

На правах рукописи

**Ким Олег Хонбинович**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПРОГРАММИРУЕМОГО КОММУТАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем  
управления

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

**Научный руководитель** — доктор технических наук профессор  
**Солдатов Алексей Иванович**

**Официальные оппоненты:** **Мухопад Александр Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» Иркутского государственного университета путей сообщения

**Мыцко Евгений Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета

**Ведущая организация** — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «31» марта 2022 года в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.03, созданного на базе ТУСУРа, по адресу: 634050. г.Томск, пр.Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТУСУРа по адресу г.Томск, ул.Красноармейская, 146, и на официальном сайте ТУСУРа по ссылке: <https://postgraduate.tusur.ru>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Костюченко Евгений Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Стремительное усложнение современных технических комплексов и острейшая конкуренция на мировом рынке выдвигают все более высокие требования к технико-экономическим характеристикам и свойствам оснащающих их электронных систем (ЭС). В настоящее время разработчики поставлены перед проблемами создания ЭС 5-го технологического уклада для космических, воздушных, надводных и подводных технических комплексов. Основные требования к техническим характеристикам и свойствам ЭС для перечисленных технических комплексов – это обеспечение в совокупности сверхвысоких технико-экономических характеристик: производительности, надежности, компактности и стоимости; самовосстановление технического состояния на «мелкозернистом уровне» в режиме on-line с маскированием большого количества отказов за счет реконфигурации электронной схемы с сохранением выполняемой функции.

Проблемами создания современных реконфигурируемых ЭС занимаются многие научные коллективы. В НИИ МВС им. А.В. Каляева (ЮФУ) коллектив ученых во главе с Каляевым И.А., разрабатывают реконфигурируемые вычислительные системы (РВС) на базе микросхем ПЛИС, соединенных в регулярную структуру. Алакоз Г.М. и Аюпов А.И. предложили бит-матричную программно-аппаратную платформу импортонезависимой вычислительной технологии «процессоров в ассоциативной памяти». Специалисты компании Intel разработали процессор с новой архитектурой, которая названа «конфигурируемый пространственный акселератор» (CSA, Configurable Spatial Accelerator), который содержит элементарные процессоры и систему коммутации, обеспечивающую соединения между элементарными процессорами. Каравай М.Ф. и Подлазов В.С. (ИПУ РАН) предложили новый метод создания сетей с логическими функциями квази-полного графа. Научный коллектив НИ ТГУ (г. Томск) во главе с Матросовой А.Ю. и Останиным С.А. ведут исследования в направлении создания высокоэффективных, коротких тестов, в том числе для непредусмотренных задержек путей.

По достигнутым к настоящему времени результатам можно констатировать, что создание современных ЭС связано с решением сложнейшего комплекса технологических и алгоритмических проблем. Главным источником проблем является существующая парадигма создания ЭКБ с совместным расположением элементов (чипов) и электрических

проводников на «жесткой конструктивной среде». По этой причине, по мере повышения уровня технологии, уровня интеграции и частоты тактовых импульсов размерность и сложность объекта нелинейно нарастает, усложняя все проблемы и задачи проектирования, диагностики, производства и эксплуатации. Для нивелирования этого источника проблем необходимо создание 3D-базовых конструкций ЭКБ с отдельным размещением чипов и межчиповых соединений. Для обеспечения высокой производительности, высокой отказоустойчивости (при широком классе рассматриваемых неисправностей) требуется введение «избыточности»: аппаратной, программной и временной. Совокупная реализация разных целей реконфигурации в рамках одной электрической схемы приводит к общему усложнению функций коммутации в электрической схеме; требования обеспечения в ЭС самовосстановления приводит к дополнительному усложнению функций коммутации. Оно связано с необходимостью введения в электрические схемы ЭКБ резервных чипов, схем контроля и проведением процедур по локализации дефектного чипа с последующим отключением и заменой на идентичный резервный чип.

Поэтому, разработка трехмерного программируемого коммутационного устройства (ПКУ), имеющего единый механизм достижения разных целей реконфигурации и позволяющего создать 3D-базовые конструкции ЭКБ с отдельным размещением чипов и межчиповых соединений, является **актуальной** темой.

### **Цель и задачи исследований:**

Целью работы являются разработка и исследование универсального бесконфликтного и компактного трехмерного программируемого коммутационного устройства.

В соответствии с целью исследований сформулированы следующие **задачи:**

1. Провести аналитический обзор существующих систем коммутации.
2. Определить основные требования к ПКУ.
3. Разработать бесконфликтное и компактное ПКУ.
4. Исследовать возможности ПКУ.
5. Разработать макетный образец и программное обеспечение ПКУ.
6. Провести экспериментальные исследования макетного образца ПКУ.

### **Методы исследования:**

Базируются на общих положениях теории: системного анализа; математического моделирования и анализа электронных схем; разработки аппаратного и программного обеспечения.

