



Проблемные вопросы технологической импортнезависимости в области электронной компонентной базы перспективной авиационной техники*

Совместно с Г.М. Алакозом, С.И. Плякотой

Введение

Применительно к микроэлектронике, вычислительной технике и информационным технологиям (МЭВТИТ), которые без сомнения относятся к укладоформирующим технологиям современной эпохи, решить поставленную Президентом Российской Федерации В.В. Путиным (24.06.2015) проблему обеспечения научно-технического суверенитета одним только импортозамещением маловероятно. В указанной сфере зарубежные технологии развиваются с практически предельным 18-24 месячным циклом удвоения конструктивно-технологических характеристик, которые у нас пока недостижимы. Становясь реципиентом в указанной сфере, любая страна добровольно занимает позиции в арьергарде технологического мейнстрима, включая авиастроение, где уровень развития МЭВТИТ напрямую влияет на качество авиационно-космической техники на всех этапах ее жизненного цикла. Высочайшая наукоемкость и междисциплинарный характер авиационно-космической техники делают ее одним из решающих факторов научно-технического развития страны, что требует перехода от стратегии импортозамещения к стратегии *импортнезависимости* МЭВТИТ, реализуемой только при наличии стратегического интеллектуального потенциала и военно-политической воли в стране.

1. Сущность научно-технической политики импортнезависимости в области МЭВТИТ

Учитывая глубину проникновения зарубежных комплектующих в отечественные авиационные комплексы, отказаться от импортозамещающей стратегии развития МЭВТИТ «вдгонку» пока невозможно. Поэтому ее можно только дополнить стратегией «в точку встречи», то есть встать на путь создания *импортнезависимых отечественных* вычислительных технологий и инфраструктур их поддержки, которые должны:

– составить основу национальной *научно-промышленной индустрии*, отвечающей задачам и вызовам XXI века;

– автономно решать *критически важные* для национальной безопасности задачи, поддерживая полный жизненный цикл электронной компонентной базы, а также системных, инструментальных и контрольно-измерительных программно-аппаратных комплексов разработки, производства и эксплуатации бортовых и наземных вычислительных систем *повышенной производительности, вычислительной устойчивости, отказоустойчивости и отказобезопасности* для комплектации *перспективных пилотируемых и беспилотных авиационных комплексов*.

В России существует *стратегический потенциал* фундаментальных исследований и прикладных разработок в области импортнезависимых вычислительных технологий, который был заложен при создании авиационно-космической техники в рамках «СОИ–антиСОИ».

В современных условиях переход к импортнезависимым МЭВТИТ требует учета следующих *внешних и внутренних ограничений и факторов*:

а) Активная подрывная деятельность США направлена на *дискриминацию и дискредитацию* не только России, но и всех других стран в области высоких технологий, и она будет только усиливаться в ближайшие годы.

* Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): труды Девятой междунар. конф., 03-05 окт. 2016 г., Москва: в 2 т. – Т. 2. – М.: ИПУ РАН, 2016. с.13-19.



б) *Стратегия национальной безопасности США-2015, Национальная военная стратегия США-2015 и Третья оборонная инициатива инвестиций и инноваций* [1] исходят из перманентного состояния «ни войны, ни мира» во всех сферах человеческой деятельности без разделения их на военные и гражданские.

в) Объектом дискриминации и дискредитации являются не только технологии проектирования и производства изделий микроэлектроники, но и инфраструктуры программно-аппаратной поддержки их использования.

г) Несмотря на беспрецедентную финансовую поддержку Пентагона в течение 30 лет, «кремниевая долина» смогла выйти на окупаемость только к середине 90-х годов прошлого века, а на создание современной программно-аппаратной инфраструктуры разработки и использования изделий микроэлектроники и вычислительной техники, которой нет ни у одной страны мира, кроме США, ушло 50–60 лет.

д) Не афишируя системный кризис в области вычислительной техники, США и Япония при создании суперкомпьютеров стратегического назначения (СКСН) осуществляют интенсивный поиск новых принципов и методов организации вычислений, начиная с физико-технических процессов и заканчивая методами и средствами представления задач предметной области.

Отсюда, для достижения реальной импортнезависимости технотронных комплексов авиационной техники, решающих не все, а только критические важные для национальной безопасности задачи, требуется устойчивая научно-техническая политика в области МЭВТИТ, которую необходимо:

- проводить на горизонте планирования порядка 20–30 лет;
- осуществить, исходя из независимой от США оценки перспектив и направлений развития современных информационных технологий.

