

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

диссертационного совета Д 002.078.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, по диссертации на соискание ученой степени доктора наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 23.06.2022 № 118

О присуждении **Эннсу Виктору Ивановичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация **«Методы и средства разработки специализированных гетерогенных конфигурируемых интегральных схем для вычислительной техники и систем управления»**, представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» и 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (технические науки)», принята к защите 18.03.2022 г. (протокол № 116) диссертационным советом Д 002.078.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, д. 3. Диссертационный совет создан приказом №714/нк от 02 ноября 2012 г. (с частичными изменениями от 24.06.2013 г. №298/нк, от 23.06.2015 г. №632/нк, от 23.11.2018 г. №301/нк, от 27.03.2019 г. № 272/нк, от 20.11.2019 г. № 1108/нк), от 18.11.2020 г. № 692/нк и от 16.06.2021 г. №590/нк).

Соискатель **Эннс Виктор Иванович**, 20 мая 1955 года рождения, окончил в 1987 году аспирантуру НИИ Микроприборов НПО «ЭЛАС» (124460, г. Москва, Зеленоград, ул. Конструктора Гуськова, дом 1, стр. 1) и в 1988 году защитил

диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Методы построения избыточных БИС ЗУ с использованием помехоустойчивого кодирования» по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» в диссертационном совете на базе НИИ Микроприборов НПО «ЭЛАС». В настоящее время работает в должности заместителя генерального директора акционерного общества «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»).

Диссертация выполнена в акционерном обществе «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники».

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор **Белоус Анатолий Иванович**, специальность 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах», заместитель Генерального директора по научно-техническим программам и научной работе, ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (Республика Беларусь),

- доктор технических наук **Беляев Андрей Александрович**, специальность 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления», начальник лаборатории отдела проектирования систем на кристалле, АО «Научно-производственный центр «Электронные вычислительно-информационные системы»,

- доктор физико-математических наук, профессор **Карпенко Анатолий Павлович**, специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», заведующий кафедрой САПР ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» (АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнева») г. Железногорск, Красноярский край в своем положительном отзыве, подписанном

Главным ученым секретарем НТС, доктором технических наук, профессором Е.Н. Головенкиным, Главным конструктором проектирования и испытаний радиоэлектронной аппаратуры, кандидатом технических наук В.Н. Школьным и начальником базового центра системного проектирования бортовой аппаратуры служебных систем КА Д.В. Дымовым, и утвержденном Генеральным директором и генеральным конструктором предприятия, членом-корреспондентом РАН, доктором технических наук, профессором Н.А. Тестоедовым, охарактеризовало диссертацию как актуальную и самостоятельную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научно-техническом уровне. Отмечено, что результаты работы представляют собой новые научно обоснованные технические решения в области гетерогенных конфигурируемых интегральных схем, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие науки и промышленности Российской Федерации. Отмечено полное соответствие содержания диссертационной работы заявленным научным специальностям. Сделан вывод о том, что работа полностью соответствует требованиям Постановления правительства РФ от 24.09.2013 (ред. от 11.09.2021) «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор Эннс В.И. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» и 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (технические науки).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован их широкой известностью своими достижениями в области автоматизации проектирования и в области разработки, внедрения и применения элементной базы и устройств вычислительной техники и систем управления, наличием научных публикаций в данных областях науки и техники, в том числе публикаций, близких по тематике к содержанию диссертационной работы соискателя. Это позволяет сделать вывод об их способности объективно оценить научную и практическую значимость работы.

Соискатель имеет 75 опубликованных научных работ, в том числе по теме диссертации 64, в том числе 5 в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus, и 24 в изданиях, входящих в Перечень ВАК. 16 работ опубликовано без соавторов. Получены 13 патентов на полезную модель и два свидетельства о

