

На правах рукописи



**Тетенькин Ярослав Геннадьевич**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ  
ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ  
ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА**

Специальность: 05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам измерений (электрические измерения)

**Автореферат**

Диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Ульяновск - 2016

Работа выполнена на базовой кафедре «Радиотехника, опто- и наноэлектроника»  
Ульяновского государственного технического университета

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент  
**Сергеев Вячеслав Андреевич**  
УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, директор;  
Ульяновский государственный технический  
университет, заведующий базовой кафедрой

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор  
**Пиганов Николай Михайлович**  
Самарский национальный исследовательский  
университет им. академика С.П. Королева (Са-  
марский университет), профессор кафедры  
«Конструирование и технология электронных  
систем и устройств»

кандидат технических наук  
**Новиков Сергей Геннадьевич**  
Научно-исследовательский технологический ин-  
ститут им. С.П. Капицы Ульяновского государст-  
венного университета, начальник лаборатории  
«Твердотельной электроники».

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное обра-  
зовательное учреждение Национальный исследо-  
вательский университет «Московский институт  
электронной техники»

Защита диссертации состоится «28» декабря 2016 года в 12 часов 00 минут  
на заседании диссертационного совета Д212.277.01 при Ульяновском государст-  
венном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Север-  
ный Венец, 32, ауд. 211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государ-  
ственного технического университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор



В.И. Смирнов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Температура активной области цифровых интегральных схем (ЦИС) во многом определяет их функциональную и физическую надежность. Особенно актуальным является контроль тепловых режимов работы ЦИС в составе электронных модулей, работающих в широких температурных диапазонах (от  $-60$  до  $+120$  °С), например в составе бортовой РЭА, а также контроль температуры кристаллов СБИС, имеющих высокую плотность рассеиваемой в них мощности (до  $100$  Вт/см<sup>2</sup> и выше).

Исследования механизмов влияния температуры на функциональную надежность и долговечность ЦИС проводят все ведущие мировые компании-разработчики и производители компонентой базы: Intel, Texas Instruments, SM Microelectronics, Infineon и т. д. Существенный вклад в развитие этих исследований внесли и российские ученые Чернышев А. А., Горлов М. И., Мадера А.Г., Путря М. Г., Строгонов А. В., Пиганов М.Н. и др.

Тепловые параметры (ТП) ЦИС, определяющие характер изменения температуры в активной области изделия при выделении в нем электрической мощности, закладываются на этапе проектирования, но в значительной степени определяются качеством изготовления ЦИС и могут иметь значительный разброс от образца к образцу. Поэтому одним из наиболее эффективных и широко применяемых методов диагностического контроля качества ЦИС является измерение их ТП.

Известные способы измерения температуры активной области полупроводниковых изделий (ППИ) с помощью ИК-техники и термоиндикаторов трудоемки, применимы только для открытых изделий и используются, в основном, в исследовательских целях. В условиях массового производства на стадиях выходного и входного контроля используют косвенные методы измерения ТП ППИ, в основе которых лежит разогрев ППИ потребляемой электрической мощностью и определение изменения температуры активной области ППИ по некоторому (как правило, электрическому) температурочувствительному параметру (ТЧП) изделия. Научные основы этих методов развиты в работах В.Л. Аронова, Н.Н.Горюнова, Д.И.Закса, В.Ф. Синкевича, Н.Н. Беспалова, В.А. Сергеева, D. Blackburn, F. Oettinger, V. Szekely, A. Poore, A. Frakas и др.

Базовыми ТП ЦИС, определяемыми технической документацией и контролируемые в условиях производства, являются тепловые сопротивления переход – корпус  $R_{Тп-к}$  и переход – среда  $R_{Тп-с}$ , которые определяют приращение температуры активной области ЦИС относительно корпуса или окружающей среды, соответственно, при заданном значении потребляемой мощности. Указанные ТП не позволяют оценить вклад в общую тепловую схему ЦИС отдельных элементов ее конструкции, определить температуру рабочей области ЦИС в динамических режимах их работы.

Для более адекватного описания тепловых свойств ЦИС, используют тепловые эквивалентные схемы, построенные на основе принципа теплоэлектрической аналогии. Для большинства практических приложений и задач диагностического контроля качества ЦИС используют линейные одномерные тепловые схемы, представляющие собой ряд последовательно соединенных  $RC$ -звеньев, каждое из которых соответствует определенному элементу (слою) конструкции ЦИС.

Параметры тепловой схемы можно определить либо по переходной тепловой характеристике (ПТХ)  $H(t)$  (или  $Z_T(t)$ ), которая представляет собой зависимость приращения температуры  $\Delta\theta(t)$  активной области ЦИС от времени, после подачи на ЦИС ступеньки греющей мощности единичного уровня, либо по тепловому импедансу  $Z_T(\omega)$ , который определяется как отношение комплексной амплитуды переменной составляющей температуры  $\theta_m(j\omega)$  активной области ЦИС к амплитуде  $P_m$  переменной составляющей мощности при изменении греющей мощности по гармоническому закону:  $P(t) = P_0 + P_m \sin \omega t$ .

Измерение теплового импеданса за счет фильтрации полезных сигналов может быть проведено с большей точностью, чем ПТХ, но требует (при одинаковом разрешении, т.е. числе отсчетов на декаду частоты и времени) существенно большего времени. Кроме того, до настоящего времени не предложено математически строгих алгоритмов определения ТП ЦИС по частотным зависимостям теплового импеданса.

В известных стандартных методах измерения ПТХ используется переключение ЦИС из режима нагрева электрической мощностью в режим измерения ТЧП. При этом необходимо обеспечить измерение малых изменений ТЧП на уровне больших средних значений и случайных помех за короткий интервал времени, пока температура активной области ЦИС не успевает заметно измениться. Режимы нагрева ЦИС, используемые в известных методах измерения ПТХ, как правило, отличаются от режимов выделения тепла в ЦИС в условиях эксплуатации. Указанные факторы приводят к значительным погрешностям при определении ТП ЦИС.

Для всех классов и типов ЦИС характерно общее свойство – задержка распространения сигнала. Этот параметр у современных ЦИС изменяется в очень широких пределах и довольно сильно зависит от температуры. Современные средства измерений позволяют измерять короткие интервалы времени с пикосекундной точностью, что дает возможность использовать время задержки распространения сигнала (ВЗРС) в качестве ТЧП при измерении ПТХ ЦИС.

**Цель диссертационной работы** – разработка и исследование новых, более точных по сравнению с известными способов и автоматизированных средств измерения ТП ЦИС по переходным тепловым характеристикам с использованием температурной зависимости времени задержки распространения сигнала.

Поставленная цель достигается решением **следующих научных задач**:

1. Анализ функциональных возможностей и метрологических характеристик существующих способов и устройств для измерения ТП ЦИС.

2. Теоретический анализ и экспериментальное исследование зависимостей ВЗРС ЦИС различных типов от температуры, напряжения питания и нагрузки.

3. Разработка способов и средств измерения ПТХ ЦИС с использованием температурной зависимости ВЗРС, анализ источников и оценка методических погрешностей указанных способов и средств.

3. Разработка и анализ разрешающей способности простого (промышленно ориентированного) алгоритма определения параметров одномерных линейных тепловых схем ЦИС по экспериментальным ПТХ.

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

5. Проведение и анализ результатов сравнительных выборочных измерений ТП ЦИС разработанными и известными средствами.

#### **Методы исследований.**

При выполнении работы использовались принципы теплоэлектрической аналогии, теория радиотехнических цепей и сигналов, методы теории погрешностей и статистической обработки результатов измерений. Моделирование схем и обработка экспериментальных результатов осуществлялось в пакетах MathCad, Quartus II, Multisim и Excel. При разработке программного обеспечения измерительного комплекса использовались компиляторы WinAVR и Atmel Studio 6.2, языки программирования Си и Verilog HDL.

#### **Научная новизна работы.**

1. Впервые показана возможность использования для измерения ПТХ ЦИС температурной зависимости ВЗРС с ее преобразованием в температурную зависимость частоты кольцевого генератора (КГ), построенного на логических элементах (ЛЭ) ЦИС, что позволило обеспечить режим нагрева ЦИС при измерении, более близкий к режиму нагрева ЦИС в условиях эксплуатации и устранить источники погрешностей измерения, присущие известным способам измерения ПТХ:

- влияние переходных процессов при переключении ЦИС из режима нагрева в режим измерения;
- влияние паразитных сопротивлений во внутренних цепях питания ЦИС;
- погрешность, обусловленную пространственным разделением источников тепла и датчиков температуры.

2. Показано, что применение температурной зависимости частоты КГ с использованием умножения частоты позволяет снизить относительную погрешность измерения ПТХ в начале нагрева ЦИС до десятых долей процента, что является определяющим для диагностики качества структуры и монтажа кристалла ЦИС.

3. Разработан более простой по сравнению с известными алгоритм определения параметров линейной тепловой схемы ЦИС по ПТХ. Показано, что погрешность определения параметров отдельных звеньев тепловой цепи ЦИС быстро растет с уменьшением отношения тепловых постоянных времени соседних RC-звеньев и при отношении меньше 5 превышает 20 %.

4. Предложен способ измерения теплового импеданса ЦИС с использованием импульсной модуляции частоты колебаний КГ, построенного на ЛЭ ЦИС, исключая погрешность измерения, присущую известным способам с использованием в качестве ТЧП электрических параметров ЦИС и обусловленную паразитными электрическими переходными процессами.

