

ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д212.277.01

Повестка дня:

Защита диссертации **Тетенькиным Ярославом Геннадьевичем**  
на соискание ученой степени *кандидата технических наук*:

**"Методы и средства измерения тепловых параметров цифровых интегральных схем с использованием температурной зависимости времени задержки распространения сигнала"**

Специальности:

**05.11.01 Приборы и методы измерения по видам измерения (электрические измерения) .**

Официальные оппоненты:

**Пиганов Михаил Николаевич - д. т. н., профессор кафедры «Конструирование и технология электронных систем и устройств», Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева.**

**Новиков Сергей Геннадьевич - к. т. н., начальник лаборатории «Твердотельной электроники», Научно-исследовательский технологический институт им. С.П. Капицы Ульяновского государственного университета.**

**Ведущая организация - Федеральное государственное автономное образовательное учреждение Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».**

ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.277.01  
от 28 декабря 2016 года

на заседании присутствовали члены Совета:

1.	Ярушкина Н.Г., председатель Совета	д.т.н., профессор	05.13.12	- технические науки
2.	Киселев С.К. зам. председателя Совета	д.т.н., доцент	05.11.01	- технические науки
3.	Смирнов В.И., ученый секретарь Совета	д.т.н., профессор	05.11.01	- технические науки
4.	Афанасьев А.Н.	д.т.н., профессор	05.13.12	- технические науки
5.	Афанасьева Т.В.	д.т.н., доцент	05.13.12	- технические науки
6.	Васильев К.К.	д.т.н., профессор	05.13.05	- технические науки
7.	Дьяков И.Ф.	д.т.н., профессор	05.13.12	- технические науки
8.	Крашенинников В.Р.	д.т.н., профессор	05.13.05	- технические науки
9.	Клячкин В.Н.	д.т.н., профессор	05.11.01	- технические науки
10.	Макаров Н.Н.	д.т.н.	05.11.01	- технические науки
11.	Негода В.Н.	д.т.н., доцент	05.13.05	- технические науки
12.	Сергеев В.А.	д.т.н., доцент	05.11.01	- технические науки
13.	Соснин П.И.	д.т.н., профессор	05.13.12	- технические науки
14.	Ташлинский А.Г.	д.т.н., профессор	05.13.05	- технические науки

Председатель Совета,  
д.т.н., профессор

Ученый секретарь  
д.т.н., профессор



Н.Г. Ярушкина

В.И. Смирнов

Председатель

**Уважаемые коллеги!**

На заседании диссертационного Совета Д212.277.01 из **21** члена Совета присутствуют 14 человек. Необходимый кворум имеется.

Членам Совета повестка дня известна. Какие будут суждения по повестке дня? Утвердить? (принято единогласно).

По специальности защищаемой диссертации **05.11.01 Приборы и методы измерения по видам измерения (электрические измерения)** (технические науки) на заседании присутствуют 5 докторов наук.

Наше заседание правомочно.

Председатель

Объявляется защита диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук **Тетенькиным Ярославом Геннадьевичем** по теме: "Методы и средства измерения тепловых параметров цифровых интегральных схем с использованием температурной зависимости времени задержки распространения сигнала".

Работа выполнена в Ульяновском государственном техническом университете.

Научный руководитель - **д.т.н., доцент Сергеев В.А.**

Официальные оппоненты:

**Пиганов Михаил Николаевич - д. т. н., профессор кафедры «Конструирование и технология электронных систем и устройств», Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева.**

**Новиков Сергей Геннадьевич - к. т. н., начальник лаборатории «Твердотельной электроники», Научно-исследовательский технологический институт им. С.П. Капицы Ульяновского государственного университета.**

На заседании присутствуют оба оппонента. Письменные согласия на оппонирование данной работы от них были своевременно получены.

**Ведущая организация - Федеральное государственное автономное образовательное учреждение Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».**

Слово предоставляется **Ученому секретарю** диссертационного Совета д.т.н. **В.И.Смирнову** для оглашения документов из личного дела соискателя.

Ученый секретарь

Соискателем **Тетенькиным Ярославом Геннадьевичем** представлены в Совет все необходимые документы для защиты кандидатской диссертации (зачитывает) :

- заявление соискателя;
- копия диплома о высшем образовании (заверенная);
- удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов;
- заключение по диссертации от организации, где выполнялась работа;
- диссертация и автореферат в требуемом количестве экземпляров.

Все документы личного дела оформлены в соответствии с требованиями Положений ВАК.

Основные положения диссертации отражены **Тетенькиным Я.Г.** в **18** научных работах, в т.ч. в **трех статьях в изданиях из перечня ВАК, имеется семь патентов и авторских свидетельств на изобретения.** Диссертация представлена к защите **24.10.2016г.** (протокол **№10**). Объявление о защите размещено на сайте ВАК РФ **26.10.2016г.**

Председатель

Есть ли вопросы по личному делу соискателя к ученому секретарю Совета? (Нет).

Есть ли вопросы к **Тетенькину Я.Г.** по личному делу? (Нет).

**Ярослав Геннадьевич,** Вам предоставляется слово для изложения основных положений Вашей диссертационной работы.

Уважаемые члены диссертационного Совета! Вашему вниманию представляются результаты диссертационной работы на тему «Методы и средства измерения тепловых параметров цифровых интегральных схем с использованием температурной зависимости времени задержки распространения сигнала».

Надежность является одним из важнейших параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем. В значительной степени она определяется температурой активной области кристалла. В общей статистике надежности на долю температурного фактора приходится 55% отказов. Это особенно важно для процессоров и ПЛИС, которые характеризуются большой плотностью и неравномерностью рассеиваемой мощности в кристалле. Температура локальных областей кристалла процессора может превышать среднюю температуру более чем на 60°C.

Контролировать температуру позволяют тепловые параметры ИС. Они закладываются на этапе проектирования, но, как показывает практика, реальные значения этих параметров могут существенно отличаться от расчетных, поскольку сильно зависят как от качества самих полупроводниковых структур, так и от качества сборки ЦИС в процессе производства. Указанные факторы определяют актуальность контроля тепловых параметров ИС.

Основные источники тепла в планарной ИС расположены на поверхности кристалла. Затем тепло распространяется по элементам конструкции к основанию корпуса и далее в окружающую среду. Принципы теплоэлектрической аналогии, развитые в работах Карслоу, Закса,

Шекели и других ученых, позволяют представить тепловую модель ИС в виде эквивалентной электрической схемы, где физическим тепловым параметрам соответствуют электрические. В реализации Фостера такая схема представляет собой несколько последовательно соединенных RC-звеньев, каждое из которых соответствует определенному элементу или слою конструкции ИС. Зная параметры тепловой схемы можно рассчитать температуру в любом её узле.

Существуют два подхода к определению параметров элементов тепловых схем – временной и частотный. То есть, либо по переходным тепловым характеристикам (сокращенно ПТХ), либо по тепловому импедансу. ПТХ представляет собой временную зависимость приращения температуры активной области ИС, после подачи на нее ступеньки греющей мощности. Тепловой импеданс – это отношение амплитуды переменной составляющей температуры активной области ИС к амплитуде греющей мощности, изменяющейся по гармоническому закону. При измерении теплового импеданса погрешности измерения будут меньше из-за фильтрации полезного сигнала, но время измерения в разы больше, чем время измерения ПТХ. Так, при 10 отсчетах на декаду частоты оно будет больше в 5 раз.

