

**А.В. Бугакова, Д.В. Кузнецов, В.Е. Чумаков, Д.В. Клейменкин,
М.А. Сергеевко**

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ НА ШИКОРОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ (ОБЗОР)*

Представлен аналитический обзор перспективных технологических процессов для высокотемпературных аналоговых микросхем, востребованных в космическом, авиационном и автомобильном приборостроении, нефтехимической промышленности, электроэнергетики, электроники военного назначения, медицине и др. Рассмотрены проблемы проектирования микросхем данного класса на широкозонных полупроводниках (карбид-кремний (SiC), нитрид-галлий (GaN), арсенид-галлий (GaAs)), обеспечивающих широкий диапазон рабочих температур (-200°C...+500°C). В настоящее время «слаботочная» схемотехника на SiC, GaN, GaAs широкозонных полупроводниках для работы при высоких температурах крайне не развита, что не позволяет проектировать аналоговые изделия нового поколения в интересах российских предприятий. Сегодня многие актуальные вопросы SiC, GaN, GaAs высокотемпературной схемотехники и динамики не решены. Необходимы исследования конструктивно-технологических решений, а также отвода тепла. В этой связи в статье проведен анализ проблем проектирования микросхем данных классов. При этом следует учитывать ограничения технологических процессов, которые, во многих случаях, позволяют создавать только однотипные активные элементы, что затрудняет построение микросхем. Актуальность вышеназванных исследований связана с проблемами импортозамещения в условиях санкций, когда закупка электронной компонентной базы ответственного применения у зарубежных фирм становится недоступной. Нужны российские рекомендации по разработке правил проектирования аналоговых интерфейсных микросхем (операционных и мультимножительных операционных усилителей, трансимпедансных и зарядочувствительных усилителей, компенсационных стабилизаторов напряжения и буферных усилителей, токовых конвейеров и т.п.) под задачи обработки сигналов датчиков физических величин в диапазоне высоких температур (+150°C ... +500°C).

Высокотемпературные аналоговые микросхемы; широкозонные полупроводники; арсенид-галлий (GaAs); нитрид-галлий (GaN); карбид-кремний (SiC).

**A.V. Bugakova, D.V. Kuznetsov, V.E. Chumakov, D.V. Kleimenkin,
M.A. Sergeenko**

FUNDAMENTALS OF DESIGNING HIGH-TEMPERATURE ANALOGIC MICROSCIRCUIT ON WIDE-GAP SEMICONDUCTORS (REVIEW)

An analytical review of promising technological processes for high-temperature analog microcircuits, which are in demand in space, aviation and automotive instrumentation, petrochemical industry, electric power industry, military electronics, medicine, etc., is presented. The problems of designing microcircuits of this class based on wide-gap semiconductors (silicon carbide (SiC), gallium nitride (GaN), gallium arsenide (GaAs)) that provide a wide range of operating temperatures (-200°C...+500°C). Currently, "low-current" circuitry based on SiC, GaN, GaAs wide-gap semiconductors for operation at high temperatures is extremely undeveloped, which does not allow designing new-generation analog products in the interests of Russian enterprises. Today, many topical issues of SiC, GaN, GaAs high-temperature circuitry and dynamics have not been resolved. Therefore, it is necessary to study structural and technological solutions, as well as heat removal. In this regard, the article analyzes the problems of designing microcircuits of these classes. At the same time, one should take into account the limitations of technological processes,

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-10069).

which, in many cases, allow creating only the same type of active elements, which makes it difficult to build microcircuits. The relevance of the above studies is related to the problems of import substitution under the conditions of sanctions, when the purchase of an electronic component base for responsible use from foreign firms becomes unavailable. Russian recommendations are needed on the development of rules for designing analog interface microcircuits (operational and differential difference amplifiers, transimpedance and charge-sensitive amplifiers, compensation voltage stabilizers and buffer amplifiers, current conveyors, etc.) for the tasks of processing signals from sensors of physical quantities in the high temperature range (+150 °C ... +500°C).

High-temperature analog microcircuits; wide-gap semiconductors; gallium arsenide (GaAs); gallium nitride (GaN); silicon carbide (SiC).

Введение. Под высокотемпературной электроникой понимается микроэлектроника, функционирующая при температуре свыше +150°C [1]. Высокотемпературные микросхемы являются предметом исследования многих профильных университетов и микроэлектронных фирм, что нашло отражение в значительном количестве статей и патентов по данному направлению [2–45]. Одним из векторов развития высокотемпературной микроэлектроники для приборостроения становится применение широкозонных полупроводниковых материалов [14], в том числе обеспечивающие широкий диапазон рабочих температур (-200°C ... +400°C) и высокую радиационную стойкость [14].