С позиций обеспечения национальной безопасности у нас нет альтернатив поиску независимых эффективных дополнений к традиционным информационным технологиям, способным сохранить свою актуальность, как минимум, в 30-летней перспективе.

Главная опасность современных противоборств в микроэлектронике и вычислительной технике состоит в том, что заимствованные инструментальные и системные средства служат неконтролируемым источником снижения отказоустойчивости и отказобезопасности отечественных технотронных комплексов *на всех этапах их жизненного цикла* (см. рис. 1).

2. Необходимость ускоренного перехода к стратегии «в точку встречи»

Необходимость ускоренного перехода к импортнезависимости в сфере МЭВТИТ обусловлена тем, что DARPA уже признала необходимость принятия радикальных научно-технических и финансовых мер при создании HPCS (High Productivity Computing Systems) [2], удовлетворяющих требованиям современных задач и напрямую влияющих на национальную безопасность США, что отнесено к прерогативам федеральной программы США, где:

- основной целью считается создание к 2020 году эксафлопсных¹ систем;
- основные усилия направлены на достижение сквозного баланса между базовыми архитектурно-программными решениями и новыми электронными технологиями, основанными, в частности, на быстрой одноквантовой логике сверхпроводимости;
- *революционный скачок производительности предполагается достичь «не с чистого листа», а эволюционным путем с максимальным использованием архитектурных и программных решений, отработанных в рамках программы DARPA HPCS.*

¹ *эксафлопс = 10¹⁸ операций с плавающей запятой в секунду. Самый производительный суперкомпьютер современности – китайский «Тяньхэ-2» был создан в 2013 году и имеет производительность 33,86 петафлопс < 0,04 эксафлопс.*

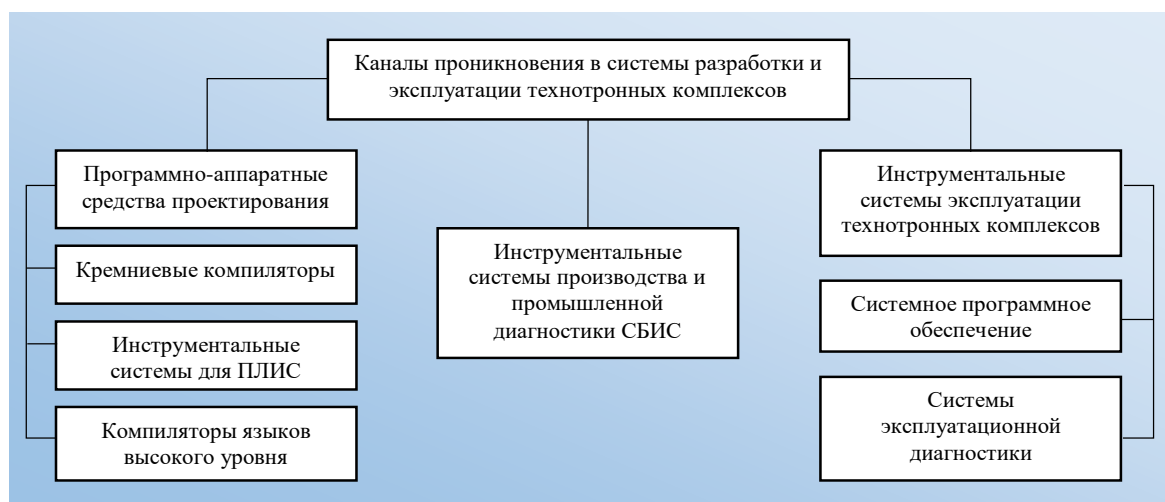


Рис.1. Каналы вмешательства в системы разработки и эксплуатации технотронных комплексов

Повышение эффективности использования разрабатываемых суперкомпьютеров американцы связывают:

- со снижением временных и аппаратных издержек *управления* вычислительным процессом, в котором задействованы колоссальные операционные, коммутационные ресурсы и ресурс памяти, изменяющие психологию человека-программиста;
- с решением проблемы отказоустойчивости и отказобезопасности преобразований в реальном времени больших объемов информации, результаты которых не поддаются *семантическому анализу и контролю*, что характерно для квантовой физики и нелинейной оптики, служащих основой большинства интенсивно осваиваемых нанотехнологий;
- с увеличением не только и не столько производительности, сколько *продуктивности* программно-аппаратных платформ, служащих «дружественным» интерфейсом между программистом и *динамически перераспределяемым* в ходе вычислений обширным вычислительным ресурсом, что свойственно самому человеку.