Все косвенные методы измерения температуры активной области полупроводниковых изделий сводятся к измерению некоторого температурочувствительного параметра. В качестве него чаще всего используется падение напряжения на открытом диоде. В известных способах измерения ПТХ по стандартам JESD51-1 и JESD51-14 ИС из режима нагрева постоянной электрической мощностью переключается в режим измерения ТЧП. Из-за возникающих при этом переходных электрических и тепловых процессов и аддитивных помех, погрешность указанных способов превышает 10-15%.

Кроме большой погрешности измерения, обусловленной переходными процессами, существуют и другие недостатки известных способов. Они приведены на плакате.

Известно, что у цифровых ИС любого типа, любой технологии имеется общий, зависящий от температуры, параметр – время задержки распространения сигнала. Самый общий анализ показывает, что использование этого параметра в качестве температурочувствительного позволит устранить эти недостатки. Однако до настоящего времени, он не использовался из-за технической сложности измерения этого параметра.

Цель работы – разработка новых, более точных по сравнению с известными, способов и средств измерения тепловых параметров цифровых интегральных схем с использованием температурной зависимости времени задержки распространения сигнала.

Поставленная цель достигается решением следующих научных задач:

1. Анализ существующих способов и устройств измерения тепловых параметров ЦИС.

2. Теоретический анализ и экспериментальное исследование зависимостей динамических параметров ЦИС от температуры, напряжения питания и вида нагрузки.

3. Разработка новых способов и средств измерения переходных тепловых характеристик, анализ и оценка их методических погрешностей.

4. Разработка нового алгоритма определения параметров тепловых схем ЦИС по экспериментальным ПТХ и анализ его разрешающей способности.

5. Реализация разработанных способов и алгоритмов в виде экспериментального образца автоматизированного аппаратно-программного измерительного комплекса и исследование его метрологических характеристик.

6. Проведение и анализ результатов сравнительных выборочных измерений тепловых параметров ЦИС разработанными и известными средствами.

На слайде №10 представлены положения, выносимые на защиту. По сути, они представляют собой решения перечисленных научных задач.

Время задержки распространения сигнала определяется технологией изготовления ИС, зависит от температуры, нагрузки, напряжения питания и само по себе является диагностическим параметром. С увеличением температуры время задержки сигнала в КМОП ЦИС практически линейно возрастает в среднем на  $0,3\%/^{\circ}\text{C}$  и по температурной чувствительности этот параметр не уступает напряжению на диоде. Несмотря на это, применение его в качестве ТЧП не рассматривалось из-за сложности измерения малых временных интервалов в реальном масштабе времени. Например, для современных ПЛИС и процессоров время задержки распространения сигнала составляет всего 20-40 пс, соответственно разрешающая способность измерителя должна быть на уровне одной десятой пс, что в настоящее время технически нереализуемо.

На плакате №12 представлены основные способы измерения временных интервалов в диапазонах менее 1 нс. Их недостатки: неспособность работать в режиме реального времени, недостаточная разрешающая способность (10-20 пс), сложность технической реализации.

Необходимую точность измерения времени задержки сигнала можно получить, используя включение логических элементов (ЛЭ) по схеме кольцевого генератора. Поскольку его выходная частота обратно пропорциональна задержке распространения сигнала, то чем меньше время задержки, тем выше частота генератора и, соответственно, выше разрешающая способность метода. Таким образом, малое время задержки сигнала из недостатка превращается в преимущество.

На слайде №13 показаны экспериментальные температурные зависимости частоты КГ, собранных на ИС CD4011 и их линейные аппроксимации. Аналогичные результаты были получены и для других типов ИС, включая ПЛИС. Как видно из значений коэффициента детерминации – а они все, с точностью до 4 знака равны 1, линейность аппроксимации весьма высокая, что позволяет использовать эти зависимости при измерении тепловых параметров ИС.

На основе описанного подхода разработан способ измерения теплового сопротивления ЦИС с включением ее ЛЭ по схеме кольцевого генератора. При включении кольцевой генератор будет разогреваться собственной рассеиваемой мощностью, которая пропорциональна частоте переключения и определяется по формуле, приведенной на плакате. Измеряя потребляемый ток и частоту КГ в начале и в конце цикла измерения, тепловое сопротивление определяют по формуле, приведенной на плакате. Погрешность измерения частоты определяется длительностью строб-импульса и частотой КГ. С учетом того, что частота КГ изменяется за время строб-импульса, была определена его оптимальная длительность, минимизирующая погрешность измерения.

Если после включения кольцевого генератора измерять его частоту генерации в заданные моменты времени  $t_i$ , то получим способ измерения ПТХ, значение которой в моменты времени  $t_i$  находят по приведенной формуле. Оптимальная длительность строб-импульса, минимизирующая погрешность измерения температуры для типовых ЦИС общего применения, равна 100 мкс.

На плакате №16 показан способ измерения теплового импеданса. Кольцевой генератор управляющими импульсами частотой  $\Omega$  и скважностью 2

переключается из режима генерации в режим паузы. Измерив амплитуду греющей мощности и температуры одним из известных способов, модуль теплового импеданса определяют по формуле.

Режим кольцевого генератора реализуется не для всех типов ЛЭ. Нами был предложен фазовый способ измерения времени задержки для ЛЭ любого типа. Он основан на том, что задержка распространения сигнала в ЦИС приводит к появлению разности фаз между входными и выходными импульсами напряжения. Преобразуя эту разность фаз в напряжение и измеряя это напряжение в заданные моменты времени получим значения ПТХ.

На плакате 18 показан еще один способ измерения тепловых параметров без режима КГ, пригодный для ЦИС средней степени интеграции. Способ основан на использовании таких элементов в качестве одновибраторов. Такая возможность есть у всех элементов, имеющих входы записи и сброса.

Кроме задачи повышения точности измерения ПТХ необходимо было решить не менее важную задачу точного определения параметров тепловых схем ЦИС по этим ПТХ. Известный метод структурных функций содержит сложные многоступенчатые преобразования с переходом от модели Кауэра к модели Фостера и назад, что приводит к накоплению ошибок. Этот метод применяется обычно для цепей с малым числом структурных элементов – не более 3-4, что достаточно для дискретных приборов – диоды, транзисторы, но мало для таких сложных изделий как ЦИС.

Нами предложен новый алгоритм расчета тепловых параметров ЦИС по ПТХ, состоящий в нахождении характерных точек, соответствующих экстремумам крутизны ПТХ в полулогарифмическом масштабе, путем двойного дифференцирования ПТХ, и проведен анализ разрешающей способности алгоритма.

Правильность алгоритма иллюстрируется на примере анализа модельной дискретной функции  $A(t)$ , выполненный двумя способами – аналитическим и численным дифференцированием. Оба варианта дифференцирования дают одинаковые результаты.