### **Научная новизна**

1. Разработана новая концепция построения трехмерного ПКУ, отличающаяся использованием двух групп матричных коммутаторов меньшей размерности, в которых  $i$ -е ГШ первой группы матричных коммутаторов соединяются с соответствующими ВШ  $i$ -го матричного коммутатора второй группы,
2. Разработана новая концепция построения трехмерного ПКУ, отличающаяся от аналогов бесконфликтным выполнением электрических соединений между любыми  $N$  выводами в трехмерном пространстве с количеством последовательно соединенных ключей равном 2 или 4.
3. Разработана новая концепция построения трехмерного ПКУ, отличающаяся от матричного коммутатора для того же числа внешних выводов уменьшенной аппаратной избыточностью в  $\frac{\sqrt{N}}{3}$ .
4. Предложены варианты расширения сферы использования бесконфликтного, компактного трехмерного ПКУ для создания:
  - универсальной гетерогенной электрической схемы (УГЭС) на реальных чипах, способной обеспечить совокупное достижение разных целей реконфигурации;
  - 3D-базовых конструкций ЭКБ с отдельным размещением чипов и межчиповых соединений.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Новая концепция построения трехмерного ПКУ, основанная на использовании двух групп матричных коммутаторов меньшей размерности, в которых  $i$ -е ГШ первой группы матричных коммутаторов соединяются с соответствующими ВШ  $i$ -го матричного коммутатора второй группы, позволяет уменьшить избыточность ключей в  $\frac{\sqrt{N}}{3}$  раз по сравнению с матричным коммутатором для того же числа  $N$  внешних выводов и обеспечить выполнение любых электрических соединений по принципу «вывод-вывод» на множестве внешних выводов в трехмерном пространстве с количеством последовательно соединенных ключей равном 2 или 4.
2. Предложенная структура трехмерного ПКУ позволяет обеспечить бесконфликтность выполнения электрических соединений на всем множестве  $N$  внешних выводов.
3. Предложенная структура трехмерного ПКУ позволяет уменьшить размеры периметра кристалла чипа более чем в  $\frac{\sqrt{N}}{4}$  раз за счет взаимно-

ортогонального расположения первой и второй групп матричных коммутаторов, сотового расположения внешних выводов ПКУ и уменьшения аппаратной «избыточности».

**Достоверность** полученных результатов подтверждается экспериментальными данными, полученными при внедрении и практическом использовании внедренных устройств, а также сравнением с результатами работ других авторов.

### **Внедрение результатов диссертационной работы**

Результаты диссертационного исследования внедрены на предприятии АО «НЗПП с ОКБ» (г. Новосибирск), а также используются в учебном процессе в Томском политехническом университете при проведении лабораторных работ по курсам «Цифровая электроника» и «Основы микропроцессорной техники».

### **Теоретическая значимость работы**

1. Получено соотношение для определения коэффициента уменьшения аппаратной избыточности для предложенной структуры ПКУ,
2. Приведено доказательство того, что в предлагаемом способе коммутации количество разных путей между двумя любыми выводами равно  $N/2$ .
3. Приведено доказательство бесконфликтности выполнения электрических соединений предложенной структуры ПКУ.

### **Практическая значимость работы**

Предложенная структура трехмерного ПКУ позволяет на основе новой парадигмы создавать ЭКБ 3D-интеграции с отдельным размещением чипов и межчиповых соединений. Микросхема ПКУ на основе новой концепции построения ПКУ позволит существенно улучшить технические характеристики и свойства ЭКБ и ЭС.

Важным практическим применением микросхемы ПКУ является возможность создания инструментальных средств быстрого и бездефектного проектирования электронных схем ЭКБ и ЭС на базе физического моделирования. Возможность прямого доступа к произвольным точкам схемы через ПКУ существенно упрощает процедуры поиска и устранения возникающих неисправностей, особенно в области выявления не предусмотренных задержек путей распространения цифровых сигналов, и также задач разработки высокоэффективных и коротких тестов для широкого (реального) класса неисправностей.

### **Апробация научных результатов и публикации**

Основные результаты настоящей диссертационной работы опубликованы в 17 работах, из них: в рецензируемых журналах из перечня ВАК – 2, в журналах индексируемых в базах Scopus и Web of science – 3, в материалах конференций опубликовано – 5 работ, также получено 7 авторских свидетельств и патентов на изобретения РФ.

**Личный вклад.** Автором лично сформулировал цели и задачи исследования, предложил новую концепцию построения трехмерного ПКУ. В составе творческого коллектива принимал участие в изготовлении макетного образца универсального трехмерного ПКУ, предложил технические решения базовых конструкций ЭКБ с отдельным размещением чипов и межчиповых соединений, в том числе с сотовым расположением выводов, на основе расположения выводов ПКУ.

### **Содержание работы**

**Во Введении** обосновывается актуальность работы, формулируется ее цель, показывается научная новизна и практическая значимость результатов, приводится краткое содержание работы по главам.

**В первой главе** приводится обзор и анализ современного уровня и основных трендов развития ЭКБ и ЭС. В проведенном анализе отмечается, что основным источником образования технологических и алгоритмических проблем в ЭКБ является существующая парадигма создания ЭКБ с совместным расположением чипов и межчиповых электрических проводников на «жесткой, не программируемой конструктивной среде» - на плоскостной 2D или пространственной 3D-базовой конструкции в микросхеме или на печатной плате.

В проведенном анализе отмечается, что в основе трех архитектур процессоров с конфигурируемым аппаратным обеспечением лежат программно-конфигурируемые аппаратные среды, в которых элементарные ячейки разного исполнения и уровня интеграции соединены в плоскостную регулярную структуру. В ПЛИС-процессоре элементарная ячейка выполнена в виде конфигурируемого логического блока (CLB), содержащего триггер, логические элементы И, ИЛИ и др. В бит-поточном субпроцессоре элементарными ячейками являются микросхемы H1841 ВФ1. В процессоре CSA элементарными ячейками являются сетки вычислительных и запоминающих устройств (СВЗУ), содержащие элементарные процессоры (PE, processing elements), запоминающие устройства и систему коммутации. Программированием структуры элементарных ячеек и электрических соединений между ячейками осуществляется настройка программно-конфигурируемой аппаратной среды на реализацию конкретного алгоритма

вычислительной задачи. Отмечается, что во всех известных архитектурах процессоров с конфигурируемым аппаратным обеспечением применена концепция построения ПКУ, используемая в ПЛИС-технологии и FPLD-технологии. Все известные архитектуры процессоров с конфигурируемым аппаратным обеспечением обладают высокой аппаратной «избыточностью».