Приведенные данные позволяют заключить:

а) тщательно скрываемый США системный кризис в области электроники и вычислительной техники обусловлен заложенными в них в 40-х годах прошлого века фундаментальными парадигмами, которые оказались не состоятельны как для современного уровня микроминиатюризации, так и для управления гипербольшим функционально неоднородным аппаратным ресурсом;

б) развитие программно-аппаратных платформ в США идет наиболее затратным путем и с большим опережением по отношению к рынку сбыта, так как крайней необходимости в эксафлопсных системах еще нет, а их создание уже финансируется в рамках федеральных программ;

в) конкурентные преимущества получит та страна, которая раньше других освоит методы и средства синтеза «ненадежными методами и средствами из ненадежных компонент» *функционально полиморфного* аппаратного ресурса, (пере)распределяемого динамически и адекватно требованиям потока заданий между операционными, коммутационными, управляющими и интерфейсными функциями, включая и память.



3. Бездефектное проектирование технотронных комплексов широкого назначения как доминирующий фактор развития современной научно-технической индустрии

Выявившиеся издержки *технологии прототипирования*, использованной при создании самолетов *F-22* и *F-35* [3], только подтвердили тот факт, что современные авиационные комплексы невозможно создать без сбалансированной *национальной инфраструктуры*, которая охватывает все этапы проектирования, начиная с инструктированного синтеза материалов, удовлетворяющих заранее заданным требованиям, и заканчивая математическими моделями предметной области.

Несмотря на более отсталую конструктивно-технологическую базу отечественные традиции разработки авиационных комплексов военного и двойного назначения исходили из тех же принципов в силу сопоставимости ТТХ авиационной техники, что обусловлено едиными сценариями противоборств. В частности, технология прототипирования завуалировано использовалась при создании бортовых компьютеров в рамках «СОИ–антиСОИ» [4], где требовалось удовлетворить противоречивые и экстремальные требования по производительности, вычислительной устойчивости и отказобезопасности при продолжительности эксплуатации в «жестких» климатических условиях «ближнего космоса», превышающей более чем на порядок время безотказной работы элементной базы.

Главная отличительная особенность использованной в этих разработках *полностью отечественной гибридной технологии* состояла в том, что она по максимуму использовала потенциал структурно-функциональной гибкости как традиционных механизмов *контекстно-свободных* грамматик, так и не традиционных механизмов *контекстно-зависимых* грамматик. В результате была создана гибридная архитектура процессоров в ассоциативной памяти, в которой *алгоритмически ориентированный* субпроцессорный тракт (см. рис. 2):

а) функционировал **по законам контекстно-зависимых грамматик, которые дополняют традиционные для центральных процессоров контекстно-свободные грамматики;**

б) сопрягался с центральным процессором *произвольной архитектуры*, в качестве которого сейчас могут выступать процессоры ЭЛЬБРУС, БАГЕТ, KVARC (СБИС 5512БП2Ф) и т.п.;

в) комплектовался единственной ассоциативной СБИС Н1841 ВФ1;

г) микропрограммировался пользователем, а не производителем СБИС;

д) обеспечивал оптимальный баланс между энергопотреблением и быстродействием за счет оперативного перераспределения *функционально полиморфного аппаратного ресурса* между операционными, коммутационными и управляющими функциями и функциями памяти.