На плакате 20 приведены основные формулы для нахождения характерных точек ПТХ и расчета параметров звеньев тепловой цепи с использованием двойного численного дифференцирования экспериментальной ПТХ. Приведен пример получения 4-звенной аппроксимации ПТХ ИС CD4011.

Анализ разрешающей способности алгоритма показал, что достоверно различать соседние звенья возможно при отношении их постоянных времени от 4 до 5, а при отношении 8-9 – погрешность определения тепловых параметров ЦИС не превышает 10% и быстро уменьшается с его увеличением.

На основе предложенных способов разработан аппаратно-программный комплекс для измерения ПТХ, теплового импеданса и расчета тепловых параметров ИС. Структурная схема измерителя показана на плакате 22. Работой измерителя управляет микроконтроллер ATmega-328P.

Вид измерительного блока АПК в работе показан на слайде 23.

Умножение частоты позволяет увеличить разрешающую способность измерительного комплекса на коэффициент умножения; в приведенном на плакате 24 примере – увеличение равно 6.

На плакате 25 представлены результаты измерений ПТХ и построенные на основе их анализа тепловые схемы ЦИС малой степени интеграции. Как визуальная оценка, так и величина СКО показывают высокую степень соответствия тепловой схемы экспериментальным ПТХ, что подтверждает правильность алгоритма.

Приведены результаты аналогичных измерений для ИС сверхвысокой степени интеграции – это ПЛИС фирм Altera и Lattice. Здесь также видно,

что линейные тепловые схемы довольно точно аппроксимируют экспериментальные ПТХ.

Оценка выборочной дисперсии и СКО по результатам восьми измерений ПТХ ИС типа CD4011 показала, что СКО не превысило 0,01 К/Вт за первые 100 с нагрева, что свидетельствует о высокой повторяемости и стабильности процесса измерения на участке ПТХ, определяемом тепловыми процессами внутри ЦИС.

Был проведен сравнительный анализ данных измерений, полученных на разработанном комплексе и с помощью Измерителя теплового импеданса полупроводниковых приборов Rth Meter. Оба измерителя показали близкие результаты, что подтверждает адекватность предложенного способа измерения тепловых параметров ЦИС. При этом следует отметить, что у разработанного прибора время измерения и анализа ПТХ примерно в 5 раз меньше и более чем на порядок лучшая временная разрешающая способность.

В заключение, хотелось бы отметить, что проведенные эксперименты показали, что использование времени задержки распространения сигнала в качестве ТЧП открывает возможности для разработки новых способов и средств измерения тепловых параметров не только ЦИС но и других классов полупроводниковых приборов – это аналоговые интегральные схемы, транзисторы, диоды и так далее.

Основные полученные результаты диссертационной работы разрешите не зачитывать, т. к. они представлены в автореферате. Доклад окончен. Спасибо за внимание.

Председатель

У кого есть вопросы к соискателю?

д.т.н., доцент Негода В.Н.

Откройте плакат 14. Я правильно понимаю, что  $t_k$  на втором графике сверху и  $T_k$  в формуле для оптимального значения строб-импульса – это один и тот же параметр?

Соискатель

Да.

д.т.н., доцент Негода В.Н.

Как физически объясняется, что это оптимальное значение строб-импульса не зависит ни от температуры, ни от физических свойств, а зависит только от параметров генератора?

Соискатель

Оптимальная длительность строб-импульса выбиралась из условия, что за время действия строб-импульса происходит некоторое изменение температуры кристалла.

д.т.н., доцент Негода В.Н.

Это понятно. Но вот параметры  $\tau$  и  $t$  – это параметры процесса?



Соискатель

Нет,  $\tau$  это параметр объекта.

д.т.н., доцент Негода В.Н.

А Вы можете показать зависимость этих параметров от физических свойств этого объекта? Как зависят эти длительности от параметров объекта?

Соискатель

Частота кольцевого генератора зависит от температуры. Она как раз и является температурочувствительным параметром. А  $\tau$  – тепловая постоянная времени кристалла.

д.т.н., доцент Негода В.Н.

То есть эти параметры связаны напрямую с графиком, который мы видели раньше – на плакате 13?

Соискатель

Да.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

В заголовке Вашей диссертации присутствуют слова «цифровые интегральные схемы» – как я понимаю, этот метод кольцевого генератора Вы можете использовать только для таких интегральных схем, которые можно переводить в линейный режим?

Соискатель

Да.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Вообще-то это существенное ограничение. Скажите, какие типы интегральных схем можно тестировать с помощью предлагаемых Вами методов?

Соискатель

Кроме метода кольцевого генератора были показаны еще два способа, предназначенные для тех логических элементов, которые невозможно перевести в режим кольцевого генератора. То есть, как Вы правильно заметили, в режим кольцевого генератора можно перевести только самые простые логические элементы, которые можно охватить отрицательной обратной связью и перевести в линейный режим.

Если ЛЭ невозможно перевести в режим КГ, то можно использовать так называемый фазовый метод – когда при прохождении сигнала через логический элемент за счет задержки прохождения этого сигнала возникает фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами. Измеряя

фазовый сдвиг, например, преобразуя его в напряжение, мы измеряем эту задержку.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

А как Вы собираетесь измерять фазовый сдвиг? У Вас есть какие-либо примеры реализации подобных фазовых измерителей в диссертации?

Соискатель

Фазовый измеритель, в данном случае, является стандартным известным измерителем. Практических примеров реализации фазовых измерителей в диссертации не приведено – они известны и описаны в многочисленных публикациях.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Еще раз – какие типы интегральных схем мы можем тестировать с помощью предложенных Вами методов? Кроме простой логики и ПЛИС?

Соискатель

Практически любые. Например, второй способ – одновибраторный, предназначен для ИС средней степени интеграции – триггеры, счетчики, запоминающие устройства, регистры и др. На этом плакате представлен вариант включения триггеров для измерения времени задержки распространения сигнала. Аналогично соединяются любые другие ИС, имеющие входы записи и сброса – причем, вход сброса соединен с выходом. В этом случае, такая ИС работает как одновибратор и формирует на выходе импульс, равный двум временам задержки распространения сигнала (записи и сброса), которые имеют аналогичную, как у КГ, температурную зависимость.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Понятно. Вот смотрите, у нас есть ИС большой степени интеграции – ПЛИС. Сколько элементов ПЛИС Вы соединяете в кольцевой генератор?

Соискатель

Обычно я использовал для создания КГ от пяти до семи элементов.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Как Вы будете исследовать ПЛИС? У Вас на ней, предположим, миллион логических элементов. Как Вы будете ее исследовать? Вы будете их все включать в режим КГ или возьмете выборочные элементы?

Соискатель

Поскольку все эти логические элементы сформированы в одном технологическом процессе, на одной полупроводниковой пластине, то и временными характеристиками они обладают одинаковыми. Поэтому достаточно взять для исследования любую группу логических

элементов, включить их по схеме КГ и провести необходимое тестирование.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Существуют исследования, которые показывают, что КГ, собранные из логических элементов ПЛИС на разных участках кристалла, показывают различные выходные характеристики.