5. Предложен способ измерения ПТХ ЦИС с ЛЭ любого типа с использованием ВЗРС в качестве ТЧП, путем формирования последовательности импульсов с длительностью, равной ВЗРС, и последующего преобразования этих импульсных последовательностей в напряжение.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Разработаны новые способы и устройства измерения ПТХ ЦИС для задач диагностического контроля качества сборки ЦИС, имеющие лучшие функциональные возможности и точность по сравнению с известными средствами.

2. Предложен новый, более простой по сравнению с известным методом структурных функций (промышленно ориентированный) алгоритм расчета параметров линейных тепловых схем ЦИС по экспериментальным ПТХ.

3. Разработан и изготовлен автоматизированный аппаратно-программный измерительный комплекс, который может быть использован как предприятиями – производителями ЦИС, так и исследовательским лабораториям для измерения и анализа тепловых характеристик ЦИС.

4. Разработано программное обеспечение измерительного комплекса, которое может служить основой при разработке управляющих программ для микропроцессорных измерительных приборов аналогичного назначения.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Использование для измерения ПТХ ЦИС температурных зависимостей ВЗРС ЦИС, позволяет обеспечить режим нагрева ЦИС при измерении, более близкий к режиму нагрева ЦИС в условиях эксплуатации и устранить источники погрешностей измерения, присущие известным способам измерения ПТХ:

- влияние переходных процессов при переключении ЦИС из режима нагрева в режим измерения;

- влияние паразитных сопротивлений дорожек металлизации во внутренних цепях питания ЦИС.

2. Способ измерения ПТХ ЦИС по температурной зависимости частоты КГ, построенного на ЛЭ ЦИС, имеющий более высокую точность по сравнению с известными способами измерения ПТХ в начале нагрева ЦИС, что позволяет повысить достоверность диагностики качества структуры и монтажа кристалла ЦИС.

3. Способ измерения ПТХ дискретных полупроводниковых приборов и ЦИС с ЛЭ любого типа с использованием ВЗРС в качестве ТЧП, путем формирования последовательности импульсов с длительностью, равной ВЗРС, и последующего преобразования этих импульсных последовательностей в напряжение.

4. Новый, легко автоматизируемый, алгоритм определения параметров отдельных звеньев линейных тепловых схем ЦИС и результаты анализа разрешающей способности алгоритма.

5. Способ измерения теплового импеданса ЦИС с использованием импульсной модуляции частоты генерации КГ, исключающий погрешности известных способов измерения теплового импеданса с использованием электрических ТЧП, обусловленные переходными электрическими процессами и падением напряжения на внутренних шинах питания ЦИС.

6. Результаты выборочных сравнительных измерений ПТХ и определения ТП ЦИС различных типов, включая ПЛИС EPM240T100C5 и Lattice iM4A3-64/32.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск 2013, 2015); научно-технической конференции ППС УлГТУ «Вузовская наука – производству» (Ульяновск, 2013, 2014, 2015)

Доклады по материалам работы включены в программу Международной конференции «Фундаментальные проблемы электронного приборостроения» (ИНТЕРМАТИК-2016, г. Москва)

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы использованы в УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН при выполнении НИР по договору № И2014-15 от 02 июля 2014 г. с НТЦ микроэлектроники РАН на разработку экспериментального образца аппаратно-программного комплекса для контроля и анализа тепловых характеристик мощных полупроводниковых излучателей в рамках проекта ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» и в Ульяновском государственном техническом университете – при выполнении проекта №1514 «Моделирование и исследование теплоэлектрических процессов в гетероструктурах светоизлучающих приборов при их работе в динамических режимах» Госзадания 2014/232.

**Личный вклад автора.** Основные результаты диссертационной работы, включая разработку и компьютерную реализацию алгоритма расчета тепловых параметров по ПТХ ЦИС, макетирование экспериментальных установок, проведение исследований и обработка результатов получены автором лично. Обсуждение и интерпретация экспериментальных результатов проводились при его непосредственном участии.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 3 статьи в изданиях из перечня ВАК, 7 авторских свидетельств и патентов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 157 наименований. Общий объем диссертации 144 страницы, включая 74 рисунка и 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы исследования, сформулирована цель работы и задачи, которые необходимо решить.

**В первой главе** отмечается сильное влияние температуры на интенсивность отказов ЦИС, рассмотрены линейные одномерные и распределенные тепловые модели ЦИС, проведен анализ и отмечены недостатки и ограничения существующих косвенных методов и средств измерения ТП ЦИС, определены пути совершенствования указанных методов и средств.

Согласно принципу теплоэлектрической аналогии тепловая схема ЦИС планарной конструкции с односторонним отводом тепла, в которой тепловой поток направлен от активной области на рабочей поверхности чипа к корпусу прибора и далее в окружающую среду, в приближении Фостера представляет собой  $m$  последовательно соединенных  $RC$ -звеньев (рис. 1). Задача контроля тепловых свойств ЦИС сводится к определению значений тепловых сопротивлений ( $R_{Ti}$ ) и теплоемкостей ( $C_{Ti}$ ) или тепловых постоянных времени ( $\tau_{Ti} = R_{Ti}C_{Ti}$ )  $RC$ -звеньев тепловой схемы, соответствующих определенным слоям конструкции ЦИС.

Для тепловой схемы, состоящей из  $m$   $RC$ -звеньев, зависимость  $\Delta\theta_n(t)$  при подаче ступеньки мощности описывается выражением:

$$\Delta\theta_n = P \cdot H(t) = P \sum_{i=1}^m R_{Ti} (1 - \exp(-t/\tau_{Ti})) \quad (1)$$

где  $P$  – мощность, потребляемая ЦИС;  $H(t) = \sum_{i=1}^m R_{Ti} (1 - \exp(-t/\tau_{Ti}))$  – ПТХ или переходное тепловое сопротивление ЦИС.

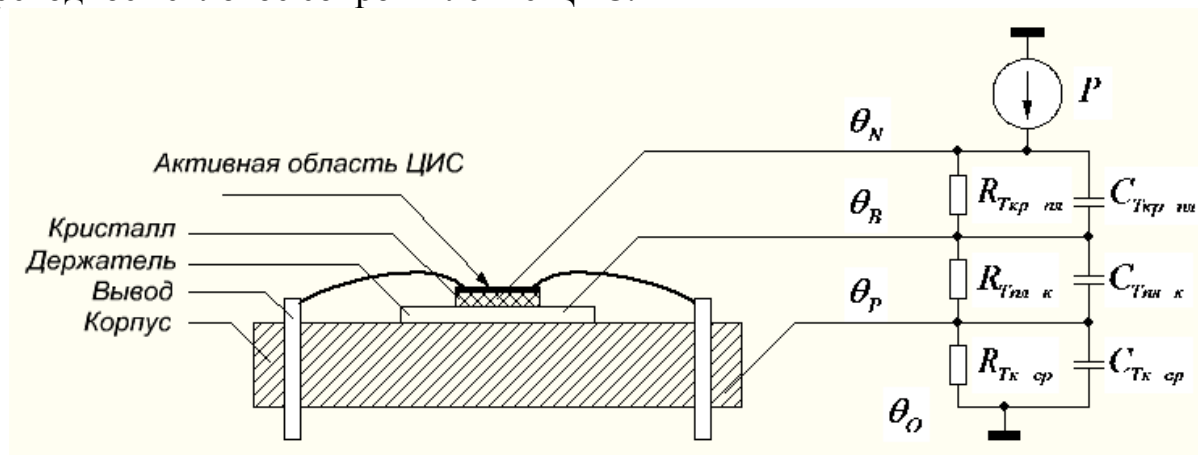


Рис. 1. Конструкция ЦИС схематично и соответствующая ей тепловая схема в приближении Фостера:  $\theta_N$  – температура активной области,  $\theta_B$  – температура кристаллодержателя,  $\theta_P$  – температура корпуса ЦИС,  $\theta_0$  – температура окружающей среды,

Стандартные и наиболее распространенные методы измерения ТП ЦИС представлены в стандартах EIA/JEDEC JESD51. Стандарт JESD51-1 определяет способ измерения ТП с попеременным пропусканием через доступные в ЦИС  $p$ - $n$ -переходы, являющиеся источниками нагрева и датчиками ТЧП, греющего и измерительного токов. Недостатком этого способа является значительная погрешность измерения напряжения ТЧП на  $p$ - $n$ -переходе сразу же после выключения греющей мощности из-за влияния паразитных переходных электрических процессов (около 40–60 мкс), возникающих в  $p$ - $n$ -переходе при переключении из режима нагрева в измерительный режим. Для снижения этой погрешности измерение необходимо проводить через некоторое время задержки после выключения греющей мощности, за которое электрический переходный процесс завершится. Однако, за это время температура  $p$ - $n$ -перехода может заметно измениться, что вносит существенную погрешность (до 10–15%) в результаты измерений. Введение такой задержки ограничивает максимальную частоту (5–10 кГц) дискретизации измерений, что в свою очередь ограничивает точность анализа начальных участков ПТХ ЦИС.