Основная цель настоящего исследования состоит в рассмотрении проблем проектирования высокотемпературных микромошных аналоговых микросхем на широкозонных полупроводниках (SiC, GaN и GaAs), которые сегодня наиболее часто применяются в силовых изделиях при больших уровнях токов.

Анализ направлений исследований мировой науки [2–45] по данной проблеме классифицирован в Таблице 1.

Таблица 1

Направления исследований в области высокотемпературной электроники

№	Направления исследований мировой науки	Ссылки на источники
1	Области применения высокотемпературных микросхем	[3–9]
2	Общие свойства SiC, GaN и GaAs. Особенность техпроцессов	[7, 10–12]
3	Высокотемпературные компьютерные модели транзисторов	[13]
4	Высокотемпературная электроника на GaN	[2, 3, 8, 11, 14, 15]
5	Высокотемпературная электроника на GaAs	[16]
6	Высокотемпературная электроника на SiC	[2, 11, 17–23]
7	Проблемы высокотемпературной аналоговой схемотехники на GaN, SiC, GaAs	[2, 4, 5, 6, 11, 19–21, 24–27]
8	Серийные высокотемпературные микросхемы	[2, 28, 29]
9	СВЧ изделия на GaN	[28, 30]
10	Силовая высокотемпературная электроника	[31, 32]
11	Проблемы конструктивно-технологических решений высокотемпературных микросхем и отвода тепла	[18, 33]

В настоящее время в различных областях науки и техники вырос спрос на приложения [1], требующих, чтобы электронные устройства, цифровые и аналоговые схемы работали при высоких температурах (табл. 2).

Крупнейшей сферой применения высокотемпературной электроники является бурение нефтегазовых скважин [1, 3, 5, 6, 35]. Например, в нефтехимической промышленности требуются датчики, осуществляющие мониторинг окружающей среды вокруг бурового оборудования, где температура отдельных блоков может быть свыше +300 °С. Применение качественной высокотемпературной электроники дает возможность повысить надежность скважинных устройств сбора данных и снизить риск аварийных ситуаций [1, 3, 5, 6, 35].

Таблице 2

Области применения высокотемпературных микросхем

№	Область применения	Предельный прогнозируемый диапазон температур	Ссылки на источники
1	Аэрокосмическое приборостроение	+120°С (температура атмосферы Луны)	[8]
		+400°С (температура атмосферы Венеры)	[2]
2	Авиационное приборостроение	+300 °С (например, мониторинг реактивных двигателей и аэродинамических поверхностей)	[4]
3	Нефтехимическая промышленность	+210°С ... +300 °С (например, при бурении глубоких скважин для осуществления внутрискважинной связи)	[1, 3, 5, 6, 35]
4	Автомобильное приборостроение	+150°С ... +300°С (например, температура электронных модулей в моторных отсеках и тормозных механизмах)	[1, 31, 35]
5	Электроэнергетика	+600°С (например, оборудование для атомных станций)	[1,22]

Развитие авиационного приборостроения в настоящее время направлено на повышение уровня электрификации самолетов [1, 36]. Среди прочего, вместо традиционных централизованных устройств управления двигателями разрабатываются распределенные системы управления. Распределенные схемы бортовой электроники, можно располагать ближе к двигателю, в сравнении с централизованными устройствами управления). Это на порядок уменьшает уровень сложности межсоединений, облегчает вес самолета (за счет замены обычных гидравлических систем электрическими приводами) на сотни килограммов и повышает надежность системы, рассчитываемой, в частности, как функция числа контактов соединителей (по стандарту MIL-HDBK-217F) [1]. Недостаток же состоит в том, что температура в непосредственной близости от двигателя самолета может варьироваться в диапазоне от –55 °С до +200 °С. Причем внешнее охлаждение нежелательно по двум причинам: во-первых, системы охлаждения увеличивают себестоимость и массу самолета, а во-вторых, отказ системы охлаждения может привести к отказу управляющей электроники, что может привести к аварийным ситуациям [1, 6].

Еще одно применение высокотемпературной электроники – автомобильное приборостроение. Переход от чисто механических и гидравлических систем к электромеханическим или механотронным системам требует переноса датчиков, схем нормирования сигналов и управляющей электроники ближе к источникам тепла [1, 3, 5, 6, 35, 36]. Более тесная интеграция электрических и механических систем (например, совмещение коробки передач с блоком ее управления) повышает производственную и эксплуатационную технологичность автомобильных под-

систем. Для функциональных узлов и компонентов систем управления (например, блоков управления двигателем, зарядных цепей и т.п.), связанных с высокими температурами, электромобилей и гибридных автомобилей нужна силовая электроника с высокой плотностью мощности [1].