Соискатель

Да, такое возможно. Это зависит от настроек компоновщика, входящего в состав САПР ПЛИС, который определяет физическое расположение элементов ПЛИС, входящих в состав КГ. Если мы соединим в КГ расположенные рядом элементы, то частота КГ будет максимальной. Если же элементы будут находиться на большом удалении друг от друга, то за счет длинных соединительных линий можно получить существенное увеличение времени задержки распространения сигнала в логических элементах и, соответственно, значительное уменьшение частоты КГ.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Таким образом, повторяемость результатов исследований для ПЛИС будет низкой?

Соискатель

При необходимости автоматический компоновщик можно отключить и провести разводку элементов в ручном режиме. Кроме того, температурная зависимость частот является относительной и не зависит от абсолютного значения частоты КГ. Таким образом, на точность измерения тепловых параметров ПЛИС абсолютное значение частоты КГ не оказывает влияние – важно его относительное изменение, определяемое температурой кристалла ПЛИС. Мы включаем кольцевой генератор, он начинает потреблять мощность, температура кристалла ПЛИС увеличивается, соответственно, частота КГ начинает снижаться – таким образом, мы снимаем ПТХ ПЛИС.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Это понятно. Повторю вопрос – сможем ли мы провести достоверные метрологические измерения тепловых параметров ПЛИС, используя для тестирования лишь незначительную часть элементов ПЛИС? То есть можно ли быть уверенным, что данные полученные от этой небольшой части элементов ПЛИС будут аналогичны для всех других логических элементов ПЛИС?

Соискатель

Как я уже говорил, элементы ПЛИС формируются в едином техпроцессе. Временные характеристики элементов ПЛИС определяются физическими размерами транзисторов, свойствами полупроводниковых материалов и топологией. Если эти параметры одинаковы, то и

временные характеристики одинаковы. Эти характеристики гарантируются производителем, кроме того, если бы временные характеристики «плавали», то разработка любого, достаточно сложного проекта на ПЛИС была бы в принципе невозможна. Таким образом, для тестирования тепловых параметров ПЛИС достаточно небольшого числа ее логических элементов.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Покажите плакат 13. Вот есть границы графика – о чем они говорят?

Соискатель

Показывают границы того диапазона температур, в котором проводились измерения. То есть тот диапазон, в котором были сняты эти экспериментальные характеристики частоты КГ.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Я имею в виду не температурный диапазон, а разброс характеристик. Какую он имеет примерно величину?

Соискатель

В пределах 5-6%.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Скажите, а как Вы учитываете температурную зависимость порогового напряжения полевых транзисторов, из которых состоят логические элементы КМОП ИС?

Соискатель

В формуле выходной частоты КГ, приведенной на этом плакате, видно, что пороговое напряжение влияет на частоту КГ.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Насколько сильное влияние оказывает это напряжение на частоту КГ? Или влияние совсем небольшое?

Соискатель

Точная оценка влияния порогового напряжения на выходную частоту КГ не проводилась. Вообще, эта формула имеет больше качественное значение – она показывает основные параметры, влияющие на временные характеристики логических элементов и для оценки линейности их зависимости от температуры. В практическом плане, нас больше интересуют реальные, экспериментально измеренные характеристики зависимости времени задержки от температуры.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

То есть погрешность, обусловленная пороговым напряжением, не оценивалась?

Соискатель

Нет, поскольку в практическом плане, нужно оценивать комплексное влияние большого числа разных параметров. Например, та же температурная зависимость подвижности носителей заряда оказывает более сильное влияние на время задержки распространения сигнала. Подробно эти вопросы рассмотрены в диссертации. А в практическом плане, как я уже сказал, для нас важна реальная, экспериментально измеренная характеристика температурочувствительного параметра. Поскольку именно она является основой для вычисления тепловых параметров ИС.

Например, наиболее распространенный температурочувствительный параметр – напряжение на открытом диоде, также имеет множество факторов, которые на него влияют. Но мы же не стремимся изучать влияние каждого из них на это напряжение. Для нас важна реальная, температурная зависимость этого напряжения именно для данного полупроводникового прибора – для этого во всех стандартах, всегда проводится калибровка зависимости температурочувствительного параметра от температуры.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Можно открыть 20-й плакат? Я правильно понимаю, что зеленый график – это модельный график?

Соискатель

Да, совершенно верно.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

То есть это модельная зависимость графика, состоящего из трех экспонент. А она исследовалась фактически?

Соискатель

Нет. Этот график построен на основе искусственной дискретной модельной функции и предназначен исключительно для демонстрации алгоритма нахождения характерных точек и вычисления параметров тепловой модели.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

А насколько адекватна эта модель, насколько она соответствует реальным характеристикам?

Соискатель

Адекватность этой модели видна на аппроксимациях реальных переходных тепловых характеристик, которые были получены с

использованием этого алгоритма. Нижний график, как раз и показывает реальную экспериментальную ПТХ ИС CD4011 и ее аппроксимацию, полученную с помощью этого алгоритма. Видно, что характеристика полученной тепловой схемы, достаточно точно совпадает с экспериментальной ПТХ.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Покажите 27-й плакат, пожалуйста. На графике показаны дисперсия и СКО повторяемости результатов. Какой смысл показывать оба этих параметра, если, по сути, это одно и то же.

Соискатель

Да, Вы правы. Это взаимосвязанные параметры. Они показаны для удобства – некоторым более удобен параметр дисперсия, некоторым – СКО. Хотя, в принципе, можно было обойтись и одним.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Еще один вопрос по плакату №4. Здесь схематично показаны слои конструкции ИС. Они отличаются площадью, толщиной, соответственно разными постоянными времени. Каким образом они учитываются при расчете тепловых параметров?

Соискатель

В данном случае, была использована одномерная тепловая модель. Она является упрощенной. Разумеется, есть более адекватные тепловые модели, например распределенные. Хотя, нужно заметить, что одномерные модели являются наиболее распространенными. Также нужно иметь в виду, что с учетом того, что теплопроводность полупроводникового кристалла и металлического основания, к которому крепится кристалл на два порядка выше теплопроводности пластикового компаунда, то можно считать, что, по крайней мере, для двух первых звеньев тепловой модели условие одномерного распределения тепла выполняется.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Спасибо.

д.т.н., профессор Афанасьев А.Н.

В качестве недостатков известных способов измерения Вы приводите отличие режима нагрева при измерении от режима выделения тепла при эксплуатации. Вы как в диссертации с этим недостатком боретесь?

Соискатель

Дело в том, что режим нагрева в предложенном способе как раз и является эксплуатационным. То есть, кольцевой генератор работает в штатном режиме, разогревается, у него за счет этого изменяется

частота, которую мы фиксируем с определенным периодом. Стандартные способы используют для нагрева какие-либо имеющиеся полупроводниковые структуры – например, защитные диоды или паразитные диоды, образующиеся при формировании МОП-транзисторов.

д.т.н., профессор Афанасьев А.Н.

Следующий вопрос. Четвертое положение, выносимое на защиту – новый, легко автоматизируемый алгоритм. Как понять – легко автоматизируемый, трудно автоматизируемый...?

Соискатель

Да, согласен. Формулировка не совсем удачная.

д.т.н., профессор Афанасьев А.Н.

А сам алгоритм определения тепловых параметров отдельных звеньев – он у Вас где-то показан?