Более точные результаты можно получить, используя в качестве анализируемой характеристики частотную зависимость теплового импеданса ЦИС  $Z_T(\omega)$ , которая для тепловой цепи, описываемой формулой (1), имеет вид

$$Z_T(j\omega) = \theta_{n1}(j\omega) / P_m = \sum_{i=1}^m R_{Ti} / (1 + j\omega\tau_{Ti}). \quad (2)$$

Измерение теплового импеданса ЦИС затруднительно из-за сложности задания греющей мощности, изменяющейся по гармоническому закону с достаточно большой амплитудой. Кроме того, время необходимое для измерения частотной зависимости теплового импеданса существенно больше времени  $T_{max} \approx 3\tau_{Tm}$ , необходимого для измерения ПТХ с тем же разрешением (то есть, с тем же числом отсчетов на декаду временной шкалы):



$$T_{изм}^{ТП} = \eta T_{max} \frac{\sqrt[k]{10}}{\sqrt[k]{10} - 1}, \quad (3)$$

где  $k$  – число отсчетов на декаду,  $\eta$  – число периодов при измерении амплитуды переменной составляющей температуры,  $\tau_{Тм}$  – максимальная тепловая постоянная времени тепловой схемы.

Для задач промышленно ориентированного диагностического контроля качества ЦИС более предпочтительным является способ определения ТП по ПТХ. Способ измерения ПТХ ЦИС по стандарту JESD51-14, реализованный в тепловом тестере Т3Ster (Thermal Transient Tester) компании Mentor Graphics, состоит в измерении падения напряжения на одном из  $p$ - $n$ -переходов ЦИС при малом прямом токе в короткие паузы в процессе разогрева ЦИС ступенькой мощности заданного уровня. Необходимость измерения небольших изменений температуры  $p$ - $n$ -перехода по изменению напряжения на нем при отсутствии возможности ее усреднения в процессе измерения существенно усложняет аппаратную реализацию способа и повышает его погрешность.

Алгоритм определения ТП ППИ по измеренной ПТХ основан на расчете так называемых куммулятивной  $F_{кум} = C_{Т\Sigma}(R_{Т\Sigma})$  и дифференциальной  $F_{дифф} = dF_{кум} / dR_{Т\Sigma}$  структурных функций, где  $C_{Т\Sigma}$  и  $R_{Т\Sigma}$  – суммарные значения теплоемкости и тепловых сопротивлений звеньев тепловой цепи по модели Кауэра по мере прохождения теплового потока от  $p$ - $n$ -перехода к теплоотводу. Алгоритм основан на многоступенчатых преобразованиях, что приводит к накоплению систематических ошибок, и требует значительных временных затрат на обработку результатов, поскольку для точного расчета тепловых параметров необходимо до  $10^7$  точек ПТХ.

Известные средства измерения ТП ЦИС с использованием в качестве ТЧП электрических параметров ЦИС и различных видов импульсной модуляции (АИМ, ШИМ, ЧИМ) греющей мощности имеют значительную погрешность, обусловленную переходными электрическими процессами при переключении ЦИС из режима нагрева в режим измерения и падением напряжения на внутренних шинах питания.

На основе проеденного анализа сделан вывод, что перспективным техническим решением для измерения ПТХ ЦИС является использование в качестве ТЧП ВЗРС ЦИС. Использование температурных зависимостей ВЗРС позволяет избавиться от некоторых источников погрешностей, присущих стандартным методам измерения ПТХ, что, в свою очередь, позволяет увеличить точность и достоверность диагностики качества ЦИС.

С учетом того, что КМОП технологии являются доминирующими при производстве ЦИС и практически вытеснили логику на основе биполярных транзисторов, а при производстве микроконтроллеров, процессоров, ПЛИС являются фактически единственной технологией, основное внимание при анализе динамических параметров было уделено ЦИС с КМОП структурами.

**Во второй главе** представлены результаты теоретического анализа и экспериментального исследования зависимостей ВЗРС кремниевых КМОП ЦИС от параметров структуры и режима работы, а также результаты разработки и исследования методов измерения ВЗРС.

Показано, что для современных ЦИС (быстродействующих процессоров, ПЛИС и т. д.) ВЗРС достигает десятков пикосекунд и прямые методы измерения столь малых временных интервалов (а, тем более, их температурных зависимостей) с разрешающей способностью 0,2 – 0,4 пс для целей измерения ПТХ ЦИС в реальном масштабе времени практически не реализуемы.

Необходимую точность измерения малых температурных изменений ВЗРС ЦИС можно получить, используя включение ЛЭ ЦИС по схеме кольцевого генератора (КГ), как это показано на рис.2 для частного случая трехкаскадного КГ.

Частота генерации КГ зависит только от времени  $\tau_d$  задержки распространения сигнала в ЛЭ и общего числа  $m$  таких элементов в структуре КГ и определяется как:

$$f_{КГ} = \frac{1}{2m\tau_d}. \quad (4)$$

Анализ зависимости  $\tau_d$  от температуры и параметров режима проведен на примере базового элемента КМОП ЦИС – КМОП инвертора, представляющего собой пару комплементарных  $n$ -канального (NMOS) и  $p$ -канального (PMOS) КМОП транзисторов с подключенным к его выходу конденсатором нагрузки (рис. 3).

В результате анализа временных параметров данного инвертора получено выражение для частоты КГ:

$$f_0 = \frac{1}{2m \left( \frac{C}{b_N(V_{DD}-V_{TN})} \left\{ \frac{2V_{TN}}{(V_{DD}-V_{TN})} + \ln \left( \frac{3V_{DD}-4V_{TN}}{V_{DD}} \right) \right\} + \frac{C}{b_P(V_{DD}+V_{TP})} \left\{ \frac{2V_{TP}}{(V_{DD}+V_{TP})} + \ln \left( \frac{3V_{DD}+4V_{TP}}{V_{DD}} \right) \right\} \right)}. \quad (5)$$

где  $V_{DD}$  – напряжение источника питания;  $v_{TN(P)}$  – пороговое напряжения NMOS (PMOS) транзистора; технологический параметр  $b_{N(P)} = \mu_{N(P)} C_{ox} W/L$ ;  $\mu_{N(P)}$  – подвижность носителей заряда в каналах транзисторов;  $C_{ox}$ ,  $W$  и  $L$  – емкость, ширина и длина затвора этих транзисторов, соответственно.

Из (5) следует, что основными факторами, определяющими зависимость частоты КГ от температуры, при стабильном напряжении питания ( $\pm 0,1\%$ ) и неизменной емкости нагрузки являются пороговые напряжения комплементарной пары МОП-транзисторов и подвижность носителей  $\mu_{P(N)}$ .

Температурная зависимость порогового напряжения обусловлена изменением положения уровня Ферми, объемного заряда в обедненной области и заряда в диэлектрике. Поскольку значение температурного коэффициента ширины запрещенной зоны кремния в области комнатных температур составляет – 0,27 мВ/К, то для уровней легирования  $N_A \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  типичные значения температурного коэффициента порогового напряжения находятся в диапазоне –3.5...–1.5 мВ/К.

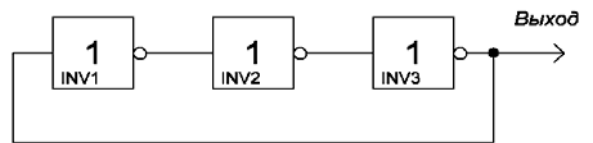


Рис. 2. Трехэлементный кольцевой генератор

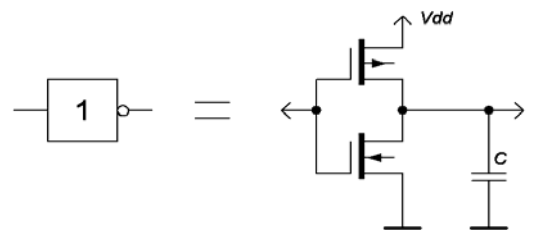


Рис. 3. Инвертор КМОП

Зависимость подвижности от температуры определяется механизмом рассеяния носителей. Если преобладает рассеяние на узлах решетки, то  $\mu \sim 1/T^{3/2}$ , если же преобладает рассеяние на ионах примеси, то  $\mu \sim T^{3/2}$ . В диапазоне температур  $-60 \dots +125 \text{ }^\circ\text{C}$  подвижность может изменяться в 4 – 5 раз.

Для измерения коротких интервалов времени предложено устройство, принцип работы которого основан на дифференциальной рециркуляции двух импульсов с определенным начальным временным интервалом между ними. Первый из этих импульсов циркулирует по кругу с образцовым ЛЭ ЦИС, второй – по цепи с исследуемым ЛЭ, временные параметры которого (зависимость ВЗРС от температуры) необходимо исследовать.

Для измерения ПТХ ЦИС с ЛЭ типа инверторов предложено использовать способ с преобразованием ВЗРС в частоту КГ, а для ЦИС с триггерными элементами – способ с формированием последовательности импульсов с длительностью равной ВЗРС. Рассмотрены факторы, влияющие на стабильность частоты КГ.

Экспериментальные температурные зависимости частоты колебаний пяти экземпляров КГ, собранных на ЛЭ ЦИС типа CD4049, приведены на рис. 4. ЦИС с ЛЭ, соединенными по схеме КГ, помещались в термостат и при каждом значении температуры термостата выдерживались не менее 10 минут, так что температура  $\theta_K$  корпуса ЦИС принимала равновесное значение, равное температуре термостата. Затем, в течение 100 мкс измерялась частота КГ.