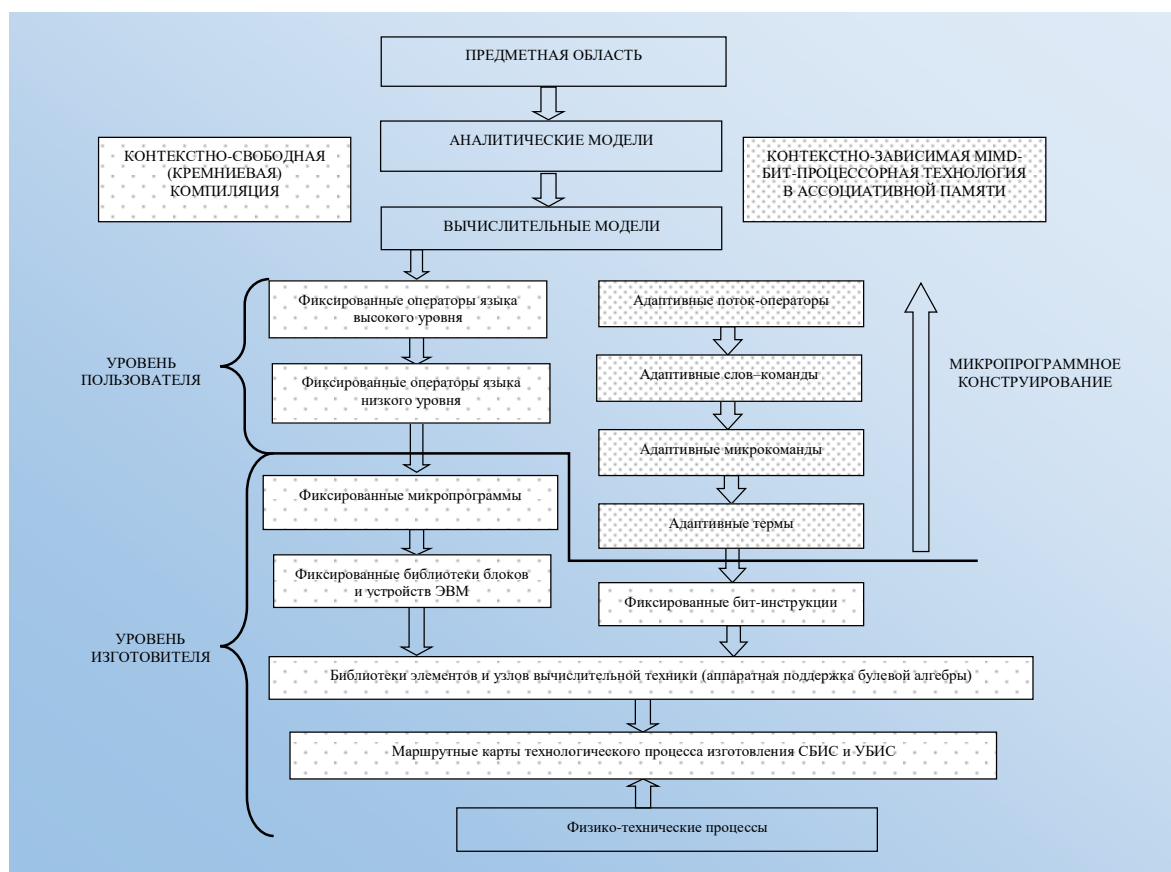


Рис. 2. Технологии отображения заданий в исполняемый ЭВМ формат [4]

Для сравнения, *Samsung* и *Intel* только в 2012 году анонсировали тестовое производство гибридных процессоров с *проблемно-ориентированным* сопроцессором, включая изделия на архитектуре *ARM Cortex-A7*, достигнув уровня топологических норм в 28нм [5].

Макетные образцы отечественно гибридной архитектуры показали рекордные на тот период значения удельной производительности при их *конвективном охлаждении*: $\sim 0,167$ млрд. оп/(сек*Вт) в объеме порядка $\sim 0,7$ дм³.

В результате в рамках «антиСОИ» удалось снизить заданные в ТЗ параметры по потребляемой мощности почти в 17 раз, а по массо-габаритам – в 42 раза.

По оценкам специалистов НИИМА «Прогресс» на основе отечественной радиационно-стойкой СБИС 5512БП2Ф этой компании можно в течение полугода получить опытную партию современного аналога СБИС Н1841 ВФ1 и на его основе разработать в сроки, также не превышающие полугода, масштабируемый, отказоустойчивый, *алгоритмически ориентированный*, бортовой, гибридный вычислитель ассоциативной обработки с удельной производительностью $\sim (1,5-15)$ млрд. оп/(сек*Вт) в объеме $\sim (0,3-3)$ дм³. Нижнее значение этого диапазона сопоставимо с удельной производительностью наземного китайского суперкомпьютера «Тяньхэ-2», возглавившего список ТОП-500 в 2014 году: $(33,86 \cdot 10^{15} \text{ оп/сек}) / (17,86 \text{ МВт}) = 1,9$ млрд. оп/(сек*Вт).