Соискатель

Алгоритм показан на плакате 20. Сначала вычисляется с использованием численного дифференцирования вторая производная экспериментальной ПТХ. В точках положительного перехода через ноль получаем характерные временные точки. Далее, в этих точках берем значение ПТХ, умножаем на 0,63 и находим временную точку, соответствующую этому значению ПТХ: она будет равна постоянной времени искомого звена. Как видно, алгоритм получился достаточно простым и легко был реализован на 8-битном микроконтроллере.

д.т.н., профессор Афанасьев А.Н.

Спасибо. Понятно. Последний вопрос – как Вы учитываете инструментальную погрешность вашего измерительного комплекса?

Соискатель

Расчет погрешности приведен в диссертации. Если коротко – рассчитывается погрешность для каждого функционального блока измерительного комплекса, принимающего участие в измерении. Далее по известной формуле вычисляется общая погрешность комплекса.

д.т.н., профессор Афанасьев А.Н.

Числовые значения погрешности можно привести?

Соискатель

Менее 3%.

д.т.н., доцент Киселев С.К.

Если можно, откройте 27-й плакат. Объясните, пожалуйста, чем объясняется в правой части графика 5-кратный рост дисперсии.

Соискатель

Из графика видно, что СКО не превысило 0,01 К/Вт за первые 100 с нагрева, что свидетельствует о высокой повторяемости и стабильности процесса измерения на участке ПТХ, определяемом тепловыми процессами внутри ИС. Увеличение СКО после 100 с нагрева до 0,05 К/Вт объясняется нестабильностью температуры окружающей среды и условий теплообмена.

д.т.н., доцент Киселев С.К.

Откройте 26-й плакат. До конца разберемся. Написано – результаты экспериментальной проверки комплекса. Я так понимаю, здесь представлены результаты работы комплекса с использованием Ваших способов и алгоритмов. Здесь нет сравнения с известными способами.

Соискатель

Да, на этом плакате показан результат работы измерительного комплекса с использованием предложенных алгоритмов.

На плакате 28 представлен сравнительный анализ результатов измерения ПТХ предложенным способом КГ и известным спектральным методом, реализованном в измерителе теплового импеданса RthMeter. Видно, что результаты сравнительных измерений хорошо согласуются между собой – на это указывает высокое значение коэффициента корреляции. Наибольшее расхождение, наблюдаемое в начале цикла измерения, объясняется разными способами разогрева кристалла ИС. Также в известном способе существует удаленность греющих элементов и датчиков температуры друг от друга. В устоявшемся режиме расхождение между результатами измерений становится незначительным.

д.т.н., доцент Киселев С.К.

Спасибо.

Председатель

Есть еще вопросы? (Нет).

**Согласны ли члены Совета сделать технический перерыв?** (Нет).

Тогда продолжаем работу.

Слово предоставляется научному руководителю работы **д.т.н. Сергееву Вячеславу Андреевичу**

Несколько слов о Ярославе Геннадьевиче. Он из когорты тех инженеров, которые закончили наш технический университет в 80-е годы, имеет большой опыт работы в области измерительной техники, радиоэлектроники, радиотехники. Те, кто помнят, он работал в группе



Волгина Л.И., затем в лаборатории акустической интроскопии. С тех пор еще занимался обработкой импульсных сигналов и другими сложными задачами.

Судьба так повернула, что когда мы сталкивались в нашем филиале с задачами, связанными с измерениями, мы приглашали Ярослава Геннадьевича и у него всегда находились интересные и оригинальные решения. Он помогал находить в заданных технических условиях решения, которые были оригинальными и давали эффект.

Задача создания более совершенных методов и средств измерения тепловых параметров на основе температурной зависимости временных параметров полупроводниковых приборов была сформулирована еще в 80-е годы прошлого века. Только тогда не было технической возможности ее решить. В процессе общения я предложил Ярославу Геннадьевичу заняться решением этой весьма сложной, технической задачи и он прикрепился соискателем на нашу базовую кафедру. Последние два года он работает ведущим инженером Ульяновского филиала ИРЭ им В.А. Котельникова РАН и достаточно успешно решает разные задачи, не только связанные с диссертацией.

За время соискательства – за три года, он не только успешно сдал кандидатские экзамены – все три на «отлично», но и прошел все этапы диссертационной работы – анализ, моделирование, расчет, конструирование, создание опытного образца измерительного комплекса, проведение большого числа экспериментальных исследований. Все работы выполнены и все представленные результаты получены им лично. Кое-что осталось незавершенным, я очень рассчитываю, что он продолжит работу над совершенствованием измерений тепловых параметров как интегральных схем, так и других классов полупроводниковых приборов. Я считаю, что он не только высококлассный инженер, но и состоялся как исследователь – он может ставить задачи, их самостоятельно анализировать и решать.

*(Отзыв прилагается).*

#### Председатель

**Ученому секретарю Совета** предоставляется слово для оглашения заключения организации, где выполнялась работа и отзыва ведущей организации.

**Ученый секретарь** оглашает заключение организации, где выполнялась работа. Затем зачитывает отзыв ведущей организации.

*(Заключение и отзыв прилагаются).*

Заключение организации, где выполнялась работа, оформлено в виде выписки из протокола заседания кафедры «Радиотехника, опто- и наноэлектроника», протокол №9 от 28 сентября 2016 г. Протокол подписан заведующим кафедрой «Радиотехника, опто- и наноэлектроника», д.т.н. Сергеевым Вячеславом Андреевичем, утвержден ректором УлГТУ Пинковым Александром Петровичем.

Отзыв ведущей организации – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» обсужден и одобрен на совместном заседании кафедр «Материалы функциональной электроники» и «Интегральная электроника и микросистемы», протокол №2а от 23.11.2016г. Отзыв подписан Гавриловым С.А., д.т.н., профес-

сором, зав. кафедрой «Материалы функциональной электроники», Крупкиной Т.Ю., д.т.н., профессором, зам. зав. кафедрой «Интегральная электроника и микросистемы» и Штерном Ю.Г., д.т.н., профессором кафедры «Материалы функциональной электроники». Утвержден Ректором Национального исследовательского университета «МИЭТ» д.т.н., профессором В.А. Беспаловым.

#### Председатель

На автореферат диссертации поступило 6 отзывов, все они положительные. Коллеги, в ваших материалах имеется обзор этих отзывов с указанием, кто этот отзыв составил и с указанием замечаний. Пожалуйста, посмотрите внимательно все имеющиеся отзывы.

Ярослав Геннадьевич, Вам слово для ответа на замечания ведущей организации и по отзывам, полученным на автореферат.

*(Отзывы прилагаются).*

#### Соискатель

##### **По замечаниям ведущей организации.**

Первое замечание. Одномерная модель в настоящее время является наиболее распространенной и используется подавляющим большинством исследователей. Разумеется, распределенные модели являются более адекватными, но это будет следующим этапом работы. На данном этапе мы ограничились одномерной тепловой моделью, поскольку, в первом приближении, она достаточно корректно описывает тепловое поведение ЦИС, в том числе и в пластиковых корпусах. Это связано с тем, что теплопроводность кремния и металлической подложки почти на два порядка лучше теплопроводности пластикового корпуса и, таким образом, первые два звена тепловой модели ИС в любом случае будут иметь одномерное поведение.