Отмечается, что главные недостатки существующих и новых вариантов реализации процессоров и ЭС с программно-конфигурируемым аппаратным обеспечением предопределены недостатками ПКУ ПЛИС-технологии FPLD-технологии, вызванными необходимостью трассировки электрических соединений через макроячейки на плоскостной регулярной структуре. Отмечается также, что существенным недостатком этих систем коммутации является сложность задачи программирования соединений, которая относится к NP-задачам, не имеющих точного решения и осуществляется на САПР высокого уровня.

В качестве вывода утверждается, что для разработки ЭС с техническими характеристиками и свойствами, востребованными в современных технических комплексах, необходима разработка ПКУ, имеющего единый механизм реализации разных целей реконфигурации, обладающего уменьшенной аппаратной избыточностью, бесконфликтностью, малыми габаритами и низким энергопотреблением. В частности, позволяющей создать 3D-базовые конструкции ЭКБ с отдельным размещением чипов и межчиповых соединений.

**Во второй главе** изложены основные принципы создания новой концепции построения трехмерного ПКУ, позволяющего создать чип бесконфликтного, отказоустойчивого и компактного ПКУ. Новая концепция построения трехмерного ПКУ заключается в использовании двух групп матричных коммутаторов уменьшенной размерности, в которых  $i$ -е горизонтальные шины (ГШ) верхней группы матричных коммутаторов соединяются с соответствующими вертикальными шинами (ВШ)  $i$ -го матричного коммутатора нижней группы, что позволяет обеспечить выполнение любых электрических соединений по принципу «вывод-вывод(и)» на множестве внешних выводов.

Пример структуры предлагаемого трехмерного ПКУ, содержащего 16 внешних выводов, приведен на рис.2. Внешние выводы трехмерного ПКУ представлены группами ВШ первой группы матричных коммутаторов K1.1, K1.2, K1.3 и K1.4. Основным отличием новой концепции построения трехмерного ПКУ от прототипа является перенос выполнения процедуры



трассировки электрических соединений в трехмерное пространство, с использованием двух групп матричных коммутаторов.

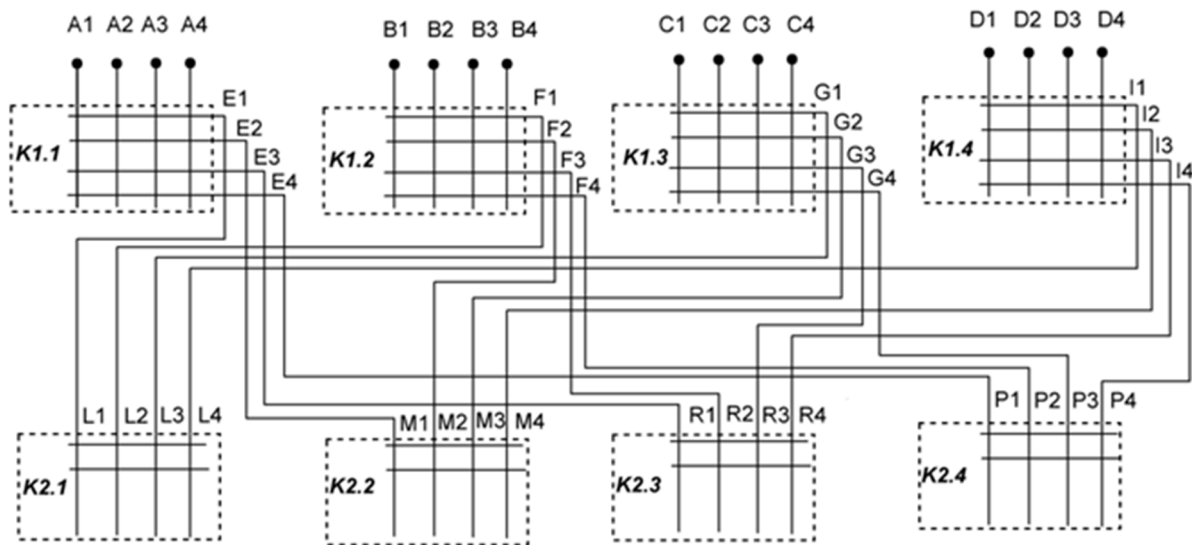


Рис. 2. Трехмерная ПКУ на 16 внешних выводов

Если соединяемые выводы принадлежат одному матричному коммутатору первой группы K1.1, K1.2, K1.3 и K1.4, то электрическое соединение выполняется внутри этого матричного коммутатора с количеством последовательно соединенных ключей равно 2 (рис. 3).

