производства компонентов для него. Именно кооперация давала надежду на сокращение отставания в сфере управляющей КТ. Однако надеждам не суждено было сбыться по причинам, описанным в [1].

По итогам написания статьи естественно встал вопрос о соответствии уровня ОУВК проекта «ОВС» современному уровню развития аналогичных систем. С этой целью было изучено состояние рынка отрасли надёжных вычислений после 2000 г. Результаты анализа дали право сообщить, что многие доступные зарубежные управляющие ОВС в целом не превзошли тех свойств и показателей качества, которые предполагалось реализовать в

ОУВК к 2000 г. Истекшие десятилетия подтвердили правильность прогноза и выработанных базисных идей, сформулированных в 80-е годы. Причина этого – комплексный подход к решению проблемы, а не улучшение отдельных качественных и количественных показателей существующих систем, по которому шли зарубежные системы. Более того, зарубежные системы в принципе не могли превзойти намеченные характеристики гарантоспособности ОУВК, так как продолжали использовать обычную синхронную элементную базу в своих СБИС, принципиально не способную обеспечить им гарантированную устойчивость к сбоям и параметрическим отказам в промышленных условиях эксплуатации. В ОУВК намечалось использовать самопроверяющиеся СБИС на основе самосинхронной схемотехники, обладающей уникальными характеристиками производительности и отказобезопасности и не нуждающейся в использовании принудительной синхронизации. С уникальными свойствами, характеристиками и возможностями самосинхронных схем можно ознакомиться в [4, 5].

После прекращения работ по «ОВС» не все направления работ были заморожены. В частности, продолжалась работа по созданию технологии проектирования самосинхронных СБИС, которая сегодня практически готова к промышленному применению [6]. Продолжались работы и по поиску компьютерных архитектур и структур для управляющих систем. В итоге была предложена рекуррентная архитектура, единицей оперирования в которой является капсула-задача, представляющая собой информационный объект, содержащий программу, алгоритм которой рекуррентно свернут до размеров машинного слова, набор данных задачи и вспомогательные управляющие операнды. В настоящее время создается экспериментальный образец рекуррентного вычислителя для обработки сигналов.

Если бы проект «ОВС» (система НИР, НИОКР и ОКР «Перспектива 1-24») и остальные проекты КНВС удалось завершить, то страны социалистического содружества решили бы важную задачу для экономик своих стран. Прежде всего, они бы перестали зависеть от зарубежного импорта, и сегодня являлись полноправными участниками мировой кооперации в сфере производства средств компьютерной техники, по крайней мере, в классах персональных ЭВМ, гарантоспособных ОВС и суперкомпьютеров. Располагая доведенными до совершенства архитектурами в этих классах КТ, было бы ясно, что делать дальше в области компьютерных архитектур, программ и ЭБ для ЭВМ новых поколений.

А пока что страна, взяв курс на нанотехнологии, не имеет ни одной апробированной компьютерной архитектуры, адекватной этой элементной базе. Чем это может закончиться, легко догадаться, поскольку СБИС нанотехнологического уровня способны «проглотить» любую компьютерную архитектуру полностью. И если последние не будут гармонизированы, ничего путного не получится.

Список литературы

1. *Филин А.В.* История реализации проектов по созданию отказоустойчивой ВС и отечественной ПЭВМ-1.32 // Системы и средства информатики. М.: Наука, 2008. Вып. 18. С. 261–280.
2. *Мизин И.А., Филин А.В.* Принципиальная база архитектуры естественно-надежных компьютеров // Там же. М.: Наука. Физматлит, 1995. Вып. 7. С. 172–197.
3. *Филин А.В.* Направления развития интегральной элементной базы для компьютеров следующего поколения // Там же. М.: Наука, 2000. Вып. 10. С. 277–290.
4. *Филин А.В.* Самосинхронизация – естественный путь обеспечения долгоживучести интегральных схем // Там же. М.: Наука. Физматлит, 1999. Вып. 9. С. 242–247.
5. *Филин А.В.* Самосинхронные микросхемы – ключ к созданию электронной аппаратуры долговременного действия // Там же. М.: Наука. Физматлит, 1999. Вып. 12. С. 267–289.
6. *Степченко Ю.А., Денисов А.Н., Дьяченко Ю.Г.* и др. Библиотека самосинхронных элементов для проектирования полужаказных микросхем серий 5503 и 5507. М.: ИПИ РАН, 2008. 238 с.