Со вторым и третьим замечаниями согласен.

По четвертому замечанию. Согласен, что появляющиеся при преобразовании погрешности действительно имеют место, и, по-видимому, приводят к тем ошибкам и расхождениям результатов сравнительных испытаний, которые были зарегистрированы. Хотя, стоит отметить, что уровень этих ошибок не так высок – это видно на сравнительных графиках данных измерений.

##### **Замечания по автореферату.**

##### **1. Институт сферы обслуживания и предпринимательства Донского государственного технического университета.**

Отзыв подписан заведующим кафедрой «Радиотехнические и электромеханические системы и комплексы д.т.н., профессором В.И. Марчуком.

С замечаниями согласен.

##### **2. Воронежский государственный технический университет.**

Отзыв подписан Заслуженным конструктором РСФСР, д.т.н., профессором, профессором кафедры полупроводниковой электроники и наноэлектроники М.И. Горловым.

Первое замечание – устройство показано на рисунке №7 в автореферате.

Второе замечание – эти данные есть в диссертации.

##### **3. ФБГОУ ВО «Пензенский государственный университет».**

Отзыв подписан к.т.н., доцентом кафедры «Информационно-измерительная техника и метрология» С.Б. Шаховым.

По замечанию – данные приведены в диссертации.

#### **4. ИТЦ микроэлектроники РАН (г. Санкт-Петербург) .**

Отзыв подписан ученым секретарем, к.ф.-м.н. А.Л. Закгеймом.

Первое замечание – согласен. Ограниченный объем автореферата не позволил полностью раскрыть эту тему.

Со вторым замечанием согласен.

#### Председатель

Слово предоставляется официальному оппоненту д.т.н. Пиганову Михаилу Николаевичу.

д.т.н., профессор Пиганов М.Н.

Уважаемый Председатель! Уважаемые члены диссертационного Совета! Данная диссертационная работа является исключительно полезной и выполненной на высоком уровне. Задачи, решаемые в данной работе, несомненно, являются актуальными, особенно в областях, связанных с авиационной и космической техникой. Научно-техническая ценность диссертации в том, что автор впервые показал возможность использования температурной зависимости времени задержки распространения сигнала для измерения и диагностики тепловых параметров ИС. Он разработал ряд способов по измерению ПТХ, теплового импеданса и разработал комплекс, который позволяет реализовать все эти способы и методики. Практическая ценность тоже не вызывает сомнений. Работа оформлена очень хорошо. Что касается достоверности, то она подтверждена повторяемостью результатов, совпадением расчетных и экспериментальных данных.

Оппонент оглашает отзыв (*Отзыв прилагается*).

#### Председатель

Соискателю предоставляется слово для ответа на замечания оппонента.

#### Соискатель

В основном с замечаниями согласен.

По третьему замечанию. Сами идеи обоих способов появились одновременно. Поэтому исследование двух методов шло параллельно. В результате оказалось, что способ двойного численного дифференцирования имеет выигрыш в соотношении точность/затраты – то есть для получения аналогичной точности необходим полином очень высокого порядка. Хотя у полиномиального метода есть свои преимущества – на выходе мы имеем аналитическую функцию и ее двойное дифференцирование не сопровождается накоплением ошибок как в случае с численным дифференцированием. Нет необходимости в сплайнировании. Можно даже сказать, что при не слишком высоких требованиях к точности аппроксимации исходной ПТХ, эти методы взаимозаменяемы и могут быть выбраны исследователем по своему

усмотрению. Другим важным обстоятельством разработки метода полиномиальной регрессии было то, что он служил подтверждением способа с численным дифференцированием.

Председатель

Слово для отзыва предоставляется официальному оппоненту – **к.т.н. Новикову Сергею Геннадьевичу.**

Оппонент оглашает отзыв (*отзыв прилагается*).

Председатель

Слово для ответа на замечания оппонента предоставляется соискателю.

Соискатель

По первому замечанию. В работе использовано более 50% публикаций не старше 10 лет. Публикации и труды, имеющие возраст более 30 лет – это фундаментальные работы, которые являются основой известных методов измерения и анализа тепловых параметров полупроводниковых изделий – это работы Карслоу, Закса, Горюнова, Чернышева, Давидова и других. Я старался работать с первоисточниками.

Второе замечание. Результат измерения тепловых параметров ПЛИС подтверждает возможность использования предложенного способа измерения для СВИС, которыми ПЛИС и являются, а не только для простых структур типа инверторов и простой логики.

С третьим замечанием согласен.

Четвертое замечание. В научных разработках новых способов и средств измерения не всегда можно найти сертифицированный образцовый измерительный прибор. Поэтому, если я не ошибаюсь, являются допустимыми сравнения с результатами, полученными известными способами.

С пятым замечанием согласен.

Председатель

Кто хочет выступить?

д.т.н., профессор Васильев К.К.

В целом, работа мне понравилась. Хотя, понятно, некоторые вопросы требуют дальнейшего развития. Прежде всего, по-моему замахиваться на ПЛИС еще рановато – над этим нужно еще поработать, а вот относительно транзисторов, ИС невысокой степени интеграции – вот там эти методы могут быть использованы с большой пользой. Повторюсь, в целом работа мне понравилась, сам соискатель выглядел достойно, чувствуется, что у него большой практический опыт. И, если планируется в перспективе работа над докторской диссертацией, то это будет очень хорошо. Тем более, как уже здесь говорили, тема практически неисчерпаема. Я буду голосовать «за».

д.т.н., доцент Киселев С.К.

Первое, что я хочу заметить, чувствуется большой опыт соискателя в той теме, которую он представлял. Нужно сказать, что кроме создания новых методов измерения тепловых параметров, был представлен для их обоснования хорошо подобранный математический аппарат. Это дало возможность решить те задачи, которые стояли перед соискателем. Единственное, что хотелось бы сказать, что если работа является метрологической, то хотелось бы несколько больше видеть именно метрологического обоснования, уделить немного больше внимания измерениям, погрешностям. Понятно, что соискатель смотрел на эту тему больше с точки контроля и диагностики параметров. С этой точки зрения диссертация хорошая, добротная и я ее поддерживаю.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Начну с того, что мне не понравилось. Не понравилось то, что в работе есть результат, который никак не прозвучал – хотя он является научным результатом хорошего уровня. Это идентификация, оценка параметров модели по экспериментальным данным. То есть, смотрите, по единственной характеристике, по единственной кривой ПТХ оцениваются сразу шесть параметров – два параметра по каждому переходу, по каждой тепловой неоднородности. А в общем случае, их может быть и больше. Вот этот подход никак не прозвучал – когда мы по единственной экспериментальной кривой строим подробную тепловую модель устройства. На самом деле – это достаточно красивое решение.

А в целом, достойная, хорошая диссертация с законченной, практической реализацией в виде измерительного комплекса. Я тоже буду голосовать «за».

д.т.н., доцент Сергеев В.А.