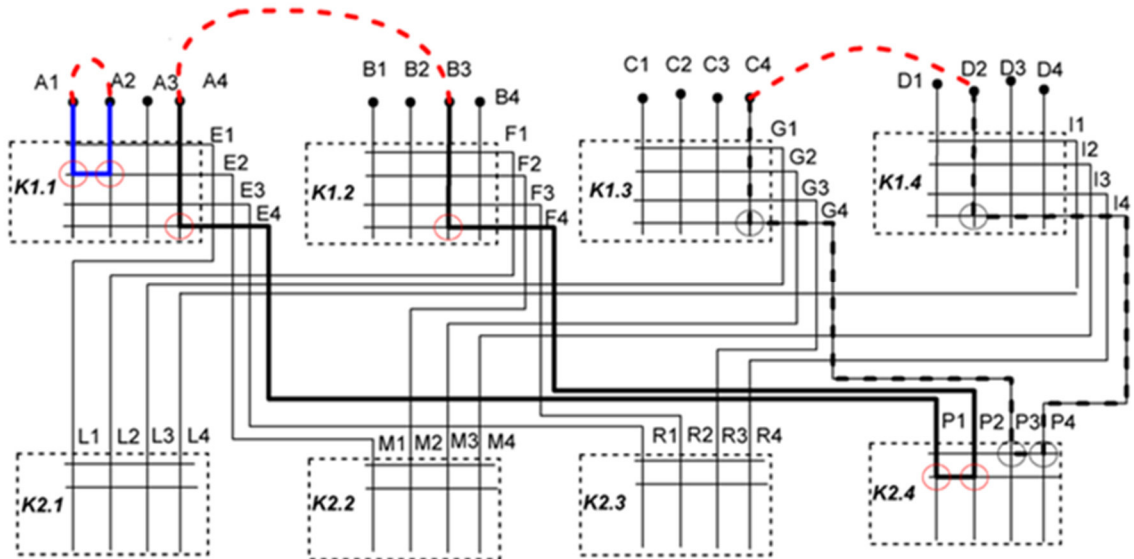


Рис. 3. Пример соединения внешних выводов

Если соединяемые выводы принадлежат разным матричным коммутаторам первой группы K1.1, K1.2, K1.3 и K1.4, то электрическое соединение выполняется с использованием матричного коммутатора второй группы. При этом количество последовательно соединенных ключей равно 4. При равных задержках электрических сигналов в одном ключе, в предлагаемом трехмерном ПКУ обеспечиваются меньшие задержки

электрических сигналов по сравнению с ПЛИС системами, т.е., достигаются значительно лучшие частотные и другие электрические характеристики реализуемых электрических цепей.

**Бесконфликтность трехмерного ПКУ.** На множестве из  $N$  внешних выводов трехмерного ПКУ могут быть всегда выполнены  $N/2$  любых электрических цепей, содержащих по 2 вывода. Для примера исследуем ПКУ на 16 выводов (рис.4). Т.е. рассматривается вариант со 100% использованием ресурсов трехмерного ПКУ по количеству реализуемых цепей.

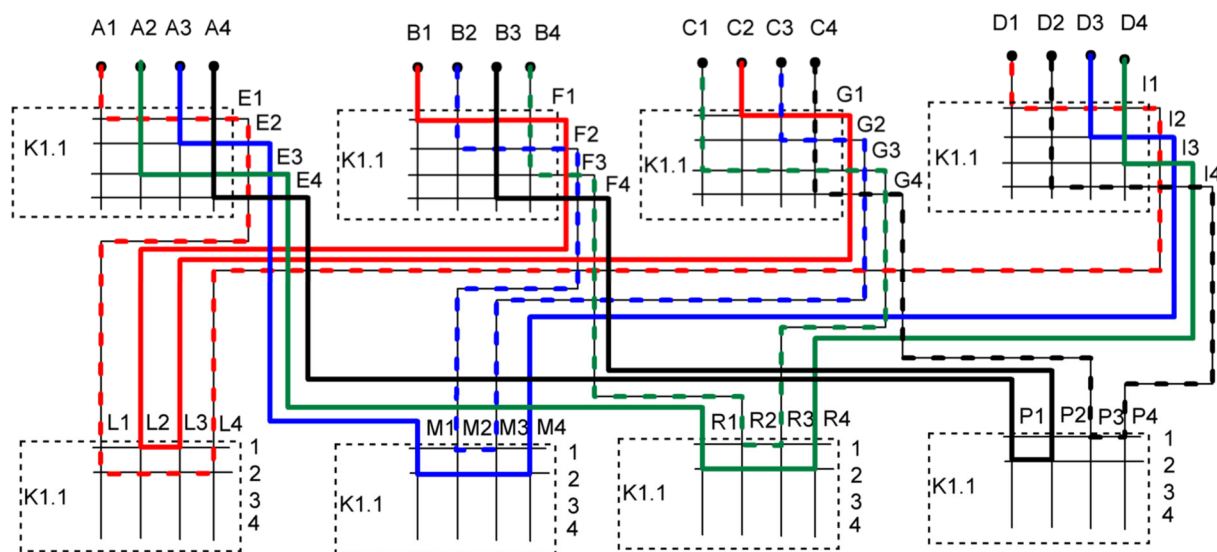


Рис. 4. Пример бесконфликтности соединения 8 электрических цепей

Для доказательства бесконфликтности трехмерной ПКУ выделены два утверждения:

**Утверждение 1:** Предлагаемый способ коммутации является бесконфликтным.

**Доказательство:** Рассмотрим худший случай, когда требуется соединить пары из  $N$  выводов, где: соединяемые выводы принадлежат разным коммутаторам первой группы, а  $N$  четное число.

Множества рассматриваемых пар выводов попарно не пересекаются. Таких множеств  $N/2$ . Для реализации соединения всех пар выводов требуется  $N/2$  горизонтальных шин второй группы матричных коммутаторов. Столько же горизонтальных шин имеется в коммутаторах второй группы. Выполняем соединение первой пары, занимая одну из горизонтальных шин первого матричного коммутатора второй группы. После соединения первой пары, одна горизонтальная шина оказывается занятой, а  $(N/2 - 1)$  свободными. Выполняем соединение следующей пары, занимая среди свободных горизонтальных шин очередную свободную шину и т.д., пока не будут

выполнены все соединения. При таком алгоритме всегда обеспечивается выполнение всех  $N/2$  пар соединений.

**Утверждение 2:** В предлагаемом способе коммутации количество разных путей между двумя любыми выводами равно  $N/2$ .

**Доказательство:** Рассмотрим худший случай, когда требуется соединить пары из  $N$  выводов, где соединяемые выводы принадлежат разным коммутаторам первой группы, а  $N$  четное число.