Таким образом, разработка микроэлектронных устройств с надежными электрическими свойствами, например, на SiC, GaN и GaAs, предназначенных для высокотемпературных сред, представляет собой чрезвычайно важную задачу [7]. Это позволит избежать использования охлаждающих конструкций, недостатком которых является увеличение веса и себестоимости, а также снижение эффективности аппаратов [4], при одновременном повышении надежности всей управляющей электроники [9].

1. Высокотемпературная электроника на SiC, GaN и GaAs. Полупроводники с широкой запрещенной зоной (SiC, GaN, GaAs) являются основными кандидатами в обозримом будущем для преодоления фундаментальных ограничений традиционной электроники в высокотемпературных приложениях [11].

Сегодня, например, SiC, GaAs и GaN полевые транзисторы с управляющими рп-переходами (Junction Field Effect Transistor – JFET) исследуются ведущими университетами и научно-производственными фирмами на предмет применения для работы при высоких температурах (-200°C ... +400°C) [2, 4, 9, 12, 13, 16, 17, 18, 21, 23, 25–27, 32].

Компанией Texas Instruments представлен ряд высокотемпературных компонентов, ограниченных 220°C. Среди них операционные и инструментальные усилители OPA2333-HT, OPA211-HT, INA117-HT, INA129-HT, INA333-HT, INA271-HT, THS4521-HT, которые не поставляются в настоящее время в Россию.

Рядом зарубежных микроэлектронных фирм и исследовательских научных центров разработаны совмещенные GaAs технологии, в рамках которых реализуются GaAs JFET и GaAs n-p-n/p-n-p биполярные транзисторы [16].

Ведущими производителями на мировом рынке GaAs микросхем являются компании TriQuint Semiconductor (37% рынка) и WIN Semiconductor (36%) [28]. На долю Advanced Wireless Semiconductor (AWSC) приходится 12% рынка, Global Communication Semiconductor (CCS) - 6% [28]. Продукция этих компаний предназначена в основном для различных устройств и систем мобильной связи [28]. Наиболее крупные европейские компании United Monolithic Semiconductor (UMS) и OMMIC специализируются главным образом на мелкосерийном выпуске схем аэрокосмического и военного назначения, но вместе с тем стремятся расширить свое присутствие на глобальном рынке GaAs изделий [28].

Микроэлектронные изделия на основе GaAs отличаются, прежде всего, малым уровнем шума [2], а также превосходят традиционные кремниевые (Si) микросхемы по быстродействию примерно в 20 раз. Однако, слаботочная аналоговая GaAs электронная компонентная база (ЭКБ) для обработки сигналов датчиков в робототехнике и космическом приборостроении практически не исследована [2].

SiC и GaN имеют одинаковую ширину запрещенной зоны, поля пробоя и скорости дрейфа электронов. Это также означает, что они оба обладают более высокой плотностью мощности по сравнению с Si, что позволяет использовать устройства значительно меньшего размера.

Следует отметить, что: 1) приборы на основе SiC очень стабильны во времени и слабо зависят от температуры, что обеспечивает высокую надежность изделий; 2) SiC чрезвычайно устойчив к жесткой радиации, воздействие которой не приводит к деградации электронных свойств кристалла; 3) высокая предельная рабочая температура кристалла позволяет создавать высоконадежные приборы. Таким образом, высокая рабочая температура, а также радиационная стойкость

делают SiC и CJFET на его основе [2, 37] практически незаменимыми для разработки полупроводниковых приборов, работающих в жестких условиях эксплуатации, в том числе при высоких температурах.

GaN, по мнению ученых [2], является одним из самых востребованных и перспективных материалов современной микроэлектроники. Подвижность его электронов вдвое выше, чем у SiC, и на 25% выше, чем у Si [2, 10, 14]. Однако, теоретические вопросы построения GaN аналоговых микросхем, например операционных усилителей (ОУ) для обработки сигналов датчиков различных физических величин, находятся на начальном этапе развития [2, 11].

В [11] представлен обзор существующих схемотехнических решений в области проектирования изделий на SiC и GaN для высоких температур от (25°C до +300°C ... +1000 °C), включающий в себя различные логические элементы, операционные усилители [26], дифференциальные усилители [21] и т.п.

В работе [24] представлены варианты реализации полевых SiC ОУ для высокотемпературных применений от 25°C до 350°C [20], 400 °C. Причем, коэффициент усиления по напряжению данного ОУ [20] в диапазоне температур изменяется в пределах 49-54 дБ, что является достаточным для некоторых практических применений.