государственной регистрации топологии интегральной микросхемы. Работы опубликованы в журналах «Микроэлектроника», «Известия высших учебных заведений. Электроника», «Russian Microelectronics» и в других ведущих научных изданиях. Результаты диссертационного исследования апробированы в рамках 5 международных и всероссийских конференций и обсуждены на трех форумах и трех семинарах. Все сведения о печатных работах, указанных в диссертации, достоверны. Они опубликованы и могут быть найдены в соответствующих изданиях. В диссертации **отсутствуют** недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах. В работах, написанных в соавторстве, авторский вклад является основополагающим для соответствующих публикаций.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Zapletina M.A., Khvatov V.M., Chochaev R.Zh., Enns V.I. Layout Synthesis Design Flow for Special-Purpose Reconfigurable Systems-on-a-Chip // Russian Microelectronics. 2019. Vol. 48. No. 3. Pp. 176-186.
2. Enns V.I., Gavrilov S.V., Khvatov V.M., Kurbatov V.G. Designing FPGAs and Reconfigurable SoCs Using Methods of Program Analysis and Prototyping // Russian Microelectronics. 2021. Vol. 50. No. 6. Pp. 426-438.
3. Chochaev R.Zh., Zheleznikov D.A., Ivanova G.A., Gavrilov S.V., Enns V.I. FPGA Routing Architecture Estimation Models and Methodics // Russian Microelectronics. 2021. Vol. 50. No. 7. Pp. 1-7.
4. Чочаев Р.Ж., Железников Д.А., Иванова Г.А., Гаврилов С.В., Эннс В.И. Модели и методы анализа структуры коммутационных ресурсов ПЛИС // Известия вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 5. С. 410-422.
5. Эннс В.И., Гаврилов С.В., Чочаев Р.Ж. Автоматическая настройка программных средств размещения пользовательских схем на ПЛИС // Известия вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 508-520.
6. Эннс В.И. Методы разработки оптимальных программируемых интегральных схем с использованием теоретико-множественного описания // Электронная техника. Серия 3 «Микроэлектроника». 2021. Вып. 3(183). С. 5-13.
7. Эннс В.И. Проектирование специализированных гетерогенных ПЛИС с использованием программного прототипирования // Проблемы разработки

перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2021. Вып. 4. С. 22-26.

8. Эннс В.И., Гаврилов С.В., Чочаев Р.Ж. Разработка математического аппарата для решения задачи автоматической настройки программных средств кластеризации и размещения пользовательских схем на ПЛИС // Электронная техника. Серия 3 «Микроэлектроника». 2021. Вып. 4 (184).

На диссертацию и автореферат Эннса В.И. поступило 18 отзывов. Все отзывы положительные. Отзывы поступили от следующих организаций и предприятий:

1. АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения». Отзыв подписал заместитель генерального директора по науке, д.т.н., профессор Одинокое В.В.

2. ПАО «Ростовский оптико-механический завод». Отзыв подписал заместитель генерального директора – генеральный конструктор Медведев А.В. Отзыв положительный.

3. ЗАО «Синопис Армения». Отзыв подписал директор учебного департамента, д.т.н., профессор, чл.-корр. НАН РА, заслуженный деятель науки Республики Армения Меликян В.Ш.

4. ФГБУН Институт космических исследований РАН. Отзыв подписали: директор, чл.-корр. РАН Петрукович А.А. и главный конструктор ОЭП, д.т.н. Бессонов Р.В.

5. АО «Научно-производственный центр автоматики и приборостроения имени академика Н.А. Пилюгина». Отзыв подписали: начальник отделения Прохоров Д.Ю. и начальник отдела организационно-методической координации научных функций Центра, ученый секретарь НТС, заведующий аспирантурой, д.т.н., профессор Никифоров В.М.

6. АО «Научно-исследовательский институт точных приборов». Отзыв подписал главный научный сотрудник аппарата Научного руководителя, д.т.н., профессор Наумов П.Н.

7. АО «Ракетно-космический центр «Прогресс». Отзыв подписали: заместитель генерального конструктора по научной работе, к.т.н. Борисов М.В. и заместитель главного конструктора Чурилин Е.В.

8. АО «Научно-исследовательский институт «Субмикрон». Отзыв подписал заместитель генерального директора по перспективным проектам, д.т.н., профессор Сиренко В.Г.

9. АО «Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт». Отзыв подписал научный консультант, д.т.н., доцент Иванов А.И.

10. Филиал акционерного общества «Ракетно-космический центр «Прогресс» - Научно-производственное предприятие «Опτικο-электронные комплексы и системы». Отзыв подписал первый заместитель директора филиала – заместитель главного конструктора Ключников М.В.