4. Потенциал системы обеспечения вычислительной устойчивости и живучести процессоров в ассоциативной памяти

Главным источником численной неустойчивости вычислительных алгоритмов (неоднозначности результатов вычислений для одних и тех же наборов входных данных) служит ограниченная разрядная сетка, вследствие чего все арифметические операции компьютеров в строгом смысле не являются ассоциативными, дистрибутивными и коммутативными, а результаты вычислений зависят от порядка выполнения арифметических действий и содержимого преобразуемых потоков данных. Эффект потери



вычислительной устойчивости обусловлен неизбежными процедурами округления мантисс при переходе от разрядности регистров-аккумуляторов к разрядности шин, первая из которых больше второй. Эффект округления только усиливается в арифметике формата плавающей запятой за счет процедур денормализации, а в многопроцессорных и многоядерных системах за счет объективного роста операций пересылки данных.

Поэтому одно из главных преимуществ контекстно-зависимых грамматик, используемых в алгоритмически ориентированных субпроцессорных трактах [6], состоит в том, что в них есть механизмы, которые позволяют оперативно наращивать в процессе вычислений разрядную сетку всех *операционных* и *интерфейсных* устройств, образующих макроконвейер ассемблерных инструкций, а также использовать «нечисленные» методы и средства обработки численной информации.

С позиций отказобезопасности главная специфика проявления отказов в вычислительной технике сводится к тому, что и естественное, и спровоцированное неправильное функционирование даже одного вентиля приводит *не к останову* вычислителя, а *к изменению* реализуемой функции и, как следствие, к расширению системы команд [7]. Это делает непрогнозируемым поведение всего технотронного комплекса военного назначения в условиях активного противоборства с электронно-лучевыми средствами подавления.

Отсюда, живучесть технотронного комплекса необходимо обеспечивать в темпе реального времени, для чего требуется адаптивная программно-аппаратная система глубокой и максимально полной диагностики электронной компонентной базы и парирования отказов с минимальной аппаратной избыточностью.

Система обеспечения живучести процессоров в ассоциативной памяти:

- использует не подстановку «горячего резерва», а перераспределение заданий толерантно действующей «карте отказов», что возможно только в рамках контекстно-зависимых грамматик;

- парирует *в темпе близком к реальному времени* 27–30 функционально значимых отказов с вероятностью 0,7 при 30–40% аппаратном резерве (см. рис. 3).

Из рисунка 3 также следует, что в процессорах на ассоциативной памяти живучесть «целого» превышает живучесть «частей», что характерно для всех многоклеточных организмов. Важно так же, что естественная структурно-функциональная избыточность бит-процессоров, как и в живых системах, поддерживает высокий уровень *индифферентных отказов*, который в (30–50) % случаев оказывается катастрофическим для большинства фон-неймановских мажоритарных систем с трехкратным (300%-м) резервом (см. рис. 4). Это говорит о том, что встроенные средства диагностики современных многопроцессорных и многоядерных систем, которые реагируют не на функциональный, а на аппаратный отказ, в (30–50) % случаях признают работоспособную по отношению к данной программе систему неработоспособной.

Такие уникальные характеристики системы обеспечения живучести процессоров в ассоциативной памяти достигнуты за счет:

- системных микропрограммных средств локализации и идентификации отказов, работающих в темпе близком к реальному времени и с точностью до координаты бит-процессора и (не)реализуемой бит-инструкции;

- высокого функционального полиморфизма, характерного для контекстно-зависимых грамматик, что позволяет оперативно перераспределять однородный аппаратный ресурс между операционными, коммутационными, управляющими и интерфейсными функциями;

- эффективных средств автоматического (пере)размещения функциональных микропрограмм *толерантно* действующей в бит-матрице *карте отказов* (см. рис. 5)