В статье [11] рассматривается прогресс, достигнутый Исследовательским центром Гленна НАСА и Университетом Кейс Вестерн Резерв (CWRU) в разработке технологии проектирования SiC JFET дифференциальных усилителей для экстремальных температур (до 500 °C). Интегральные схемы 4H-SiC JFET 10-го поколения Исследовательского центра НАСА имени Гленна однозначно продемонстрировали работу при температуре 500 °C. Эта экспериментальная работа также показала, что физическое растрескивание диэлектрических пассивирующих слоев в конечном итоге ограничивают срок службы микросхем в экстремальных условиях [18].

В [17, 19, 21, 25, 26] представлено семейство полностью интегрированных п-канальных JFET дифференциальных усилителей, реализованных по технологии 6H-SiC. Выходной однокаскадный ОУ [19, 21, 25, 26] имеет в дифференциальном режиме 69 дБ при 576°C с отклонением усиления всего на 3,6 дБ от 25-576°C. Данная схемотехника является перспективной, однако она не отличается разнообразием [19,21,25,26]. Нужны новые схемотехнические решения, позволяющие улучшить статические и динамические параметры ОУ.

Разработки устройств на основе GaN проводятся многими крупными зарубежными компаниями (более 30). Большинство из них (Nitronex, RFMD, TriQuint, Cree (США); NEC, Toshiba, Edyna (Япония) и др.) к настоящему времени уже приступили к промышленному выпуску GaAs элементной базы [15]. Однако разработке микроомощной аналоговой ЭКБ уделяется недостаточно внимания и для российских разработчиков она не доступна. Производство микросхем на основе GaN является «нишевым» бизнесом ряда других ведущих микроэлектронных фирм: NXP (Нидерланды), SkyWorks Solutions Inc и Qorvo Inc [2].

В [5,6] представлена конструкция GaN усилителя с регулируемым коэффициентом усиления с использованием технологии GaN 0,25 мкм на SiC, работающий при температуре окружающей среды до 230 °C. Результаты измерений [5,6] при 230 °C показывают, он пиковое усиление 27 дБ на центральной частоте 97,5 МГц и диапазон регулировки усиления 29,4 дБ. При максимальном усилении входной сигнал составляет -11,57 дБм при +230 °C (-3,63 дБм при +25 °C).

ЭКБ для задач аналоговой обработки сигналов насчитывает сегодня более 150 модификаций усилителей напряжения и тока, токовых конвейеров, нуллоров, мультидифференциальных усилителей напряжения и тока и т.д. [2]. Однако, их

схемотехника далека от совершенства и недопустимо медленно развивается [2] в область применения перспективных технологических процессов на основе широкозонных полупроводников (SiC, GaN, GaAs и др.).

В настоящее время Китай совместно со Швейцарией и Португалией проводят разработку полевых транзисторов со сверхширокой управляемой шириной запрещенной зоны [2], которые могут стать основой следующего поколения электроники. Однако, схемотехника аналоговых устройств для обработки сигналов датчиков в рамках данного технологического процесса сегодня отсутствует.

В России развитие GaN микроэлектроники началось со значительным опозданием [28]. В настоящее время этой проблемой занимаются несколько научно-производственных организаций: АО «Светлана-Рост», АО «Светлана-Электронприбор», АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, АО «Элма-Малахит», АО НПФ «Микран», АО «НПП «Пульсар», АО «ПКК Миландр», АО «ОКБ-Планета», АО «ЗНТЦ» и МИЭТ. Пока созданы только экспериментальные образцы усилителей 4 ГГц диапазона. По оценке специалистов ЗАО "Светлана-Рост", отставание от мирового уровня составляет три-четыре года [28].

2. Проблемы развития высокотемпературной схемотехники. С каждым годом увеличивается количество патентов и статей в классе так называемых «полных дифференциальных операционных усилителей», обеспечивающих ряд важных параметров аналоговых интерфейсов, недостижимых на другой аналоговой ЭКБ [38–44].

Разработка, например, SiC, GaN, GaAs JFET операционных усилителей с дифференциальным входом и выходом позволяет снизить влияние синфазных помех, уменьшить уровень второй гармоники в спектре выходного сигнала, в два раза увеличить максимальную амплитуду выходного напряжения, снизить эффект «пролезания» цифровых сигналов через подложку в аналого-цифровых микросхемах СВЧ-диапазона. Кроме этого, архитектуры микросхем с парафазным выходом обладают принципиально большей стойкостью к высоким температурам за счет наличия дифференциального выхода. Анализ публикаций по проблемам применения полностью дифференциальных ОУ показал, что во многих интерфейсах для задач АЦП преобразования сигналов, например входных ограничителей спектра на ОУ с парафазным входом и дифференциальным выходом, не учитывается влияние коэффициента подавления синфазного сигнала (CMRR) на частоту полюса, добротность полюса и коэффициент передачи. Однако, в [38–44] также не учтено влияние помех по шинам питания и частотной зависимости параметров фильтров от CMRR при исполнении ОУ по SiC, GaN, GaAs техпроцессам. Недостатком схемотехнического решения известного фильтра [45], является отсутствие оценки влияния на амплитудно-частотные характеристики параметров ОУ по подавлению синфазного сигнала при его исполнении по SiC, GaN, GaAs технологиям. Стоит отметить, что известные методы повышения CMRR [2] недостаточно эффективны для CJFet дифференциальных каскадов и SiC, GaN, GaAs CJFet операционных усилителей, разрабатываемых для высокотемпературных применений.