Соединение между любой парой выводов может быть осуществлено на любом (одном) матричном коммутаторе второй группы, количество которых равно  $N/2$ .

**Компактность трехмерного ПКУ.** Взаимно ортогональное размещение двух групп матричных коммутаторов (рис. 5) сводит выполнение всех электрических соединений между ГШ 1-й группы матричных коммутаторов и ВШ 2-й группы матричных коммутаторов к выполнению соединений по принципу «вывод-вывод» при минимальных затратах полезной площади кристалла. В предложенной конструкции, ВШ матричных коммутаторов первой группы, образующие внешние соединительные выводы ПКУ, естественным образом приобретают сотовое расположение выводов, которое позволяет уменьшить размеры периметра кристалла в  $\frac{\sqrt{N}}{4}$  раз по сравнению со способом расположения выводов по периметру кристалла.

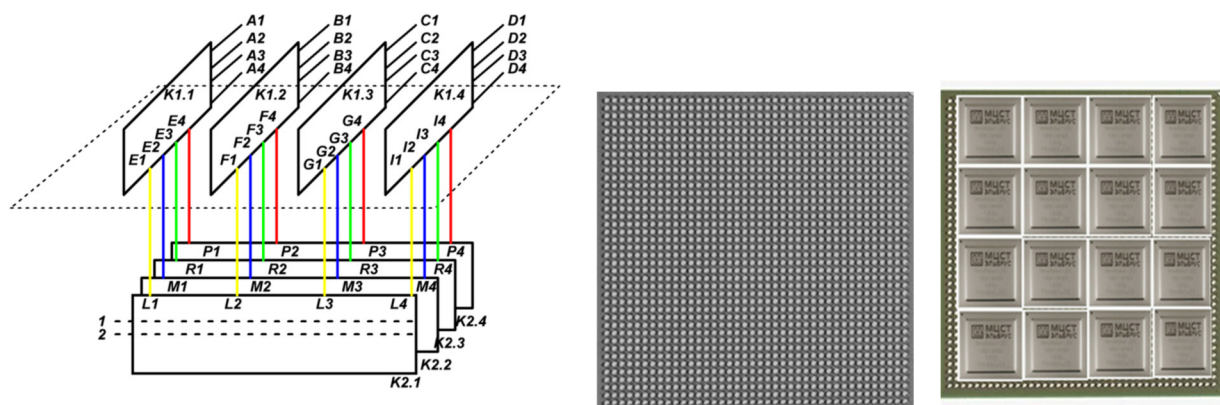


Рис. 5. Пространственное расположение двух групп матричных коммутаторов

**Важно отметить следующее:** Впервые достигнута возможность создания базовых конструкций ЭКБ 3D-интеграции с сотовым расположением внешних выводов.

Повышение компактности трехмерной ПКУ также обеспечивается многократным сокращением аппаратной избыточности: количества ключей и схем управления ключами и позволяет уменьшить избыточность ключей в  $\frac{\sqrt{N}}{3}$

раз по сравнению с матричным коммутатором такой же размерности. Количество ключей в матричном коммутаторе, содержащем  $N$  внешних выводов равно:

$$C_2 = N \binom{N}{2} = \frac{N^2}{2} \quad (1)$$

Количество ключей в предлагаемого трехмерного ПКУ равно:

$$C_1 = n \cdot (n \cdot n) + n \cdot \binom{n \cdot n}{2} = 1.5 \cdot n^3 = \frac{3}{2} \sqrt{N^3} \quad (2)$$

где  $n$  – количество внешних выводов используемых матричных коммутаторов,  $N$  – количество внешних выводов, используемых для подключения внешних устройств, которое равно количеству внешних выводов обычного матричного коммутатора,  $n = \sqrt{N}$ .

Коэффициент уменьшения избыточности:

$$C = \frac{C_2}{C_1} = \frac{\frac{N^2}{2}}{\frac{3}{2} \sqrt{N^3}} = \frac{\sqrt{N}}{3} \quad (3)$$

Графическая зависимости параметра  $C$  от количества внешних выводов  $N$ , рассчитанная по формуле (3) представлена на рис.6.

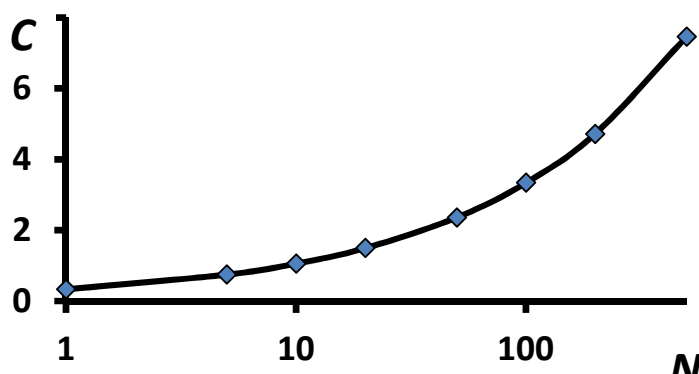


Рис. 6. График зависимости параметра  $C$  от количества внешних выводов  $N$

Из графика (рис. 6) следует, что при увеличении количества внешних выводов  $N$  относительное сокращение объема аппаратуры увеличивается.