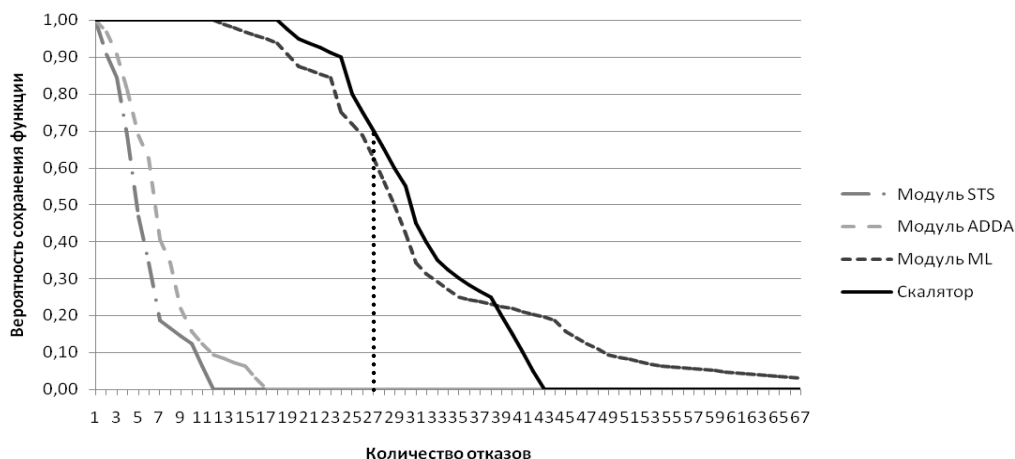


Рис. 3. Распределение вероятности парирования отказов в «скаляторе»

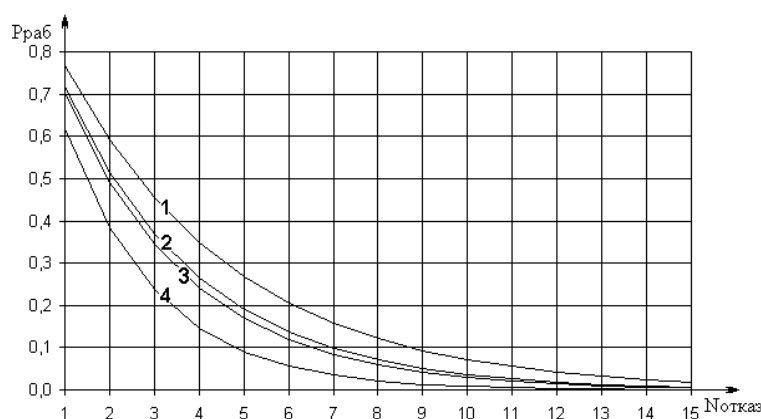


Рис. 4. Вероятность сохранения работоспособности операционных модулей от количества одновременных индифферентных отказов в бит-матрице для: медианного фильтра (1); умножителя (2); делителя (3); сумматора-накопителя (4)

5. Конкурентные преимущества технологий процессоров в ассоциативной памяти

Натурные исследования гибридной технологии «процессоров в ассоциативной памяти» показали, что их конкурентные преимущества обеспечиваются невоспроизводимым другими средствами *структурно-параметрическим методом* передачи, хранения и преобразования информации, который открывает новые возможности за счет конструктивного использования:

- а) дуализма между потоками команд и данных при их ассоциативном взаимодействии, а также адаптивной разрядной сетки, которая является основой вычислительной устойчивости гибридных RISC- и DSP-архитектур;
- б) криптографической защиты данных не только при их хранении и передаче, но и при обработке в «облачных» вычислениях;
- в) полного совмещения в пространстве и во времени процессов хранения, передачи и обработки информации (идеальный процессор в памяти) в суперкомпьютерах;
- г) «нечисленной» обработки численной информации повышенной прецизионности в ассоциативных вычислениях;



д) инвариантности цифровой и аналоговой формам хранения и преобразования информации, а также термального синтеза и регенерации в квазиреальном масштабе времени гетероструктур в *супрамолекулярных и квантовых* вычислителях.

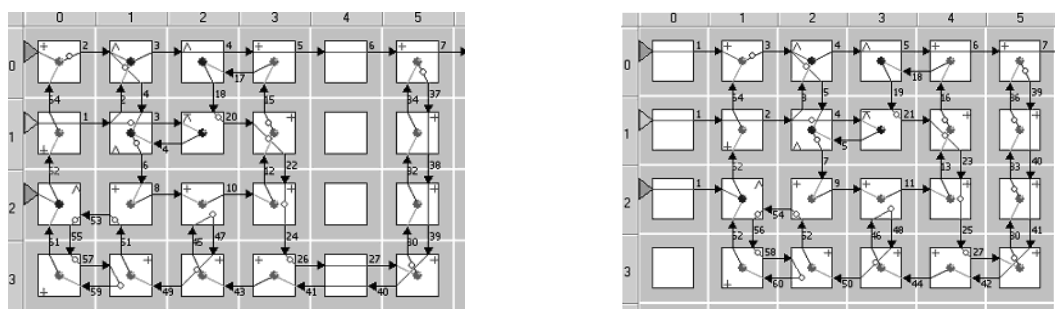


Рис. 5. Аффинные преобразования топологии микропрограмм при их толерантном (пере)размещении на бит-матрице

Особенности хранения и преобразования информации в квантовых структурах не являются принципиально новыми для вычислений, основанных на контекстно-зависимых грамматиках, которые в нашей стране уже апробированы на практике. В результате Россия уже обладает не только фундаментальными, но и проектно-конструкторскими разработками, учитывающими особенности работы аппаратуры в квантовом диапазоне, главной из которых является тот факт, что *отказ* необходимо рассматривать не как *артефакт*, а как *атрибут*.