Важным вопросом при проектировании аналоговых интерфейсов является подавление импульсных помех по их шинам питания [15]. В ряде случаев данная проблема решается введением конденсатора большой емкости в цепи питания. Однако этот подход не эффективен при построении микросхем в виде «систем на кристалле» или «систем в корпусе». В этой связи крайне важна задача создания единой (интегральной) схемотехники SiC, GaN, GaAs ОУ и специальных SiC, GaN, GaAs подавителей помех [15]. Данные схемотехнические решения в настоя-

щее время мало изучены [15]. Актуальность их создания связана также с проблемами воздействия на аналоговые микросхемы короткого электромагнитного импульса [15].

Несмотря на сотни публикаций по проблемам проектирования IP-модулей интегральных стабилизаторов напряжения (СН) для прецизионных аналоговых интерфейсов [2], многие актуальные вопросы их SiC, GaN, GaAs высокотемпературной схемотехники и динамики на сегодняшний день не решены. Так, нуждается в развитии теория CJFET компенсационных СН для совместной работы с SiC, GaN, GaAs ОУ [2] рассматриваемого класса, обеспечивающих повышенное подавление всплесков и провалов выходного напряжения СН при импульсных токах нагрузки, не содержащих конденсаторов большой емкости на выходе. Кроме этого, в профильных журналах отсутствует качественный сравнительный анализ основных параметров регулирующих элементов (SiC, GaN, GaAs) для СН [2], ориентированных на перспективные архитектуры высокотемпературных вторичных источников электропитания.

Существуют также и другие проблемы разработки микросхем операционных усилителей и аналоговых IP-модулей на печатных платах для работы в экстремальных условиях (от +150°C до +500°C):

1. Собственное тепловыделение. Здесь многое зависит от выбранных схемотехнических и топологических решений. Популярны также теплоизоляция и создание специализированных корпусов, применение микроощных схемотехнических решений и пониженного напряжения питания ОУ, реализация микросхем на термоэлектрических модулях (Peltier). Однако, применение активного и пассивного охлаждения не является решением проблемы для микроэлектронных устройств, рассчитанных на малые габариты.

2. Обеспечение стабильности параметров во времени. Как известно, высокие температуры влияют на параметры полупроводников, такие как подвижность носителей заряда, исходные токи утечки и другие характеристики. Обеспечение стабильности работы усилителей на протяжении длительного времени становится сложной задачей, требующей специальных исследований.

3. Выбор подходящих полупроводниковых материалов, которые могли бы работать при высоких температурах (до +500°C). Некоторые транзисторы, такие как SiC и GaN, имеют высокую термическую стабильность [12, 15, 23], но требуют специальных схем включения в аналоговых устройствах.

4. Пассивные компоненты. На высоких температурах могут возникнуть проблемы с надежностью соединений и интерфейсов между компонентами, а также с пассивными элементами (конденсаторы, резисторы). Для работы при высоких температурах (до +125°C ... +220°C) [46] часто используются специальные конденсаторы, такие как танталовые или керамические (класс I, например, например, COG/NP0). Однако высокое качество конденсаторов сложно реализовать для широкого диапазона температур (до +500°C) в виду их параметрических ограничений (утечка, срок службы под влиянием высоких температур и т.п.). Необходима схемотехника ОУ, исключающая применение корректирующих конденсаторов, обеспечивающих устойчивость петли отрицательной обратной связи (ООС). Перспективно использование для этих целей эффекта умножения паразитных емкостей высокотемпературных транзисторов. Кроме этого, не следует рекомендовать включение таких ОУ со 100% ООС.

Параметры и характеристики высокотемпературного резистора в первую очередь зависят от материала, из которого он изготовлен. Это могут быть различные металлы с большим удельным сопротивлением, их производные в виде оксидов, а также керамические композиты (в том числе с примесями солей металлов).

Высокотемпературные резисторы из таких материалов используются для навесного и поверхностного монтажа на высокотемпературных подложках. Некоторые примеры коммерческих технологий изготовления высокотемпературных резисторов представлены в [47], но они ограничены температурным диапазоном до +220°C. Необходима схемотехника ОУ на широкозонных полупроводниках, включающая применение интегральных резисторов.