11. АО Московский научно-производственный комплекс «Авионика» имени О.В. Успенского. Отзыв подписали: заместитель управляющего директора – главный конструктор, председатель НТС, к.т.н. Абдулин Р.Р.; главный конструктор ТН-17, заместитель председателя НТС, к.т.н., доц. Кулабухов В.С.; главный конструктор ТН-31, член НТС, д.т.н., доц. Бронников А.М.

12. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси. Отзыв подписал заведующий лабораторией логического проектирования, д.т.н., профессор Бибило П.Н.

13. АО «Российские космические системы». Отзыв подписали: заместитель директора завода РКП по микроэлектронике – начальник центра микроэлектроники, к.т.н. Строганов Д.А. и главный научный сотрудник, д.т.н. Приходько П.С.

14. Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». Отзыв подписали: заместитель генерального директора Хайлов М.Н. и секретарь секции №6 НТС, к.т.н. Строганов Д.А.

15. АО «Концерн «Созвездие». Отзыв подписали: научный референт аппарата научного руководителя, д.т.н., профессор Поветко В.Н. и начальник отдела унификации и импортозамещения элементной базы Шклярник А.Д.

16. Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Геофизика-Космос». Отзыв подписали: заместитель главного конструктора направления, лауреат Государственной премии СССР, д.т.н. Федосеев Виктор Иванович и утвердил и.о. главного конструктора Князев Владимир Олегович.

17. Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро «Дейтон». Отзыв подписал профессор базовой кафедры «Электронные технологии управления и СМК», д.т.н., проф. Шалумов А.С.

18. АО «Российский институт радионавигации и времени». Отзыв подписал начальник лаборатории помехозащищенных устройств Гринько Н.Е.

Наиболее существенные замечания:

- при описании второй главы диссертации на стр. 18-21 автореферата автор поясняет свою метрику оценки эффективности предложенного им маршрута разработки базовых кристаллов специализированных гетерогенных конфигурируемых интегральных схем. Неясно, как соотносится используемая метрика с какими-либо другими известными метриками;
- не указаны в явном виде противоречие и научная проблема, которую пытался разрешить автор в своей диссертации. Проблема лишь просматривается как совокупность поставленных и решённых научных задач исследования. В автореферате она указана как создание специализированных конфигурируемых микросхем для вычислительной техники и систем управления (стр. 11 АР) или импортозамещение (стр. 12 АР). Кроме того, не высказана гипотеза исследования как предположение возможных путей и средств получения научных результатов;
- не приведены примеры встроенных в специализированную конфигурируемую интегральную схему узлов и блоков детектирования неисправностей;
- указанные в автореферате работы соискателя, выполненные совместно с другими авторами (пп. 1-21, 24-29, 45-51, 55, 57-60, 62-63 - всего 40 работ из 50, то есть 80%), не имеют указания на долю участия соискателя, что затрудняет определение степени его вклада в эти работы. В разделе *Публикации* (стр. 37-42 и соответствующем абзаце *Введения* диссертации (стр. 11) данные по вкладу автора в совместные работы также не приведены;
- представляется недостаточно обоснованным использование термина «обратное» на стр. 26 и на последующих страницах автореферата для отображения, определяющего список соединений конкретной цепи, с учетом того, что, как утверждает сам автор, такое отображение (далее цитата) «не может быть однозначным, поскольку у каждой цепи должно быть не менее двух соединений...»;

Обратное отображение всегда единственно. Может быть следовало использовать термин «псевдообратное» или какой-либо другой;

- предлагается (стр. 32) конструкция двухвходового программируемого логического элемента, хотя в зарубежных ПЛИС типа FPGA используются программируемые элементы LUT (Look-up tables) с четырьмя либо шестью входами. Использование элементов с четырьмя либо шестью входами позволило бы применить для оценки сложности выделенных частей проектов интегральных схем зарубежные САПР ПЛИС и быстро проводить сравнение эффективности применения разработанных средств логического синтеза с уже известными;

- в п. 6 раздела «Научная новизна» (стр. 8 автореферата) недостаточно разъяснено понятие «живучесть ИС»;

- не приведены особенности проектирования и оптимизации параметров универсальных аналоговых микросхем, выполненных на основе аналого-цифровых базовых матричных кристаллов;

- недостаточная проработка состава востребованных для космической отрасли сложно-функциональных блоков гетерогенных конфигурируемых схем;

- подробно не раскрыты методы переноса проектов с ПЛИС на БМК;