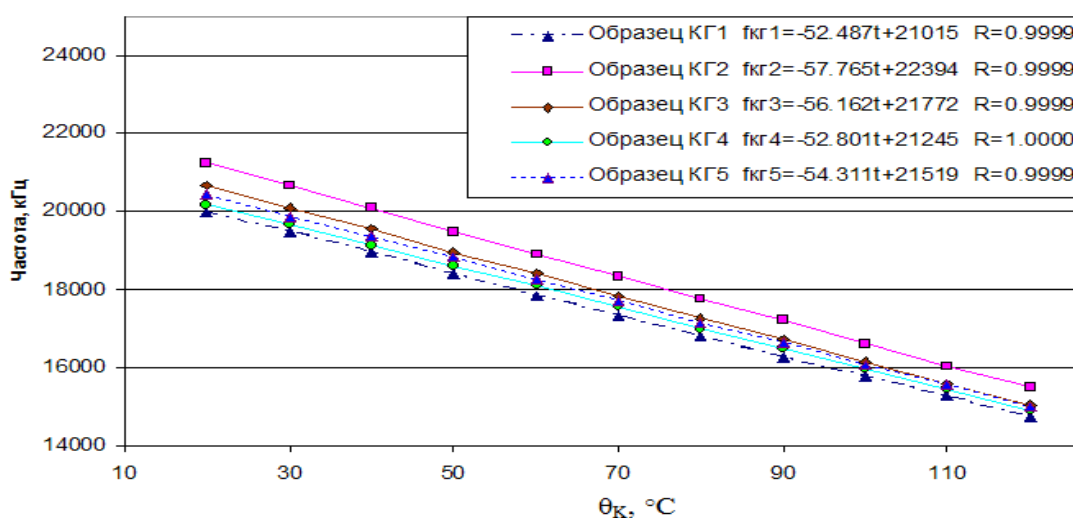


Рис. 4. Зависимости частоты колебаний образцов КГ от температуры корпуса ЦИС

Как видно из значений коэффициента детерминации  $R$ , точность линейной аппроксимации экспериментальных зависимостей весьма высокая, что позволяет использовать эти зависимости при измерении ТП ЦИС. При этом относительная температурная чувствительность ВЗРС в ЦИС не уступает чувствительности прямого падения напряжения на диоде и на порядок больше температурной чувствительности напряжения логической «1», часто используемого в качестве ТЧП.

**В третьей главе** представлены результаты разработки новых способов и устройств измерения ПТХ и ТИ ЦИС, основанных на использовании зависимости ВЗРС ЦИС от температуры, а также алгоритмов расчета ТП по ПТХ.

С использованием режима КГ разработан способ и устройство измерения теплового сопротивления переход-корпус ЦИС. На рис. 5 показана структурная схема устройства, а на рис. 6 – диаграммы напряжений, поясняющих его работу.

Устройство содержит контролируемую микросхему 1, источник 2 питания напряжением  $U_{num}$ , формирователь 3 импульса цикла измерения, низкоомный токосъемный резистор  $R_4$ , схему 2И-НЕ 5, цифровой частотомер 6, цифровой вольтметр 7, формирователь 8 строб-импульсов, триггер 9, цифровой коммутатор 10, первый счетчик 11, второй счетчик 12, вычислитель 13.

КГ, созданный из нечетного числа ЛЭ контролируемой ЦИС, включается на некоторое время  $T_{Ц}$  цикла измерения (рис. 6, а), в несколько раз превышающее тепловую постоянную времени переход-корпус данного типа микросхем. Длительность периода следования  $T_k$  генерируемых импульсов (рис. 6, б) согласно (4) определяется ВЗРС  $\tau_{зад}$  ЛЭ микросхемы  $T_k = 2\tau_{зад}n$ , где  $n$  – количество ЛЭ в КГ.

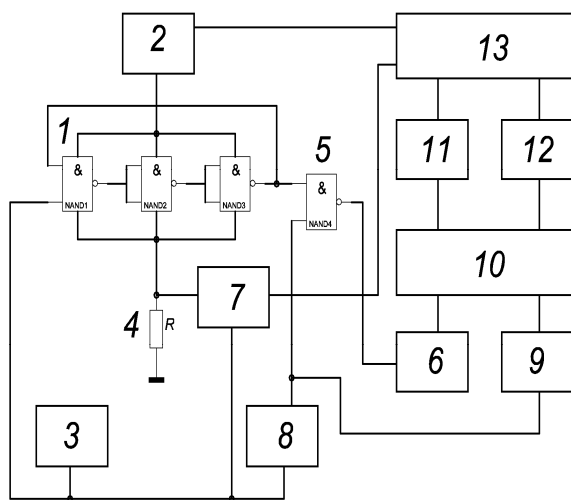


Рис. 5. Структурная схема устройства измерения теплового сопротивления ЦИС

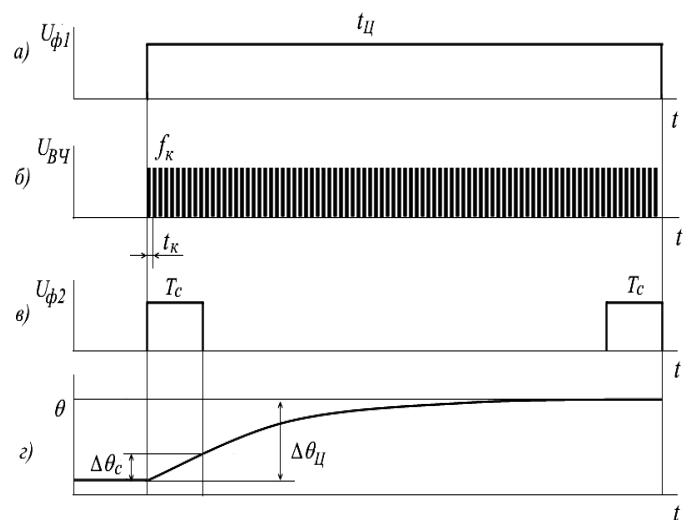


Рис. 6. Диаграммы напряжений, поясняющие работу устройства

В режиме генерации мощность, потребляемая ЦИС от источника питания, пропорциональна частоте генерации КГ:  $P(t) = CU^2 f$  и возрастает на несколько порядков величины по сравнению со статическим режимом. В результате ЛЭ ЦИС в режиме генерирования будут заметно разогреваться. Изменение температуры за время нагрева определяется по уходу частоты колебаний КГ:  $\Delta\theta(T_{Ц}) = \Delta f / K_f$ , где  $K_f$  – температурный коэффициент частоты генерации КГ, и тепловое сопротивление переход-корпус ЦИС будет равно:

$$R_{Tn \kappa} = \frac{\Delta f}{I_{cp}^{nom} \cdot U_{num} \cdot K_f} \quad (6)$$

где  $I_{cp}^{nom}$  – средний за цикл измерения ток, потребляемый ЦИС.

При измерении частоты электронно-счетным частотомером погрешность измерения определяется нестабильностью кварцевого опорного генератора, которой можно пренебречь, и погрешностью дискретизации, которая равна:

$$\delta_f = \frac{1}{f_k \cdot T_c}, \quad (7)$$

где  $f_k$  – частота генерации КГ;  $T_c$  – время счета частоты  $f_k$ .

В предложенном варианте устройства, реализующем способ, наиболее существенной будет методическая погрешность, обусловленная изменением частоты из-за нагрева контролируемой микросхемы за время  $T_c$  счета (рис. 6, з) в начале цикла измерения. Приращение температуры  $\Delta\theta_c$  за время счета  $T_c$  и по окончании цикла нагрева  $\Delta\theta_{Ц}$  будут иметь вид:

$$\Delta\theta_c = R_{Tn-k} \Delta P (1 - \exp(-T_c/\tau_{Tn-k})); \quad (8 \text{ а})$$

$$\Delta\theta_{Ц} = R_{Tn-k} \Delta P. \quad (8 \text{ б})$$

При выполнении неравенства  $T_c \ll \tau_T \ll T_{Ц}$  относительная методическая погрешность измерения частоты  $\delta_T$  за время счета  $T_c$  будет равна:

$$\delta_T = \frac{\Delta\theta_c}{\Delta\theta_{Ц}} = 1 - \exp(-T_c/\tau_T) \approx \frac{T_c}{\tau_T}. \quad (9)$$

Из (7) и (9) следует, что суммарная погрешность измерения частоты за время  $T_c$  будет минимальной при  $T_c = \sqrt{\tau_T T_k}$ . При  $f_k \approx 10^7$  Гц и  $\tau_T \approx 10^{-1}$  с  $T_c \approx 100$  мкс и погрешность измерения частоты в начале нагрева не будет превышать 1%.

На рис. 7 приведена структурная схема устройства, реализующего способ измерения ПТХ ЦИС, тепловая схема которых содержит несколько RC-звеньев.

Устройство содержит контролируемую ЦИС 1, нечетное число ЛЭ которой соединены по схеме КГ, источник 2 питания напряжением  $U_{num}$ , блок управления 3, токозъемный резистор 4, схему 2И-НЕ 5, используемую для снижения влияния счетчика импульсов на частоту генерации КГ, генератор 6 строб-импульсов, цифровой вольтметр 7, счетчик импульсов 8, вычислитель 9 и индикатор 10.