Заключение. Авторами выполнен обзор мирового уровня востребованности высокотемпературных микросхем (+150°C ... +500°C) в аэрокосмическом, атомном приборостроении, автомобильной промышленности и бурении глубоких скважин (добыча некоторых сортов нефти), где экстремально-высокие температуры являются основной проблемой для использования традиционных микроэлектронных устройств, обрабатывающих сигналы датчиков. Анализ многочисленных публикаций, связанных с высокотемпературной электроникой [1–47], показывает, что схемотехника микросхем данного класса находится на начальном этапе развития. Накопленные сегодня в мировой науке знания в области основ схемотехники и конструирования высокотемпературных слаботочных аналоговых микросхем для обработки сигналов датчиков имеют разрозненный характер, частично устарели, не систематизированы с точки зрения целесообразности их применения в разных температурных диапазонах с использованием разных технологических процессов, в том числе на широкозонных полупроводниках (SiC, GaN, GaAs). Недостаточно исследована тема собственной компенсации систематической составляющей напряжения смещения нуля ($U_{см.}$) и других параметров операционных усилителей, реализованных на широкозонных полупроводниках (SiC, GaN, GaAs) при их работе в экстремальных условиях. Здесь эффекты компенсации $U_{см.}$ могут осуществляться за счет схемотехники, что повышает её роль в задачах создания качественных высокотемпературных микросхем.

Таким образом, решение задачи импортозамещения высокотемпературных микросхем в условиях санкций, когда закупка ЭКБ зарубежных фирм становится недоступной, состоит в разработке собственных правил проектирования аналоговых интерфейсных микросхем на существующих сегодня классах активных элементов и освоенных в России технологических процессов. Фактически данная научная проблема носит междисциплинарный характер, так как оптимальная высокотемпературная схемотехника, позволяющая существенно улучшить основные параметры микросхем при повышенных температурах (по сравнению с обычными решениями), относится к интегральной науке, объединяющей лучшие достижения физики полупроводников, теории усиления и обработки сигналов датчиков, микроэлектроники, электродинамики, теории электрических цепей и САПР, теории тепловых процессов, конструктивно-технологических решений микросхем и т.д. Причем, стоит учитывать ограничения технологических процессов, которые во многих случаях могут обеспечивать только однотипные активные элементы. Перспективным направлением является адаптация SiC, GaN, GaAs технологий и «слаботочной» аналоговой ЭКБ (операционных и мультидифференциальных операционных усилителей, трансимпедансных и зарядочувствительных усилителей, компенсационных стабилизаторов напряжения и буферных усилителей, токовых конвейеров и т.п.) под задачи обработки сигналов датчиков физических величин в диапазоне высоких температур (+150°C ... +500°C). Актуальна тема создания высокотемпературных аналоговых схем, не содержащих резисторов и конденсаторов.