**В третьей главе** приводится описание макетного образца трехмерного ПКУ и учебно-исследовательского комплекса УИК-1 (рис.7). УИК-1 имеет следующие технические характеристики:

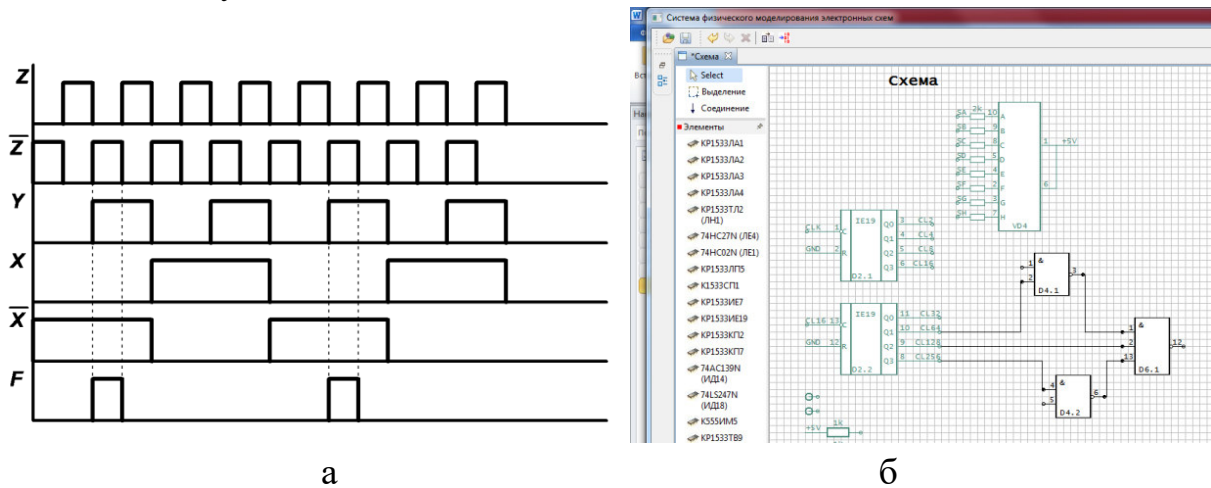
Количество внешних выводов – 128, коммутация внешних выводов по принципу, «любой на любой», рабочая частота – 2 МГц, микроконтроллеры – AVR и MCS51, интерфейсы: RS-232 и RS-485, выход для управления шаговым двигателем. питание – сеть 220 В, 50 Гц.



а б  
Рис. 7. Учебно-исследовательский комплекс УИК-1,  
а – электронный блок, б – интерфейс пользователя

Для проведения экспериментальных исследований была выбрана произвольная функция трех переменных:  $F = \bar{X}Y\bar{Z}$ , где  $X$  - старшая переменная,  $Y$  - средняя переменная,  $Z$  - младшая переменная,  $\bar{X}$  - инверсия старшей переменной,  $\bar{Z}$  - инверсия младшей переменной.

Диаграммы переменных и функции приведены на рис.8.а. На рис.8.б показана электрическая схема, реализующая эту функцию, выполненная в программном интерфейсе. Две функции инверсии выполнили на элементах D4.1 и D4.2. Функция конъюнкции выполнена на элементе D6.1.



а б  
Рисунок 8 – График функции трех переменных (а), схемная реализация (б)

Для генерации входных переменных использовались три разряда двоичного счетчика, это обеспечило получение полного набора возможных комбинаций трех переменных. Программирование соединений с помощью коммутационной среды осуществлялось последовательно с контролем количества включенных ключей. Вначале осуществили соединение выход логического элемента DD4.2 и третий вход логического элемента DD6.1 и проверили правильность полученного соединения, открыв матрицу ключей, в которой показаны номера ключей участвующих в формировании соединения.

На рис.9.а показан пример одного соединения и матричные коммутаторы с включенными ключами, обозначенными цифрами 1 и покрашены голубым цветом. Таким образом соединение содержит четыре включенных ключа.

Проверка правильности функционирования полученной схемы заключалась в анализе функции, полученной на выходе схемы. Диаграмма функции на выходе схемы, снятая осциллографом совпала с теоретической.

Исследование динамических параметров схемы показало, что длительность фронта и спада выходной функции увеличилась в два раза по сравнению с аналогичными параметрами входных переменных. Это объясняется наличием сопротивления открытого ключа и распределенной емкости.