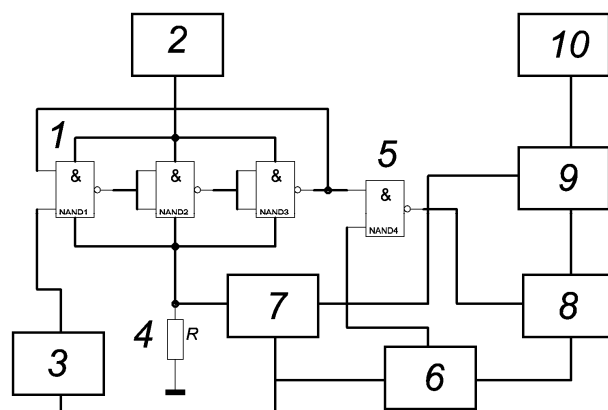


Рис. 7. Структурная схема устройства для измерения ПТХ ЦИС с ЛЭ типа инвертор

В основе способа лежат два физических процесса: саморазогрев ЛЭ ЦИС, соединенных по схеме КГ собственными генерируемыми импульсами, и уменьшение частоты генерации КГ с ростом температуры. ПТХ рассчитывается по формуле:

$$H(t_i) = \frac{f_{КГ}(0) - f_{КГ}(t_i)}{K_f U_{num} I_{nom}^{cp}(t_i)}. \quad (10)$$

Также как и в описанном выше способе, погрешность, обусловленная изменением температуры за время действия строб-импульса, будет наиболее существенной в начале нагрева, и ее можно оценить величиной  $\Delta_{и} \approx \frac{K_f \Delta_{и_{кр}} T_c}{f_{КГ}(0) \Phi_{Ткр}}$ , где

$\tau_{Ткр}$  – тепловая постоянная времени кристалла ЦИС,  $\Delta_{и_{кр}} \approx 0,63 R_{Ткр} P(0)$  – изменение температуры активной области ЦИС за время равное тепловой постоянной

времени кристалла ЦИС,  $R_{ТКК}$  – тепловое сопротивление кристалла ЦИС. Оптимальная длительность строб-импульса  $T_c^{opt}$ , при которой суммарная погрешность измерения изменения температуры будет минимальна, определяется из условия равенства погрешностей:  $\delta_n = \delta_f$ , откуда:

$$T_c^{opt} \approx \sqrt{\frac{\tau_{Ткр}}{K_f \Delta\theta_{кр}}} . \quad (11)$$

При типичных значениях  $\tau_{Ткр} = 10^{-3}$  с,  $\Delta\theta_{кр} \approx 10$  °С,  $K_f \approx 10^4$  Гц/°С и  $f_{КГ}(0) = 3 \cdot 10^6$  Гц из (11) получим величину  $T_c^{opt} \approx 100$  мкс, а  $\delta\theta = \delta_f \approx 0,003$ .

Для ЦИС с ЛЭ, отличными от инверторов, разработан способ измерения ПТХ без создания КГ и преобразования температурных зависимостей ВЗРС в температурные зависимости частоты КГ. Структурная схема устройства, реализующего способ, показана на рис. 8. Устройство содержит контролируруемую ЦИС 1, источник 2 питания с известным выходным напряжением питания  $E_{nom}$ , генератор прямоугольных импульсов 3, токоёмный резистор 4 с известным сопротивлением  $R$ , преобразователь 5 разности фаз в напряжение, устройство управления 6, управляемый аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 7, цифровой вольтметр 8 среднего значения переменного напряжения, вычислитель 9 и индикатор 10.

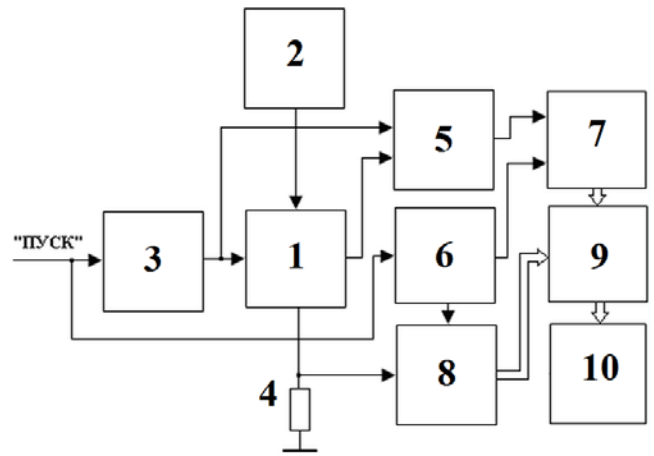


Рис. 8. Структурная схема устройства для измерения ПТХ ЦИС с ЛЭ произвольного типа

При подаче на вход ЦИС периодической последовательности импульсов напряжения задержка распространения сигнала в ЦИС приведет к появлению разности фаз между входными и выходными импульсами напряжения:  $\Delta\varphi = 2\pi f_{сл} \tau_{зад}$ . Преобразуя эту разность фаз в напряжение любым известным способом, получим напряжение  $U_\tau(t)$ , линейно зависящее от времени  $\tau_{зад}$  задержки:  $U_\tau(t) = S\Delta\varphi = 2S\pi f_{сл} \tau_{зад}$ , где  $S$  – крутизна преобразования разности фаз в напряжение, и ПТХ рассчитывается по формуле:

$$H(t) = \Delta u_n(t) / P_{nom} = \frac{U_\tau(t) - U_\tau(0)}{P_{nom} K_\tau U_\tau(0)} . \quad (12)$$

Кроме задачи повышения точности измерения ПТХ для целей диагностического контроля качества ЦИС необходимо решить задачу повышения точности идентификации и расчета параметров тепловой схемы. Тепловые постоянные времени слоев конструкции современных ЦИС обычно различаются на несколько порядков величины и на графике ПТХ, построенном в полулогарифмическом масштабе по времени, отчетливо наблюдаются участки быстрого и медленного изменения. В работе предложен алгоритм нахождения точек с наименьшей и наибольшей крутизной ПТХ в полулогарифмическом масштабе по времени путем ее двойного дифференцирования, которое аналогично умножению производной в обычном линейном

масштабе на линейную функцию  $g(t)=t$  (см. А.С. СССР №1105831). Алгоритм проиллюстрирован на рис. 9 на примере анализа функции вида:  $H(t) = 10 \cdot (1 - \exp(-t/10)) + 10 \cdot (1 - \exp(-t/1000)) + 10 \cdot (1 - \exp(-t/100000))$ .

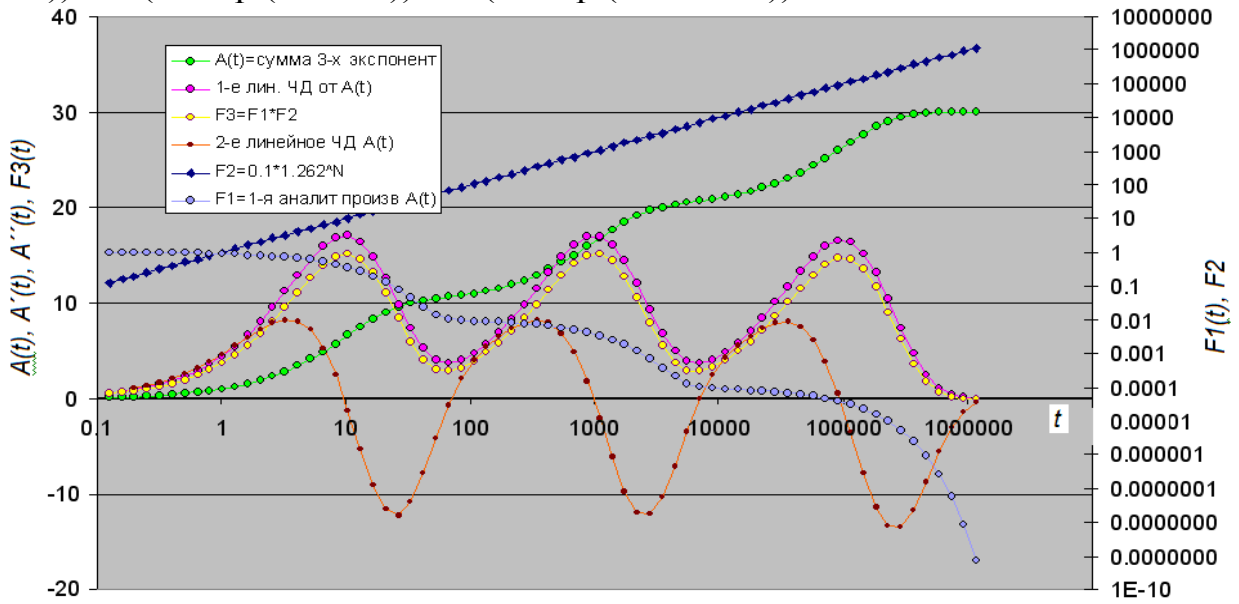


Рис.9. Иллюстрация алгоритма определения характерных точек ПТХ

При этом рассмотрены два варианта реализации алгоритма: прямым численным дифференцированием ПТХ и с использованием полиномиальной регрессии, описывающей экспериментальную ПТХ с минимальным СКО.