Решение поставленных научных проблем позволит создать профильную базу знаний, систематизирующую основные этапы проектирования высокотемпературной аналоговой ЭКБ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобков С. Г. Проблемы создания высокотемпературных вычислительных систем // Программные продукты и системы. – 2015. – № 4 (112). – С. 62-69.
2. Прокопенко Н.Н., Бугакова А.В., Чумаков В.Е. Основные направления развития схемотехники трансимпедансных и операционных усилителей с учетом новых и перспективных технологических процессов // Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов / под ред. В.А. Сергеева. – Ульяновск: УлГТУ, 2022. – С. 4-16.
3. Salem J.M., Pour F.L., Sam Ha D. A High-Temperature Model for GaN-HEMT Transistors and its Application to Resistive Mixer Design // Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – IEEE, 2021. – Vol. 68, No. 2. – P. 581-591.
4. Neudeck P.G., Garverick S.L., Spry D.J., Chen L.Y., Beheim G.M., Krasowski M.J., Mehregany M. Extreme temperature 6H-SiC JFET integrated circuit technology // Physica Status Solidi (a). – 2009. – Vol. 206, No. 10. – P. 2329-2345.
5. Ehteshamuddin M. Design of a High Temperature GaN-Based Variable Gain Amplifier for Downhole Communications. – URL: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/74958/Ehteshamuddin_M_T_2017.pdf?isAllowed=y&sequence=1 (дата обращения: 01.08.2023).
6. Ehteshamuddin M., Salem J.M., Ha D.S. A high temperature variable gain amplifier based on GaN HEMT devices for downhole communications // International Symposium on Circuits and Systems. – IEEE, 2017. – P. 1-4.
7. Алексеев А., Петров С. Создание мощных СВЧ-транзисторов и микросхем на основе GaN-отечественный комплекс технологического оборудования // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2016. – № 5. – С. 48-53.
8. Kargarrazi S., Yalamarthy A.S., Satterthwaite P.F., Blankenberg S.W., Chapin C., Senesky D.G. Stable Operation of AlGaIn/GaN HEMTs for 25 h at 400°C in air // Journal of the Electron Devices Society. – IEEE, 2019. – Vol. 7. – P. 931-935.
9. Публикации в области применения высокотемпературных микросхем. – URL: https://disk.yandex.ru/i/2OztJ_c6Fq1UHg (дата обращения: 21.08.2023).
10. Bahl I.J. Control Components Using Si, GaAs, and GaN Technologies. – Artech House, 2014. – 325 p.
11. Hassan A., Ali M., Trigui A., Savaria Y., Sawan M. A GaN-based wireless monitoring system for high-temperature applications // Sensors. – 2019. – Vol. 19, No. 8. – P. 1785.
12. Публикации, отражающие общие свойства GaAs, GaN, SiC и особенности техпроцессов. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/2mNo3yo9eqiWhQ> (дата обращения: 21.08.2023).
13. Публикации по высокотемпературным компьютерным моделям транзисторов. – URL: https://disk.yandex.ru/i/x50jo_RvnMtHHQ (дата обращения: 21.08.2023).
14. Vitinov S., Palankovski V., Maroldt S., Quay R. High-temperature modeling of AlGaIn/GaN HEMTs // Solid-State Electronics. – 2010. – Vol. 54, No. 10. – P. 1105-1112.
15. Публикации по высокотемпературной электронике на GaN. – URL: <https://disk.yandex.ru/d/YTYuxjPoFFImKw> (дата обращения: 21.08.2023).
16. Публикации по высокотемпературной электронике на GaAs. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/OM5WL1jNfIGFcg> (дата обращения: 21.08.2023).
17. Soong C.-W., Patil A.C., Garverick S.L., Fu X., Mehregany M. 550°C Integrated Logic Circuits using 6H-SiC JFETs // Electron Device Letters. – IEEE, 2012. – Vol. 33, No. 10. – P. 1369-1371.
18. Spry D.J., Neudeck P.G., Chang C. Experimental study on mitigation of lifetime-limiting dielectric cracking in extreme temperature 4H-SiC JFET Integrated Circuits // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2020. – Vol. 1004. – P. 1148-1155.
19. Stum Z., Tilak V., Losee P.A., Andarawis E.A., Chen C.P. 300° C Silicon Carbide Integrated Circuits // Materials Science Forum. – 2011. – Vol. 679-680. – P. 730-733.
20. Brown D.M. Silicon Carbide MOSFET Integrated Circuit Technology // Physica Status Solidi (A). – 1997. – Vol. 162. – P. 459-479.
21. Patil A.C., Fu X.A., Anupongongarch C., Mehregany M., Garverick S.L. 6H-SiC JFETs for 450 °C Differential Sensing Applications // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2009. – Vol. 18, No. 4. – P. 950-961.
22. Khanna V.K. Extreme-temperature and harsh-environment electronics: physics, technology and applications // IOP Publishing. – 2023. – DOI: 10.1088/978-0-7503-5072-3.