Хочу добавить пару слов о работе, которые остались нераскрытыми в его ответах на вопросы. Коллеги, линейные тепловые модели полупроводниковых приборов являются основными во всех действующих и международных стандартах. То есть никаких распределенных моделей в задачах тепловой диагностики никто не использует. Распределенные модели используются только в серьезных исследовательских работах. Теперь по ПЛИС и другим СВИС. Тепловые параметры СВИС контролируют по небольшому количеству тепловых элементов, чаще всего это защитные диоды, которые расположены обычно достаточно неудачно – на границе кристалла. Тем не менее, с ними проводят тепловые измерения. Здесь самое важное, чтобы измерения и сама методика измерения была воспроизводимой и повторяемой для одного и того же типа микросхем.

Действительно, идентификация параметров – задача номер один. Нужно не только измерить, но и определить, идентифицировать параметры тепловой модели. В диссертации показаны возможности, как для измерения, так и для идентификации параметров. Я думаю, что у работы есть большой потенциал для развития, и я уверен, что у работы будет продолжение.

д.т.н., доцент Негода В.Н.

Мне не понравились ошибки в оформлении презентации – трудно самостоятельно догадаться, что  $T$  большая в формуле и  $t$  маленькая на графике – это одно и то же. Но это так, небольшое замечание.

А вот сама идея, я ее еще на предзащите увидел и оценил – это потенциал удешевления измерительной аппаратуры. Сами способы измерения тепловых параметров, которые были приведены в диссертации, позволяют существенно упростить и удешевить подобные измерения. Конечно, за подобную диссертацию нужно голосовать «за».

д.т.н., профессор Смирнов В.И.

Несколько слов об актуальности работы. Если говорить о стандартах, то за рубежом стандартов достаточно много. Это стандарты JESD51-1, JESD51-14, очень много стандартов по дискретным полупроводниковым приборам, в том числе по MOSFET. Но к микросхемам эти стандарты не подходят. Из подходящих для ИС это стандарт JESD51-2а и дополнительно JESD51-6, JESD51-7, JESD51-8, JESD51-12. Так вот, в стандарте JESD51-2а показано, что измерять тепловые параметры ИС нужно по-другому. Рассматривать одномерную модель можно, но не учитывать, что тепло идет не только вниз, но и вверх и это сопоставимые потоки, вот это нельзя. Поэтому и модели нужно использовать более сложные и та одномерная модель, которую Вы использовали, она не совсем адекватна. Теперь по поводу теплового моделирования – за каждым звеном стоит определенный конструктивный элемент – можно показать 25 плакат? Если Вы указываете эквивалентную тепловую схему, состоящую из нескольких звеньев, то нужно указывать и какому конструктивному элементу соответствует то или иное звено, например, это – кристалл, это – кристаллодержатель, это – выводы и так далее. Еще хочу добавить, что все-таки у Вас проанализировано ограниченное количество типов цифровых интегральных схем. Не показано, можно ли подобными методами измерить тепловые параметры микроконтроллеров – а они, с моей точки зрения, представляют наибольший интерес.

В заключение хочу сказать, что диссертация – это квалификационная работа и с этой точки зрения у меня никаких сомнений нет. Глубина проработки, большое количество использованных методов и, самое главное, доведение до реального, действующего измерительного комплекса – это все, конечно, большой плюс диссертационной работе. Я поддерживаю эту работу.

Председатель

Кто еще хочет выступить? Нет желающих? Хорошо. Я думаю мы провели достаточно хорошую экспертизу. Ярослав Геннадьевич, Вам предоставляется возможность сказать заключительное слово.

**Соискателю предоставляется заключительное слово.**

Соискатель

Благодарю всех за отзывы и замечания, а также благодарю своего научного руководителя за хорошее, эффективное руководство.

Председатель

Переходим к голосованию. Какие будут предложения по составу счетной комиссии? Поступили предложения включить в состав счетной комиссии профессора Васильева К.К., профессора Афанасьева А.Н., доцента Негода В.Н.

---

Прошу голосовать. Возражений нет.

Председатель

Прошу счетную комиссию приступить к работе.

(Счетная комиссия организует тайное голосование.)

Председатель

Коллеги! Продолжаем нашу работу. Слово предоставляется председателю счетной комиссии профессору Васильеву К.К.

Оглашается протокол счетной комиссии.  
(Протокол счетной комиссии прилагается).

Кто против? (Нет).

Кто воздержался? (Нет).

Протокол счетной комиссии утверждается.

Таким образом, на основании результатов тайного голосования (за - 14 , против - нет, недействительных бюллетеней - нет) диссертационный совет Д212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете признает, что диссертация **Тетенькина Я.Г.** содержит новые решения в методах и средствах измерения тепловых параметров цифровых интегральных схем с использованием температурной зависимости времени задержки распространения сигнала, соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям (п.9 "Положения" ВАК), и присуждает **Тетенькину Ярославу Геннадьевичу** ученую степень кандидата технических наук по специальностям **05.11.01.**

Председатель

У членов Совета имеется проект заключения по диссертации **Тетенькина Я.Г.**. Есть предложение принять его за основу. Нет возражений? (Нет). Принимается.

Какие будут замечания, дополнения к проекту заключения?

(Обсуждение проекта).

Председатель

Есть предложение принять заключение в целом с учетом редакционных замечаний. Нет возражений? Принимается единогласно.

Защита окончена. Есть ли замечания по процедуре защиты?  
(Нет).

Поздравляет соискателя с успешной защитой. Благодарит членов совета и всех участников за внимание.

**Заседание объявляется закрытым.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.277.01 НА БАЗЕ ФГБОУ ВО  
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 28.12.2016 № 13

О присуждении Тетенькину Ярославу Геннадьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Методы и средства измерения тепловых параметров цифровых интегральных схем с использованием температурной зависимости времени задержки распространения сигнала» по специальности 05.11.01 «Приборы и методы измерения по видам измерения (электрические измерения)» принята к защите 24.10.2016 г. протокол № 10 диссертационным советом Д 212.277.01 на базе ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, приказ № 847-в от 08.12.2000 г.

**Соискатель** Тетенькин Ярослав Геннадьевич 1961 года рождения, в 1983 году окончил Ульяновский политехнический институт; с 2013 по 2016 год был прикреплен соискателем к ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»; работает в Ульяновском филиале ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук в должности ведущего инженера.

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» на кафедре «Радиотехника, опто- и наноэлектроника».

**Научный руководитель** – доктор технических наук, Сергеев Вячеслав Андреевич, директор Ульяновского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук.

**Официальные оппоненты:** Пиганов Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Конструирование и технология электронных



систем и устройств» ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева»;

Новиков Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, начальник Лаборатории твердотельной электроники Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы Ульяновского государственного университета дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» в своем положительном заключении, подписанном Гавриловым С.А., д.т.н., профессором, заведующим кафедрой «Материалы функциональной электроники», Крупкиной Т.Ю., д.т.н., профессором, заведующим кафедрой «Интегральная электроника и микросхемы» и Штерном Ю.И., д.т.н., профессором кафедры «Материалы функциональной электроники» указала, что диссертация является законченным научным исследованием, которая по актуальности, научным и практическим результатам и их значимости соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Соискатель имеет 18 опубликованных работ по теме диссертации, из них опубликованных в изданиях их перечня ВАК – 3 статьи и 7 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Общий объем опубликованных работ 5,8 п. л. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Сергеев, В. А. Определение тепловых параметров цифровых микросхем по температурным зависимостям времени задержки сигнала / В.А. Сергеев, Я.Г. Тетенькин // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № 3 (41). – С. 89-96.