Выводы

1. Ограничиваясь только программами импортозамещения *догнать* конкурентов в традиционных информационных технологиях *нельзя*, но их можно *встретить*, решая задачи импортонезависимости, где Россия уже имеет стратегическое преимущество в решении проблем *инструктированного синтеза* ассоциативных нанометровых, атомарных и супрамолекулярных вычислительных структур.

2. У предприятий ОПК и организаций Минобороны России достаточно профессиональной и правовой компетенции для формирования и проведения научно-технической политики, которая направлена на завоевание импортонезависимости в области информационных технологий. Технологическое отставание, финансовые ограничения и некомпетентность государственного бюрократического аппарата не могут служить основанием для отказа от решения практических задач в этой области.

3. Апробированный на практике витасистемный подход к решению крупномасштабных проблем в области обороны и национальной безопасности [8] говорит о том, что России для обеспечения импортонезависимости МЭВТИТ необходимо:

а) критично оценить причины тщательно скрываемого системного кризиса в информационных технологиях, где США далеко не бескорыстно навязывают всему миру критерии оценки эффективности и программно-аппаратные средства их достижения;

б) разработать *многоцелевую междисциплинарную программу* (дорожную карту), координирующую фундаментальные, прикладные и технологические исследования по созданию импортонезависимых вычислительных технологий и инфраструктур их поддержки и развития, ориентированные на локализацию производства и использования микроэлектронных компонент на территории Российской Федерации на рубеже 2020–2023 г.г.;



в) провести в течение 20–30 лет *устойчивую* научно-техническую и *протекционистскую* финансово-экономическую политику, обеспечивающую переход к информационным технологиям, комплексно использующим потенциал контекстно-свободных и контекстно-зависимых грамматик, последние из которых составляют основу жизнедеятельности всех организмов.

Литература

1. Елена Ларина, Владимир Овчинский. США: Смена правил игры. Третья инициатива оборонных инноваций 2014. URL: <http://www.dynacon.ru/content/articles/4478/> (дата обращения: 12.12.2015).
 2. «Federal Plan for High-End Computing. Report of the High-End Computing Revitalization Task Force,» Washington, D.C., May, 2004. [Online]. https://www.nitrd.gov/pubs/2004_hecrtf/20040510_hecrtf.pdf 72 с.
 3. Володин В.В., Горшков Ю.В., Павлов А.М./Под общей редакцией академика РАН Е.А. Федосова, «Программа JSF и ее влияние на авионику боевых самолетов 5-го поколения. (Аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников),» М., 2000.
 4. Вычислительные наноструктуры (в 2-х томах: т.1 – Задачи, модели, структуры; т.2 – Инструментальные платформы). /Под ред. Г.М. Алакоза, – М.: ИНТУИТ–БИНОМ, 2010.
 5. ARM Cortex-A7 MPCore [Электронный ресурс] [2015]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ARM_Cortex-A7_MPCore (дата обращения: 13.12.2015).
 6. Алакоз Г.М., Белоглазов И.Н., Коллеганов М.М., Светлов Р.В., Эмпирическая оценка вычислительной устойчивости и отказоустойчивости бортовых вычислителей стереоскопических навигационных систем. Нейрокомпьютеры: разработка и применение, № 5, 2009. С. 12–24.
 7. Алакоз Г.М., Попов А.А., MIMD-бит-поточковые технологии для отказоустойчивых сверхпараллельных субпроцессорных трактов бортовых вычислительных систем. Авиакосмическое приборостроение, № 10, 2007. С. 19–30.
- Алакоз Г.М., Аюпов А.И., Нестеров В.А., Обносков Б.В., Пляскота С.И., Староватов О.П. Трусков В.Н. Витасистемы: модели инженерного творчества/Под ред. Г.М Алакоза. М.: «Дашков и К°», 2015.