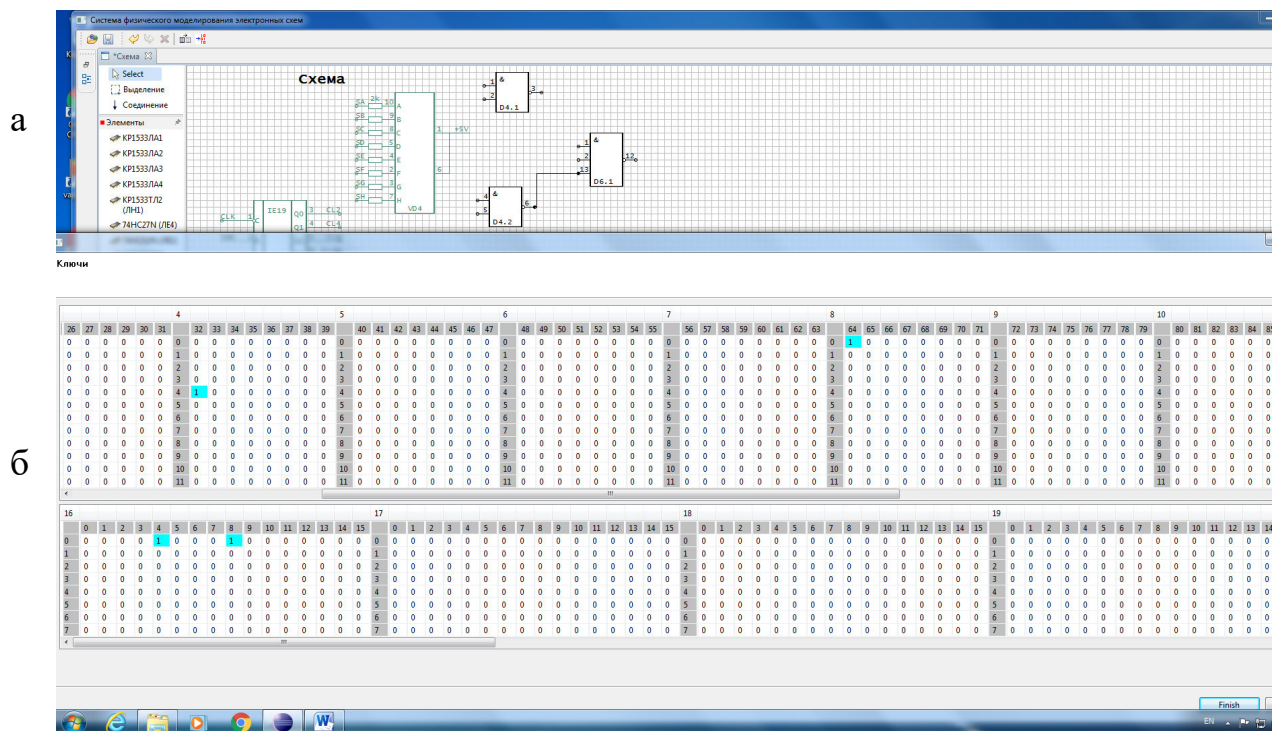


Рисунок 9 – Принципиальная схема первого соединения и матрицы ключей, с замкнутыми ключами (выделены голубым цветом)

**В четвертой главе** приводятся следующие перспективные направления исследований на базе разработанного трехмерного ПКУ:

1. Создание конкурентной отечественной ЭКБ, не выходя из достигнутого отечественной отраслью уровня технологии. Предложенная структура ПКУ позволяет использовать новую концепцию создания ЭКБ 3D-интеграции с отдельным размещением чипов и межчиповых соединений, включающую:

- а) Создание импортонезависимых, унифицированных и упрощенных базовых конструкций и технологий ЭКБ 3D-интеграции;

б) Создание УГЭС на реальных чипах с возможностью реконфигурации электрической схемы.

2. Создание суперкомпьютеров с конфигурируемым аппаратным обеспечением и потоковой обработкой данных (прототип – первый эксафлопсный суперкомпьютер Aurora 21 на процессорах CSA компании Intel (2021 г.)).

Перспективность исследований в данном направлении подтверждается анализом и прогнозом на развитие ЭС до 2035 г. Возможность достижения прорывных результатов в этом направлении в сравнении с прототипом, связана с решением двух «ключевых» проблем:

а) Созданием менее «избыточной» аппаратной платформы.

б) Созданием системы коммутации на базе трехмерного ПКУ с реконфигурацией аппаратного обеспечения ЭКБ и ЭС по математической формуле реализуемой вычислительной задачи.

3. Создание кластерных МВС.

Возможность достижения прорывных результатов в этом направлении связана с решением «ключевой» проблемы - разработки бесконфликтного, отказоустойчивого кросс-бара большой размерности для процессорных узлов и кросс-маршрутизаторов, например до  $(64 \times 64) \dots (128 \times 128)$  и более.

4. Создание инструментальных средств быстрого и бездефектного проектирования ЭКБ и ЭС на базе физического моделирования.

Возможность достижения прорывных результатов в этом направлении связана с созданием на базе УГЭС высокоточных физических моделей с применением реальных микросхем. Это позволит значительно упростить задачи проектирования и диагностики. Возможность прямого доступа к произвольным точкам схемы через ПКУ существенно упрощает процедуры поиска и устранения возникающих неисправностей, особенно в области выявления задержек путей распространения цифровых сигналов, и также задач разработки тестов для широкого (реального) класса неисправностей.

### **Основные результаты работы**

В диссертационной работе были проведены теоретические и экспериментальные исследования по разработке бесконфликтной, отказоустойчивой и компактной трехмерной ПКУ.

1. Разработана новая концепция построения трехмерной ПКУ, позволяющего обеспечить выполнение любых электрических соединений по принципу «вывод-вывод(и)» на множестве  $N$  внешних выводов в трехмерном пространстве с количеством последовательно соединенных ключей во всех электрических соединениях равном 2 или 4.

2. На базе новой концепции предложена структура чипа бесконфликтного, отказоустойчивого и компактного трехмерного ПКУ, которая допускает подключение к внешним соединительным выводам различных реальных электронных компонентов и радиоэлементов и обеспечивает бесконфликтное выполнение межчиповых соединений путем программирования ПКУ.

3. Детально исследованы достигаемые электрические характеристики разработанной трехмерной ПКУ, в том числе:

- Возможности обеспечения бесконфликтности выполнения электрических соединений между выводами электронных компонент с количеством последовательно соединенных ключей в электрических соединениях равном 4 или 2;

- Возможности обеспечения компактности ПКУ при интегральном исполнении за счет уменьшения периметра кристалла более чем в  $\frac{\sqrt{N}}{4}$  раз за счет взаимно-ортогонального расположения верхней и нижней групп матричных коммутаторов, сотового расположения выводов ПКУ и уменьшения объема аппаратной «избыточности»;

4. Предложены наиболее перспективные области практического применения разработанного бесконфликтного, отказоустойчивого и компактного трехмерного ПКУ, в которых могут быть получены «прорывные» результаты.

#### *Рекомендации*

Предложенная концепция построения программируемого коммутационного устройства может быть использована при проектировании коммутаторов практически любой размерности. При этом чем больше внешних выводов у коммутатора, чем меньше аппаратная избыточность и выше компактность по сравнению с обычным матричным коммутатором.

#### *Перспективы дальнейшей разработки темы*

Детальное исследование свойств предложенного ПКУ в перспективных областях практического применения, изложенных в четвертой главе.