2. Сергеев, В. А. Алгоритм определения тепловых параметров цифровых интегральных схем по переходным тепловым характеристикам / В. А. Сергеев, Я.Г. Тетенькин // Автоматизация процессов управления. – 2016. – № 1 (43). – С. 112-119.

3. Сергеев В.А. Кольцевые генераторы: принципы построения, характеристики и применение / В.А. Сергеев, Я.Г. Тетенькин // Успехи современной радиоэлектроники – 2015 – №12. – С. 77-92.

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы:

**1. Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук (г. Москва).** Отзыв подписан заведующим отделом Математического моделирования тепловых процессов в сложных технических системах, д.т.н., профессором А.Г. Мадерой. Замечаний нет.

**2. ФНПЦ АО «НПО «Марс» (г. Ульяновск).** Отзыв подписан ведущим инженером-исследователем, к.т.н. Н.В. Лучковым и утвержден Генеральным директором, председателем НТС, к.т.н. В.А. Маклаевым. Замечаний нет.

**3. Институт сферы обслуживания и предпринимательства Донского государственного технического университета.** Отзыв подписан заведующим кафедрой «Радиотехнические и электромеханические системы и комплексы» д.т.н., профессором В.И. Марчуком. Замечания: отсутствуют оценки инструментальной погрешности устройства измерения ТП ЦИС с использованием времени задержки распространения сигнала, приведенного на рис. 8; в автореферате имеются орфографические, пунктуационные ошибки и опечатки.

**4. Воронежский государственный технический университет.** Отзыв подписан Заслуженным конструктором РСФСР, д.т.н., профессором, профессором кафедры полупроводниковой электроники и нанoeлектроники М.И. Горловым. Замечания: в научной новизне работы приводится способ измерения теплового импеданса ИС с использованием импульсной модуляции частоты колебаний кольцевого генератора, однако по тексту автореферата не ясно, какое из приведенных в автореферате устройств реализует указанный способ; в пятой главе по результатам измерений получено, что среднеквадратическое отклонение после 100 секунд нагрева увеличивается до 0,05 К/Вт и объясняется это нестабильностью температуры окружающей среды и условиями теплообмена, при этом отсутствует экспериментальное подтверждение этого утверждения.

**5. ФБГОУ ВО «Пензенский государственный университет».** Отзыв подписан к.т.н., доцентом кафедры «Информационно-измерительная техника и метрология» С.Б. Шаховым. Замечания: в четвертой главе исследованы и приведены метрологические характеристики разработанного аппаратно-программного комплекса, однако отсутствуют конкретные числовые данные характеристик (диапазон измерения напряжений питания, потребляемого тока, частоты кварцевого генератора, температуры и погрешности измерения этих величин).

**6. НТЦ микроэлектроники РАН (г. Санкт-Петербург).** Отзыв подписан ученым секретарем, к.ф.-м.н. А.Л. Закгеймом. Замечания: в автореферате недостаточно обоснована точность измерения тепловых параметров ЦИС в начале разогрева ЦИС с эффективностью диагностики качества ЦИС; в тексте автореферата имеются пунктуационные ошибки (п. 3 научной новизны на стр. 5), использование англоязычных надписей на рисунках (рис. 2, рис. 7).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в области исследования по теме диссертации, подтверждаемой публикациями в рецензируемых научных изданиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований **разработаны:**

- экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса для измерения переходных тепловых характеристик (ПТХ) цифровых интегральных схем (ЦИС) с использованием температурной зависимости частоты кольцевого генератора, построенного на логических элементах ЦИС;

- установка для измерения температурных зависимостей частоты кольцевого генератора, построенного на логических элементах ЦИС в различных режимах его работы;

**предложены:**

- способ измерения ПТХ ЦИС с использованием температурной зависимости частоты кольцевого генератора, построенного на логических элементах ЦИС, позволяющий существенно снизить погрешность измерения ПТХ в начале нагрева ЦИС по сравнению с известными стандартными способами;

- способ измерения теплового сопротивления переход-корпус ЦИС по изменению частоты кольцевого генератора;

- способ и устройство измерения теплового импеданса ЦИС с использованием импульсной модуляции частоты генерации кольцевого генератора;

- способ измерения ПТХ ЦИС с логическими элементами триггерного типа путем формирования последовательности импульсов длительностью, равной времени задержки распространения сигнала, и последующего ее преобразования в напряжение;

- более простой по сравнению с известными алгоритм расчета тепловых параметров ЦИС по характерным точкам ПТХ, соответствующим корням ее второй производной в полулогарифмическом масштабе;

**доказана:**

- возможность применения разработанных способов и средств для измерения ПТХ и определения тепловых параметров ЦИС различных типов.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что:

- получены аналитические выражения и численные оценки температурной зависимости времени задержки распространения сигнала КМОП ЦИС при различных напряжениях питания, температуре окружающей среды и нагрузке;

- впервые показана возможность использования для измерения ПТХ ЦИС температурной зависимости времени задержки распространения сигнала, что позволяет обеспечить режим нагрева ЦИС, более близкий к режиму нагрева ЦИС в условиях эксплуатации, и устранить источники погрешностей измерения, присущие известным способам измерения ПТХ;

- исследована разрешающая способность алгоритма расчета тепловых параметров ЦИС по характерным точкам ПТХ, соответствующих корням ее второй производной в полулогарифмическом масштабе;

- получены оценки методической погрешности измерения ПТХ ЦИС в начале разогрева по изменению частоты кольцевого генератора и определена оптимальная длительность стробирующего импульса при измерении частоты методом дискретного счета.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

- способ и экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса для измерения тепловых параметров ЦИС использованы в исследовательской практике УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН и при выполнении НИР по договору с НТЦ микроэлектроники РАН в рамках проекта ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и технологий в Российской Федерации на 2013-2020 годы»;

- разработанный способ измерения ПТХ ЦИС и алгоритм расчета тепловых параметров ЦИС по их ПТХ использованы при выполнении проекта №1514 госзадания 2014/232 Минобрнауки России УлГТУ.

**Оценка достоверности** результатов исследования подтверждается повторяемостью результатов при многократных измерениях, совпадением результатов измерений с теоретическими расчетами и результатами моделирования; достоверность результатов подтверждается также их хорошим согласием с результатами, полученными другими исследователями.

**Личный вклад соискателя** состоит в его непосредственном участии в проведении теоретических и экспериментальных исследований, включая моделирование, разработку и изготовление экспериментальных установок; получение и систематизацию экспериментальных данных, апробацию результатов исследования, подготовку публикаций.

На заседании 28.12.2016 диссертационный совет принял решение присудить Тетенькину Я.Г. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 14, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель  
диссертационного совета

Ярушкина Надежда Глебовна

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Смирнов Виталий Иванович



28.12.2016 г.