По корням второй производной ПТХ далее определяются параметры тепловой схемы ЦИС. В  $k$ -ой точке минимального роста ПТХ процессы накопления тепла в соответствующих  $k$  слоях конструкции завершены, текущее время существенно превышает тепловые постоянные времени этих слоев, но еще заметно меньше тепловых постоянных времени последующих слоев:  $\tau_{T1}, \tau_{T2}, \dots, \tau_{Tk} \ll t \ll \tau_{Tk+1} \dots \tau_{Tm}$ . При этом условии согласно (1) значение полного теплового сопротивления  $Z_T \{k\}$  в  $k$ -ой точке минимального роста ПТХ будет равно сумме тепловых сопротивлений  $k$  первых  $RC$ -звеньев тепловой цепи:

$$Z_T \{k\} = \sum_{i=1}^k R_{Ti} . \quad (13)$$

Поскольку  $Z_T \{1\} = R_{T1}$ , то для нахождения теплового сопротивления  $R_{T1}$  первого звена тепловой цепи надо определить первую точку минимальной крутизны ПТХ. Тепловое сопротивление  $R_{T2}$  второго звена находится по значению  $Z_T \{2\}$  ПТХ во второй точке минимальной крутизны:  $R_{T2} = Z_T \{2\} - R_{T1} = Z_T \{2\} - Z_T \{1\}$ , тепловое сопротивление  $R_{T3}$  третьего звена – по значению  $Z_T \{3\}$  в третьей точке минимальной крутизны ПТХ:  $R_{T3} = Z_T \{3\} - R_{T2} - R_{T1} = Z_T \{3\} - Z_T \{2\}$  и т. д. Таким образом, можно записать общую рекуррентную формулу для нахождения теплового сопротивления  $k$ -ого звена при произвольном числе звеньев:

$$R_{Tk} = Z_T \{k\} - Z_T \{k-1\}, \text{ при } Z_T \{0\} = 0. \quad (14)$$

Тепловая постоянная времени  $k$ -ого звена определяется в точках ПТХ, в которых выполняется условие  $t = \tau_{Tk}$ . Эти точки согласно (1) с учетом того, что накопление тепла во всех подлежащих слоях завершено и  $t \gg \tau_{T1}, \tau_{T2}, \dots, \tau_{Tk-1}$ , соот-

ветствуют моменту времени, при котором переходное тепловое сопротивление  $k$ -ого слоя равно  $(1 - e^{-1}) \approx 0,63$  от полного значения  $R_{Tk}$ , то есть

$$Z_T(t = \tau_{Tk}) = \sum_{i=1}^{k-1} R_{Ti} + 0,63R_{Tk} = Z_T\{k-1\} + 0,63R_{Tk}. \quad (15)$$

Анализ изменения вида второй производной ПТХ в зависимости от отношения  $(\tau_{Ti+1}/\tau_{Ti})$  тепловых постоянных времени соседних  $RC$ -звеньев тепловой цепи ЦИС показал, что уверенное определение значений параметров звеньев с погрешностью не более 3% возможно при отношении тепловых постоянных времени соседних  $RC$ -звеньев больше 8. При отношении тепловых постоянных времени соседних  $RC$ -звеньев меньше 5 погрешность превышает 20% и резко растет с уменьшением отношения.

**В четвертой главе** представлены результаты разработки и исследования метрологических характеристик аппаратно-программного комплекса (АПК) для измерения ПТХ и расчета ТП ЦИС, состоящего из измерителя и компьютера.

Структурная схема АПК представлена на рис. 10. Работой АПК управляет микроконтроллер ATmega-328P. При включении АПК производится инициализация периферийных устройств, после чего комплекс переходит в режим ожидания поступления информационного пакета данных от компьютера или команды оператора. Персональный компьютер позволяет создавать базы данных и проводить дополнительные виды математической обработки характеристик исследуемых ЦИС.

Обработка сигнала с датчика R1 потребляемого КГ тока с помощью амплитудного селектора 16 (А.С. СССР №125114), ФНЧ 8, сумматора 18 (А.С. СССР №1101842), ИОН 19 и ФНЧ 17 удалось в 4 раза уменьшить уровень импульсных помех и, тем самым, повысить точность измерения потребляемой КГ мощности.

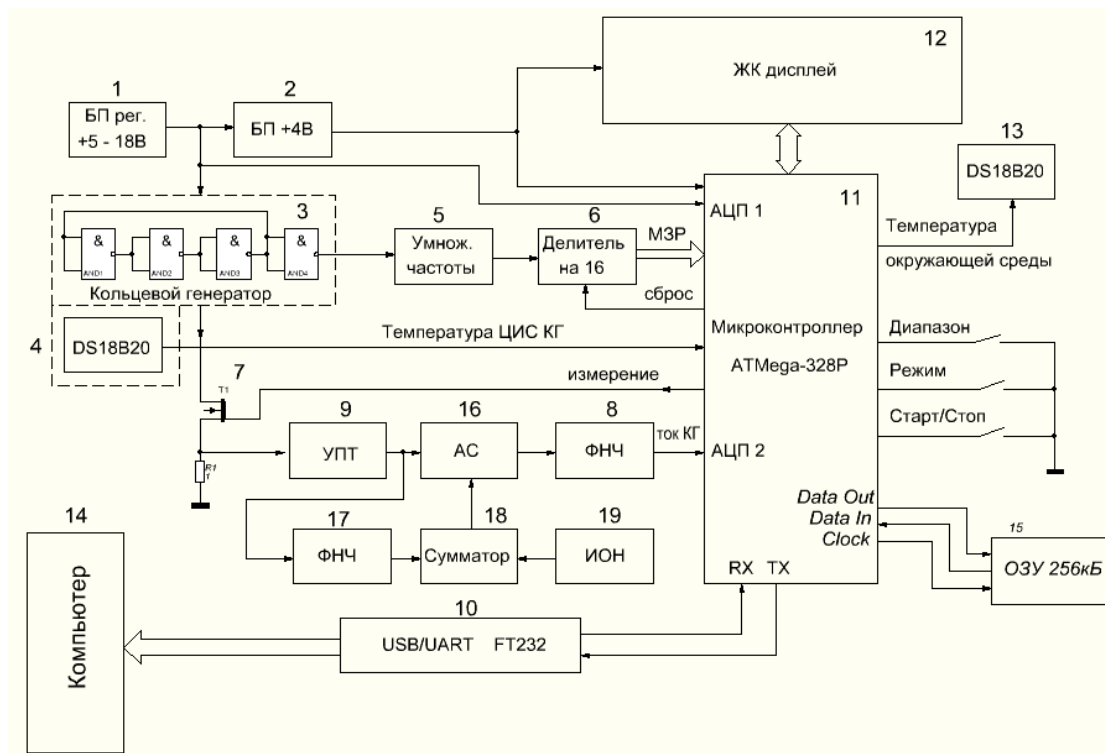


Рис. 10. Структурная схема измерительного комплекса



Функционально-технические характеристики АПК определяются управляющей программой микроконтроллера, которая обеспечивает:

- измерение напряжения питания тестируемого КГ;
- формирование вида зависимости времени дискретизации (линейная, логарифмическая, пользовательская);
- измерение частоты КГ с необходимой точностью;
- измерение потребляемого тока КГ;
- вычисление мощности потребления КГ;
- измерение температуры окружающей среды (в непосредственной близости от КГ) и измерение температуры корпуса ЦИС КГ;
- вычисление теплового сопротивления ЦИС для мгновенной и средней потребляемой мощности и формирование массива данных ПТХ исследуемой ЦИС;
- вычисление первой и второй производной ПТХ ЦИС путем численного дифференцирования ПТХ;
- вычисление аппроксимирующей ПТХ;
- расчет элементов тепловой модели исследуемой ЦИС;
- повышение точности аппроксимирующей ПТХ (модификация) методом последовательного приближения к значениям исходной ПТХ;
- расчет элементов тепловой модели для модифицированной ПТХ;
- отображение данных на многофункциональном ЖКИ во всех режимах;
- передачу результатов измерений в персональный компьютер для их последующей обработки, рис. 11.

Произведена оценка погрешности измерения с помощью АПК теплового сопротивления ЦИС, которая складывается из следующих основных составляющих:

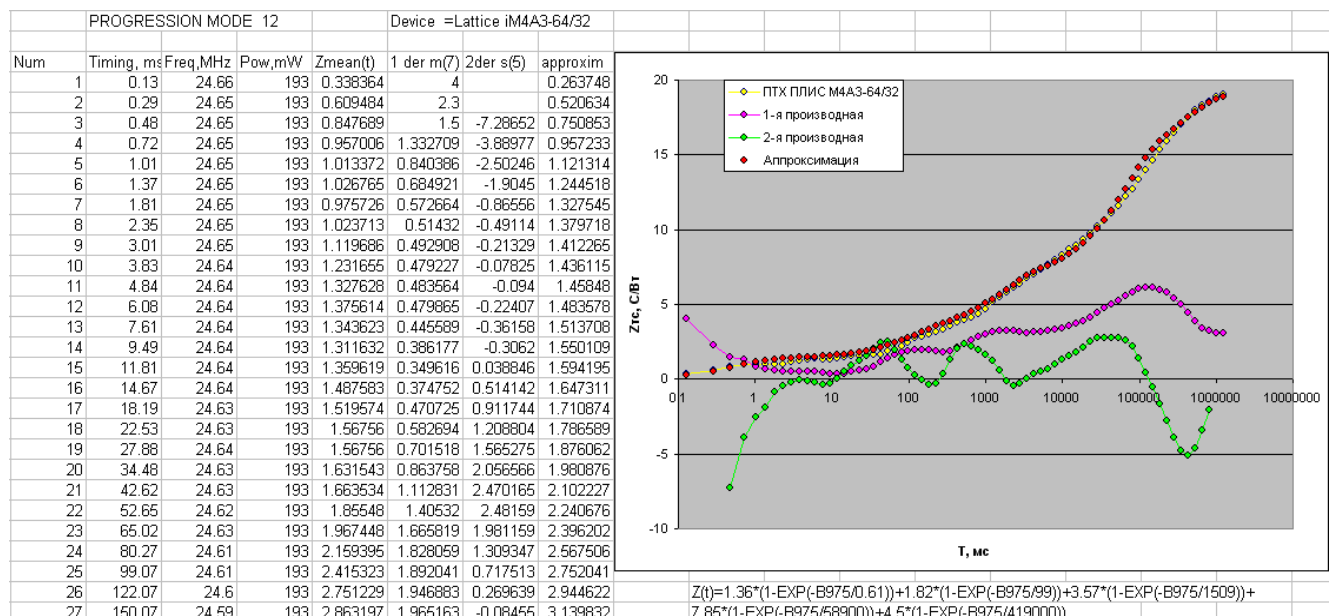


Рис. 11. Вид окна программы с результатами вычислений ТП ПЛИС Lattice iM4A3-64/32

- погрешности определения температурного коэффициента частоты (погрешности градуировки);

- погрешности измерения мощности потребления ЦИС, обусловленной нелинейностью АЦП;
- погрешности измерения частоты КГ;
- погрешности измерения температуры корпуса с использованием DS1820В.