### **Публикации по теме диссертационной работы**

#### *Публикации в журналах рекомендованных ВАК*

1. О.Х. Ким, А.И. Солдатов. Технические и алгоритмические проблемы коммутации современной электроники \ Известия высших учебных заведений. Физика, 2010 - т. 53, - № 9/3. - с. 308-311.



2. О.Х. Ким, А.И. Солдатов, А.А. Солдатов, М.А.Костина, Г.Н.Нариманова. Бесконфликтный, отказоустойчивый и компактный программируемый коммутатор \ Доклады ТУСУР, 2021, Т.24, №3, с. 12-17.

*Публикации, индексируемые в SCOPUS и WOS*

3. Kim Oleg H., Soldatov Alexey I., Matrosova Anzhela Yu., Soldatov Andrey A., Kostina Mariya A. Programmable switching area // Tomsk State University Journal of Control and Computer Science. 2020. № 50. P. 114–122.

4. Kim O.H., Asadchiy A. V., Soldatov A.I., Soldatov A.A, (2020) Evaluation of the amount of RAM in the monitoring of technical objects // Tomsk State University Journal of Control and Computer Science, 2020, №52, с. 104-113.

5. Kim, O.H., Asadchiy, A.V., Soldatov, A.I., Soldatov, A.A. Optimization of frequency discretization for diagnostic information at diagnostics of technical objects \ Journal of Physics: Conference Series 2020, 1499(1),012012. DOI: 10.1088/1742-6596/1499/1/012012

*Прочие публикации*

6. А. И. Солдатов, О.Х. Ким. Цифровые технологии обучения студентов электронике на лабораторном стенде «УИК-1». Современные тенденции развития непрерывного образования: вызовы цифровой экономики. Материалы международной научно-методической конференции, 30-31 января 2020. г.Томск. ТУСУР, с.23-24

7. Солдатов А.А., Сорокин П.В., Ким О.Х., Увайсов С.У. Комплекс физического моделирования электронных схем / Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. Материалы международной научно-практической конференции. 2015. Т. 1. с. 449-451.

8. Д.А. Солдатов, Ким О.Х. Национальная электронная компонентная база Современное состояние и перспективы развития \ III Всероссийская научно-практическая конференция «Электронные приборы, системы и технологии», Томск, ТПУ. 22-26 апреля 2013, с.83-89.

9. А.И. Солдатов, О.Х. Ким, А.А. Солдатов, М.А. Костина. Универсальный коммутатор \ Всероссийская научно-методическая конференция «Современные технологии, экономика и образование», Томск, ТПУ, 27-29 декабря 2019, С. 80-93.

10. Солдатов А.И., Ким О.Х., Солдатов А.А., Костина М.А. Проблемы разработки Комплексной Программы развития отечественной микроэлектроники \ Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции «Общество - наука - инновации» (Иркутск, 22.12.2019 г.). – Уфа: АМИ, 2019, С. 80-93.

*Патенты и авторские свидетельства*

11. Патент № 2402061 Российская Федерация, МПК G06F 7/00 (2006.01). Пространственная коммутационная среда (варианты): № 2009109474/08 : заявл. 16.03.2009: опубл. 20.10.2010, Бюл. №29 / Ким О.Х., Пеккер Я.С., Солдатов А.И., Ким Д.М.; заявитель ООО «ХОНБИН». – 6 с.
12. Патент № 2092896 Российская Федерация, МПК G06F 15/163 (1995.01). Коммутационная среда: № 93012283/09: заявл. 09.03.1993: опубл. 10.10.1997 / Ким О.Х.; заявитель Ким О.Х.. – 4 с.
13. Патент № 2270474 Российская Федерация, МПК G06F 7/00 (2006.01). Пространственная коммутационная среда: № 2003102910/09: заявл. 31.01.2003: опубл. 20.02.2006, Бюл. №23 / Ким О.Х., Пеккер Я.С.; заявитель Ким О.Х., Пеккер Я.С. – 5 с.
14. Патент № 2280891 Российская Федерация, МПК G06F 15/163 (2006.01). Коммутационная среда: № 2001133237/09: заявл. 06.12.2001: опубл. 27.07.2003, Бюл. №19 / Ким О.Х.; заявитель Ким О.Х. – 4 с.
15. Авторское свидетельство СССР на изобретение №1353144,. Устройство для резервирования сложного объекта: опубл. 15.07.1987, Бюл. №19 / Ким О.Х., Щербанов В.А., Савчук Г.Г.; заявитель ПО «Контур». – 4 с.
16. Авторское свидетельство СССР на изобретение №1431545,. Самодиагностируемое и самовостанавливаемое устройство: опубл. 31.10.1986, Бюл. №19 / Ким О.Х., Щербанов В.А.; заявитель ПО «Контур». – 4 с.
17. Авторское свидетельство СССР на изобретение №1227030,. Самодиагностируемая и самовостанавливаемая система: опубл. 17.07.1984, Бюл. №19 / Ким О.Х., Щербанов В.А.; заявитель ПО «Контур». – 4 с.

Автор считает необходимым выразить благодарность своему научному руководителю профессору А.И. Солдатову за огромную поддержку, целеустремленность в проведении исследований и постановку части задач, выполненных в данной работе. Также поблагодарить профессора Я.С. Пеккера (НИ ТПУ, СибГМУ), профессора А.Ю. Матросову (НИ ТГУ) и профессора М.Ф. Каравая (зав. Лабораторией технической диагностики и отказоустойчивости ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН) за полезное участие в обсуждениях и дискуссиях относительно полученных результатов. Написание данной работы было бы невозможным без их неоценимой поддержки и опыта.