- подробно не раскрыта стратегия оптимизации параметров функциональных блоков базового кристалла на этапе программного прототипирования;

- целью работы объявлено в числе прочего создание методов и средств разработки гетерогенных конфигурируемых ИС, обладающих улучшенными характеристиками, повышенной надежностью и радиационной стойкостью; эти качества микросхем принято оценивать конкретными значениями параметров – например, рабочими частотами, гарантируемой долговечностью, допустимой дозой радиационных воздействий; в автореферате отсутствуют какие-либо количественные оценки параметров микросхем, улучшенных за счет использования результатов диссертационной работы;

- не описана процедура выбора СФ блоков конфигурируемых схем для реализации схем заказчиков различных типов;

- не уточнены области применения различных типов гетерогенных конфигурируемых схем, в которых используются блоки с различными стилями проектирования.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработаны** методы и средства создания специализированных гетерогенных конфигурируемых интегральных схем для вычислительной техники и систем управления, обеспечивающие эффективное комплектование электронной компонентной базы для специализированной аппаратуры и позволяющие создавать проблемно-ориентированные интегральные схемы и формировать унифицированные ряды минимально необходимой номенклатуры ЭКБ;
- **предложен** новый маршрут разработки специализированных конфигурируемых гетерогенных интегральных схем, в котором применены предложенные автором методы предварительного анализа схем заказчиков с целью определения значений главных характеристик архитектуры проектируемых гетерогенных ПЛИС с повышенной эффективностью использования ресурсов и введен новый этап в маршруте разработки – «программное прототипирование», основанный на оперативной настройке параметров базового кристалла и на оперативной настройке САПР на соответствующие изменения в конструкции, схемотехнике и топологии базового кристалла;
- **разработан** маршрут автоматизированного проектирования специализированных конфигурируемых гетерогенных интегральных схем, обеспечивающий сочетание различных стилей проектирования: заказных блоков, полузаказных блоков, базовых матричных кристаллов, программируемых схем;
- **предложен** комплекс методов и решений повышения эффективности использования площади кристаллов и улучшения тактико-технических характеристик гетерогенных интегральных схем.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что автором созданы научные основы разработки гетерогенных конфигурируемых интегральных схем и систем на кристалле, ориентированных на задачи конкретного потребителя, в том числе:

- **изложен** новый подход к решению задачи комплектования ЭКБ специализированной аппаратуры на базе гетерогенных конфигурируемых интегральных схем, на основе которых создаются проблемно-ориентированные

интегральные схемы и формируются унифицированные ряды минимально-необходимой номенклатуры ЭКБ;

- **предложена** новая теоретико-множественная математическая модель проекта, формализующая различные стили проектирования гетерогенных конфигурируемых интегральных схем (заказной, полузаказной, базовые матричные кристаллы и программируемые схемы) и подходы к решению разных задач разработки (от разработки базового гетерогенного кристалла с элементами программирования до создания конкретной прошивки схемы заказчика). На базе модели выполнена формализация соответствий между элементами базового проекта конфигурируемой гетерогенной интегральной схемы и проектируемыми схемами заказчиков, функциональность которых требуется запрограммировать в базовом кристалле;

- **изложены** новые архитектурные и схемотехнические решения и методы разработки конфигурируемых интегральных схем, обеспечивающие высокую эффективность использования площади базового кристалла при реализации схем заказчиков различных классов;

- **введено** понятие аналогового ядра, которое применяется при разработке конфигурируемых аналогово-цифровых базовых кристаллов;

- **изложен** новый подход к разработке специализированных конфигурируемых интегральных схем с повышенной надежностью и радиационной стойкостью, которые достигаются использованием приемлемых и мягких решений, что позволяет обеспечить функционирование интегральных схем в условиях неблагоприятных воздействий, значения характеристик специальных факторов которых превышают величины, установленные в технических условиях для штатной работы.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается созданием и внедрением следующих практических методов и средств разработки специализированных гетерогенных конфигурируемых интегральных схем:

- **создана и внедрена методика** проектирования гетерогенных конфигурируемых интегральных схем для решения задачи комплектования специализированной аппаратуры электронной компонентной базой для конкретных заказчиков;

- **созданы** процедуры построения специализированных конфигурируемых

интегральных схем с использованием приемлемых и мягких решений для повышения их живучести, надежности и радиационной стойкости;