Как показали расчеты, результирующая погрешность измерений теплового сопротивления ЦИС с помощью АПК не превышает 2 %.

На рис. 12 приведена фотография АПК для измерения ТП ЦИС в работе.

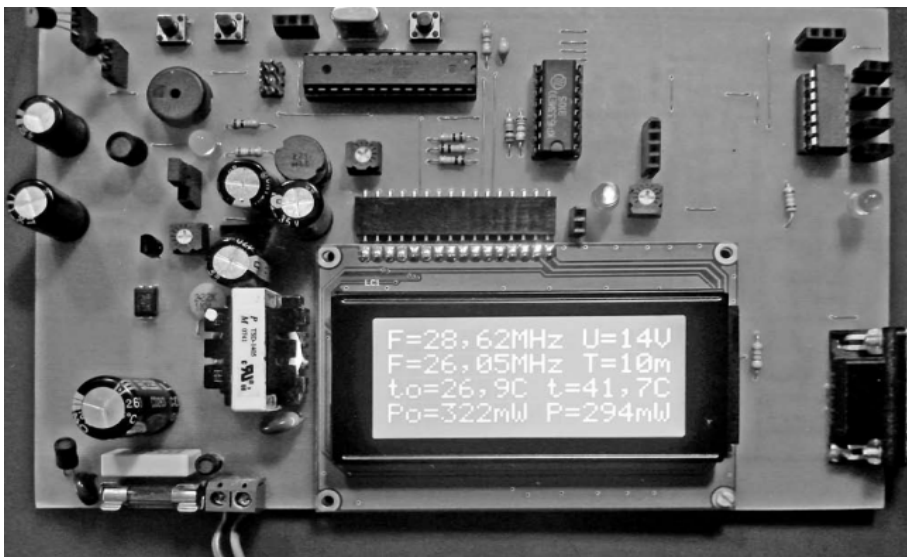


Рис. 12. Фотография измерительного модуля (без корпуса) аппаратно-программного комплекса для измерения ПТХ ЦИС в работе

**В пятой главе** приведены результаты измерений ТП нескольких выборок ЦИС как малой, так и высокой степени интеграции в различных условиях: естественной конвекции, принудительной конвекции (с использованием вентилятора) и при охлаждении корпуса ЦИС с помощью массивного радиатора. Особое внимание было уделено анализу повторяемости результатов испытаний ЦИС и точности аппроксимации ПТХ, которая определяет точность и достоверность построения тепловых схем ЦИС. На рис. 13 и 14 показаны результаты тестирования ЦИС малой и большой степени интеграции. На рис. 15 и 16 показаны соответствующие тепловые схемы этих ЦИС.

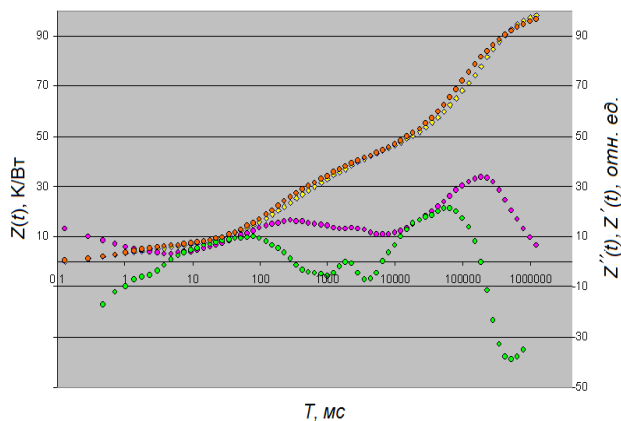


Рис. 13. Расчет ПТХ и ТП КМОП ЦИС типа CD4011 №1

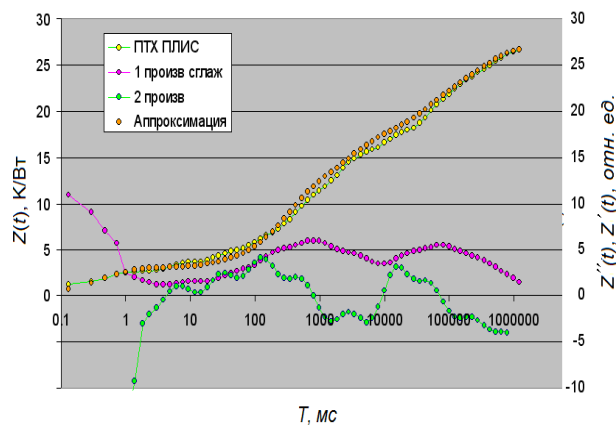


Рис.14. Расчет ПТХ и ТП ПЛИС типа EPM240T100C5 фирмы Altera

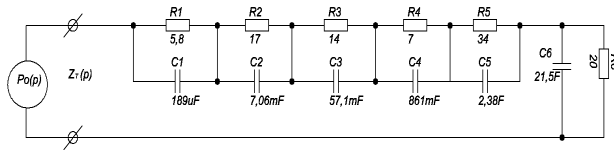


Рис. 15. Тепловая схема ЦИС типа CD4011

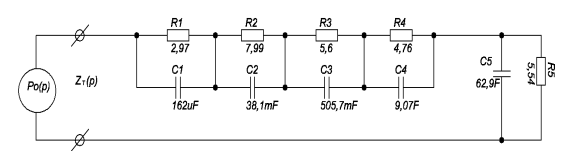


Рис.16. Тепловая схема ПЛИС EPM240T100C5

Выборочные измерения ПТХ ЦИС серии ТТЛ, подтвердили возможность применения разработанного способа и для ЦИС этой серии. Температурный коэффициент изменения частоты КГ для ЦИС с такой логикой составил  $0,1 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ .

Оценка выборочной дисперсии и СКО по результатам восьми измерений ПТХ ЦИС типа CD4011 в 70 точках (рис. 17) показала, что СКО не превысило  $0,01 \text{ К/Вт}$  за первые 100 с нагрева, что свидетельствует о высокой повторяемости и стабильности процесса измерения на участке ПТХ, определяемом тепловыми процессами внутри ЦИС. Увеличение СКО после 100 с нагрева до  $0,05 \text{ К/Вт}$  объясняется нестабильностью температуры окружающей среды и условий теплообмена.

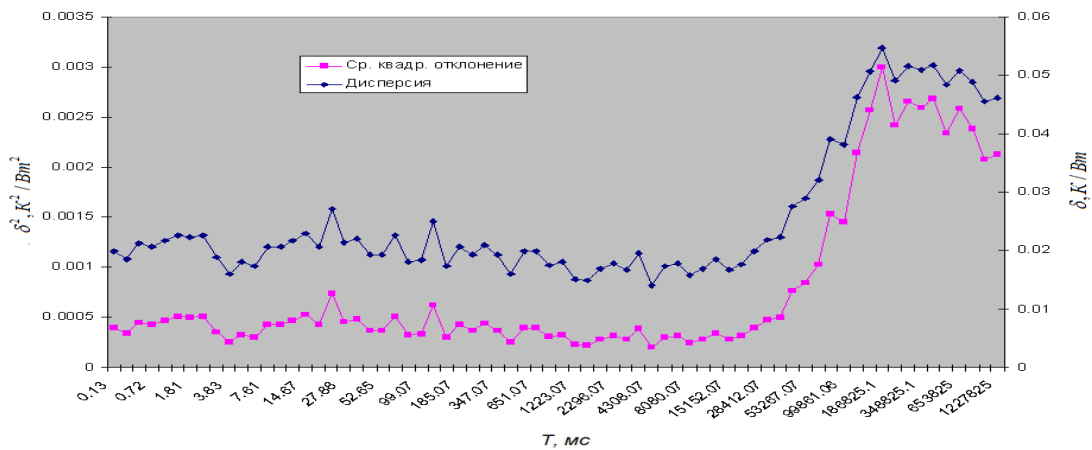


Рис. 17. Анализ повторяемости результатов измерений ПТХ ЦИС

Альтернативой разработанному способу измерения ТП ЦИС являются способ по стандарту JESD51-14 и спектральный способ измерения ТП ЦИС по частотной зависимости теплового импеданса с нагревом защитных диодов ЦИС гармонической ШИМ мощностью. На рис. 17 и рис. 18 приведены ПТХ ЦИС, полученные на разработанном АПК и по частотной зависимости теплового импеданса, измеренной в диапазоне  $0,001\text{--}700 \text{ Гц}$  с помощью Измерителя теплового импеданса полупроводниковых приборов Rth Meter, разработанного в УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, и пересчитанной в ПТХ.