- **разработанные** в работе модели, методики и методы **внедрены** и используются на предприятиях микроэлектронной промышленности РФ при разработке и производстве программируемых и полужаказных интегральных схем, что позволяет уменьшить площадь базовых кристаллов не менее чем на 20%, что подтверждается актами внедрения;

- **разработанные** методы использованы при освоении серийного производства аналого-цифровых конфигурируемых микросхем различных серий, что позволило решить проблему комплектования ЭКБ аппаратуры космического назначения ряда предприятий; формализованные описания аналоговых блоков, разработанные автором, позволили сократить сроки разработки конфигурируемых аналого-цифровых интегральных схем в несколько раз.

Оценка достоверности результатов исследования показала, что работа опирается на аппарат теории множеств, теорию графов, средства логического синтеза и математического моделирования. Результаты большого числа проведенных экспериментов получены с использованием современного программного обеспечения и реализации в кремнии и **согласуются** с базовыми представлениями современной науки, что следует из многочисленных отечественных и зарубежных публикаций. Достоверность результатов работы подтверждается также апробацией работы в научных изданиях и выступлениях на научных конференциях, а также внедрением в реальный производственный процесс. Основные результаты автора получены с использованием современных методов исследований, сбора и обработки информации.

Личный вклад соискателя состоит в его непосредственном участии на всех этапах процесса: в самостоятельной формулировке научной проблемы и в поиске методов решения задач исследования, в непосредственном участии при получении, обработке и анализе данных, в разработке и внедрении результатов исследования на промышленных предприятиях, а также при подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Автор лично разработал и обосновал новый метод комплектования специализированной аппаратуры на базе широкого применения гетерогенных

конфигурируемых интегральных схем, маршрут и методы разработки гетерогенных конфигурируемых цифровых и аналого-цифровых интегральных схем, методы предварительного анализа и программного прототипирования.

Автор исследовал новые обобщенные математические модели гетерогенных конфигурируемых интегральных схем и лично предложил методы разработки конфигурируемых интегральных схем с повышенной надежностью функционирования в условиях неблагоприятных внешних воздействий.

Автор в качестве главного конструктора ряда ОКР организовал проведение работ по разработке и освоению в производстве готовых изделий для вычислительной техники и систем управления, спроектированных на основе предложенных им решений.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

- об отсутствии в докладе информации об иных способах дальнейшего уменьшения площади базовых кристаллов. Соискатель с замечанием согласился, но пояснил, что пути дальнейшего уменьшения площади кристаллов связаны с чисто технологическими усовершенствованиями, которые находятся за пределами предмета исследований его работы;

- о некоторой перегруженности презентации текстовой и формульной информацией. Соискатель с замечанием согласился;

- об отсутствии оценки глобального технико-экономического эффекта от внедрения результатов диссертационной работы в практику проектирования и производства ЭКБ. Соискатель частично согласился с замечанием, но пояснил, что в настоящее время можно говорить только об отдельных составляющих полученного технико-экономического эффекта, поскольку оценить общий эффект можно будет только по истечении определенного времени.

Диссертационный совет констатирует, что диссертация Эннса В.И. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований предложены новые научно обоснованные технические решения проблемы создания электронной компонентной базы для вычислительной техники и систем управления на основе специализированных гетерогенных программируемых БИС. Внедрение

этих решений вносит значительный вклад в развитие микроэлектронной отрасли РФ, в том числе в решение такой актуальной задачи, как импортонезависимость элементной базы. Области исследований, в которых работал соискатель, в полной мере соответствуют заявленным им научным специальностям. На основании всего вышеизложенного диссертационный совет на заседании 23.06.2022 года (протокол № 118) принял решение присудить Эннсу В.И. ученую степень доктора технических наук по специальностям 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» и 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (технические науки)».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 7 докторов наук по специальности 05.13.05 и 7 докторов наук по специальности 05.13.12, участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав диссертационного совета, проголосовал следующим образом: ЗА - 15, ПРОТИВ – 0, недействительные бюллетени – 0.

Председатель диссертационного совета,
Академик РАН, д.т.н., профессор



А.Л. Стемповский

Ученый секретарь совета, к.т.н.

Г.А. Иванова

24.06.2022 г.