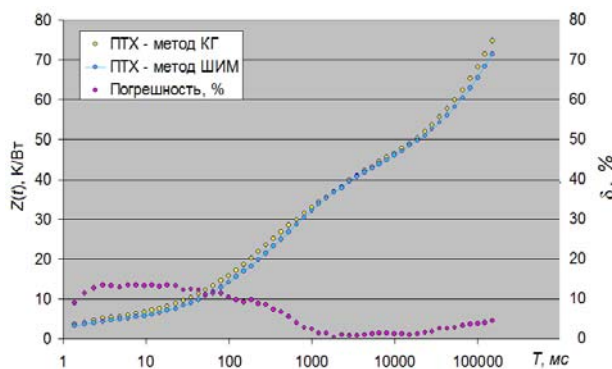


Рис. 18. Сравнение ПТХ ЦИС типа CD4011

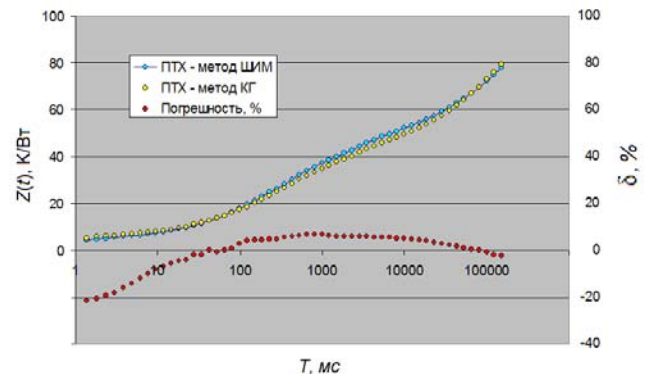


Рис. 19. Сравнение ПТХ ЦИС типа CD4093

Оба измерителя показали близкие результаты, что подтверждает адекватность предложенного способа измерения ТП ЦИС. При этом следует отметить, что время измерения и анализа ПТХ примерно в 5 раз меньше времени измерения частотной зависимости теплового импеданса.

**В заключении** представлены основные результаты работы.

1. Проведен анализ и экспериментальные исследования зависимостей ВЗРС ЦИС различных типов от температуры, напряжения питания, вида и величины нагрузки. Показано, что относительная температурная чувствительность ВЗРС ЦИС большинства типов лежит в пределах от  $-0,1$  до  $-0,3$  %/ К, не уступает температурной чувствительности напряжения на *p-n*- переходе, на порядок выше температурной чувствительности логического «0» и логической «1», обладает хорошей линейностью и практически не зависит от напряжения питания и уровня нагрузки ЦИС, что позволяет использовать ВЗРС в качестве ТЧП при измерении тепловых характеристик ЦИС взамен традиционных термоэлектрических параметров.

2. Показано, что использование температурных зависимостей ВЗРС для измерения тепловых характеристик КМОП ЦИС позволяет устранить некоторые погрешности, присущие известным способам измерения ПТХ с использованием в качестве ТЧП электрических параметров ЦИС:

- влияние паразитных переходных электрических процессов при переключении ЦИС из режима нагрева в режим измерения;
- влияние паразитных сопротивлений внутренних шин питания ЦИС;
- погрешность, обусловленную пространственным разделением источников тепла и элементов-датчиков температуры в структуре ЦИС.

3. Разработаны новые способы и устройства измерения ПТХ и теплового импеданса ЦИС с преобразованием ВЗРС в частоту КГ, построенного на ЛЭ ЦИС. Проведен анализ методических погрешностей разработанных способов, определена оптимальная длительность строб-импульса при измерении частоты КГ методом дискретного счета. Показано, что путем умножения частоты КГ, погрешность измерения приращения температуры активной области ЦИС в начале нагрева по изменению частоты КГ может быть снижена до  $0,2-0,3$  %, что повышает достоверность диагностики качества структуры и монтажа кристалла ЦИС.

4. Предложен способ измерения ПТХ дискретных полупроводниковых изделий и ЦИС с любым типом ЛЭ с преобразованием ВЗРС в последовательность высокочастотных импульсов длительностью пропорциональной ВЗРС с последующим преобразованием в напряжение.

5. Предложен новый легко автоматизируемый алгоритм анализа экспериментальных ПТХ полупроводниковых изделий и определения параметров тепловых схем ППИ с применением двойного дифференцирования ПТХ в полулогарифмическом масштабе по времени. Исследована разрешающая способность алгоритма в зависимости от соотношения параметров звеньев тепловой цепи. Показано, что погрешность определения параметров отдельных звеньев тепловой цепи ЦИС быстро растет с уменьшением отношения тепловых постоянных времени соседних RC-звеньев и при отношении меньше 5 превышает 20 %. В то же время при отношении постоянных времени 10 и выше погрешность не превышает 1–2%. Таким

образом, пороговое значение отношений постоянных времени для достоверной различимости соседних тепловых звеньев будет находиться около 7–8.

6. Разработан автоматизированный АПК для измерения и анализа ПТХ ЦИС, который может быть использован для целей диагностического контроля качества ЦИС в производственных условиях. С помощью АПК определены параметры тепловых цепей КМОП ЦИС нескольких типов. Выборочное значение СКО по результатам 8-и измерений ПТХ ЦИС в 60-и точках за первые 100 с нагрева не превысило 0,01 К/Вт, что свидетельствует о высокой повторяемости и стабильности процесса измерения на участке ПТХ, определяемом тепловыми процессами внутри ЦИС.

7. Сравнительные выборочные измерения ПТХ и расчета ТП ЦИС различных типов, включая ПЛИС типа EPM240T100C5 фирмы Altera и Lattice iM4A3-64/32, с помощью разработанного АПК и известного Измерителя теплового импеданса ППП показали хорошее соответствие, подтвердили возможности и метрологические способа.

### **Список основных работ по теме диссертации**

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК**

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 электроники – 2015. – №12. – С. 77-92.

#### **Патенты и авторские свидетельства**

4. Сергеев В.А. Способ определения теплового сопротивления переход-корпус цифровых интегральных микросхем / В.А. Сергеев, Я.Г. Тетенькин, В.В. Юдин // Патент на изобретение № 2569922, заявка № 2014134469, заявлено 22.08.2014, опубликовано 10.12.2015

5. Сергеев В.А. Патент РФ № 2545362 / Рециркуляционный способ измерения времени задержки распространения сигнала цифровых интегральных микросхем / В. А. Сергеев, Я. Г. Тетенькин, В.В. Юдин. – Опубл. 27.03.2015. – Бюл. № 9.

6. Юдин В.В. Способ измерения теплового сопротивления КМОП цифровых интегральных микросхем / В. В. Юдин, В.А. Сергеев, Я.Г. Тетенькин, А.М. Шорин, А.Н. Силин // Патент на изобретение № 2561337, опубликовано 27.08.2015.

7. Волгин Л.И. Амплитудный селектор / Л.И. Волгин, А.В. Ефимов, А.И. Зарукин, Р. П. Ребане, Я.Г. Тетенькин // А.С. СССР №125114. заявка №3834265, опубл. 15.08.86, Бюл. изобр., 1986, №30

8. Волгин Л. И. Неинвертирующий сумматор / Л.И. Волгин, А.И. Зарукин, Я.Г. Тетенькин Я.Г. // А,С. СССР №1101842. заявка №3582924, опубл. 07.07.84, Бюл. изобр., 1984, №30

9. Волгин Л. И. Устройство для измерения входного сопротивления четырех-полюсника / Л.И. Волгин, А.И. Зарукин, Я.Г. Тетенькин // А.С. СССР №1046705, опубл. 07.10.83, БИ, 1983, №37

10. Зарукин А.И. Способ измерения спада плоской части импульса / А.И. Зарукин, Я.Г. Тетенькин // А.С. СССР №1105831, опубл. 30.07.84, БИ, 1984, №28

### **Основные публикации в других изданиях**

11. Сергеев, В.А. Измерение теплового сопротивления цифровых интегральных схем с использованием температурной зависимости времени задержки сигнала / В.А. Сергеев, Я. Г. Тетенькин // Межвузовский сборник научных трудов «Радиоэлектронная техника». – Ульяновск: УлГТУ, 2015 – С. 86-93.

12. Сергеев, В.А. Измеритель тепловых параметров КМОП цифровых интегральных схем / В.А. Сергеев, Я. Г. Тетенькин // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : Сборник научных трудов девятой Всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ). г. Ульяновск, 1-2 октября 2015 г. - Ульяновск : УлГТУ, 2015. - 259 с.

13. Сергеев, В.А. Применение кольцевых генераторов в измерительных температурных преобразователях / В.А. Сергеев, Я. Г. Тетенькин // Межвузовский сборник научных трудов «Радиоэлектронная техника». – Ульяновск: УлГТУ, 2015, с. 62-68.

14. Сергеев, В.А. Измерение динамических параметров цифровых интегральных схем / В.А. Сергеев, Я. Г. Тетенькин // Межвузовский сборник научных трудов «Радиоэлектронная техника». – Ульяновск: УлГТУ, 2015, с. 97-107.

15. Сергеев, В.А. Контроль тепловых режимов работы цифровых интегральных схем по времени задержки сигнала / В.А. Сергеев, Я. Г. Тетенькин // Межвузовский сборник научных трудов «Радиоэлектронная техника». – Ульяновск: УлГТУ, 2013, с. 89-93

16. Тетенькин, Я. Г. Рециркуляционный измеритель малых временных интервалов / Я.Г. Тетенькин // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: сборник научных трудов восьмой Всероссийской научно-практической конференции, (г. Ульяновск, 1-2 июля 2013). – Ульяновск: УлГТУ, 2013, С. 234-235.

17. Тетенькин, Я. Г. Цифровая линия задержки импульсных сигналов / Я. Г. Тетенькин, В.В. Юдин // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : Сборник научных трудов девятой Всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ) г. Ульяновск, 1-2 октября 2015 г. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – 259 с.

18. Тетенькин, Я.Г. Повышение разрешающей способности преобразователей на основе кольцевых генераторов // «Радиоэлектронная техника»: межвузовский сборник научных трудов / под ред. В.А. Сергеева. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. с. 108-111.