23. Публикации по высокотемпературной электронике на SiC. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/zW4DgGBx9B9aQA> (дата обращения: 21.08.2023).
24. *Rahman A., Roy S., Murphree R., Kotecha R., Addington K., Abbasi A., Mantooth H.A., Francis A.M., Holmes J., Di J.* High-temperature SiC CMOS comparator and op-amp for protection circuits in voltage regulators and switch-mode converters // *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.* – IEEE, 2016. – Vol. 4, No. 3. – P. 935-945.
25. *Patil A.C., Fu X.A., Mehregany M., Garverick S.L.* Fully-monolithic, 600°C differential amplifiers in 6H-SiC JFET IC technology // *Proceedings of the CICC.* – IEEE, 2009. – P. 73-76.
26. *Neudeck P.G., Garverick S.L., Spry D.J., Chen L.Y., Beheim G.M., Krasowski M.J., Mehregany M.* Extreme temperature 6H-SiC JFET integrated circuit technology // *Physica Status Solidi (A).* – 2009. – Vol. 206, No. 10. – P. 2329-2345.
27. Публикации по проблемам высокотемпературной аналоговой схемотехники на GaN, SiC, GaAs. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/R0kIX06Fmpw6Ig> (дата обращения: 21.08.2023).
28. *Вукулов И.* Монолитные интегральные схемы СВЧ технологическая основа АФАР // *Электроника: наука, технология, бизнес.* – 2012. – №. 7. – С. 060-073.
29. Публикации по серийным высокотемпературным микросхемам. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/eacY7GF4CDRtgg> (дата обращения: 21.08.2023).
30. Публикации в области СВЧ изделий на GaN. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/inwYk5hcV1jjpg> (дата обращения 21.08.2023).
31. *Liao C.-H., Yang S.-H., Liao M.-Y., Chung K.-C., Kumari N., Chen K.-H., Lin Y.-H., Lin S.-R., Tsai T.-Y., Juang Y.-Z.* 3.8 A 23.6 ppm/°C Monolithically Integrated GaN Reference Voltage Design with Temperature Range from –50°C to 200°C and Supply Voltage Range from 3.9 to 24V // *Proceedings of the International Solid-State Circuits Conference.* – IEEE, 2020. – P. 72-74.
32. Публикации в области силовой высокотемпературной электроники. – URL: https://disk.yandex.ru/d/SB1_FPzrpFJP9A (дата обращения: 21.08.2023).
33. Публикации по проблемам конструктивно-технологических решений высокотемпературных микросхем и отвода тепла. – URL: <https://disk.yandex.ru/i/9w7ZTgNQj13jzQ> (дата обращения: 21.08.2023).
34. *Lee H., Smet V., Tummala R.* A review of SiC power module packaging technologies: Challenges, advances, and emerging issues // *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.* – IEEE, 2019. – Vol. 8, No. 1. – P. 239-255.
35. Высокотемпературная и алмазная электроника, применение, особенности и конструкции. – URL: <https://intellect.icu/vysokotemperaturnaya-i-almaznaya-elektronika-primenenie-osobennosti-i-konstruktsii-8496> (дата обращения: 01.08.2023).
36. *Watson J., Castro G.* A review of high-temperature electronics technology and applications // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics.* – 2015. – Vol. 26. – P. 9226-9235.
37. Свойства и характеристики SiC. – URL: <https://www.prosofLru/products/types/poluprovodnikovye-materialy/362515/362988/> (дата обращения: 01.08.2023).
38. *Wang J., Zhu Z., Liu S., Ding R.* A low-noise programmable gain amplifier with fully balanced differential difference amplifier and class-AB output stage // *Microelectronics Journal.* – 2017. – Vol. 64. – P. 86-91.
39. *Royo G., Sanchez-Azqueta C., Martinez-Perez A.D., Aldea C., Celma S.* Fully-differential transimpedance amplifier for reliable wireless communications // *Microelectronics Reliability.* – 2018. – Vol. 83. – P. 25-28.
40. *Ku Y.-T., Hwang Y.-S., Chen J.-J., Shih C.-C., Cheng D.* A new current-mode Wheatstone bridge based on a new fully differential operational transresistance amplifier // *AEU - International Journal of Electronics and Communications.* – 2019. – Vol. 101. – P. 85-92.
41. *Sabry M.N., Nashaat I., Omran H.* Automated design and optimization flow for fully-differential switched capacitor amplifiers using recycling folded cascode OTA // *Microelectronics Journal.* – 2020. – Vol. 101. – P. 104814. – DOI: 10.1016/j.mejo.2020.104814.
42. *Beev N., Kiviranta M.* Fully differential cryogenic transistor amplifier // *Cryogenics.* – 2013. – Vol. 57. – P. 129-133. – DOI: 10.1016/j.cryogenics.2013.06.004.
43. *Kim K., Yoo C.* Time-Domain Operational Amplifier with Voltage-Controlled Oscillator and Its Application to Active-RC Analog Filter // *Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs.* – IEEE, 2020. – Vol. 67, No. 3. – P. 415-419.

44. Gebreyohannes F. T., Loueratand M., Aboushady H. Design of a 4th-Order Feed-Forward-Compensated Operational Amplifier for Multi-GHz Sampling Frequency Continuous-Time Bandpass Sigma-Delta Modulators // International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – IEEE, 2019. – P. 1-5.
45. Flenrion W.S., Kruczkowski P.J., Sen S. Trans-impedance amplifier // US Patent 6.323.734, Feb. 29, 2001.
46. Ma D., Geng X., Dai F.F., Cressler J.D. A 6th order butterworth SC low pass filter for cryogenic applications from $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ // Proceedings of the AEROS Conference. – 2009. – P. 1-8.
47. Watson J., Castro G. High-temperature electronics pose design and reliability challenges // Analog Dialogue. – 2012. – Vol. 46, No. 2. – P. 3-9.

REFERENCES

1. Bobkov S.G. Problemy sozdaniya vysokotemperaturnykh vychislitel'nykh sistem [Problems of creating high-temperature computing systems], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2015, No. 4 (112), pp. 62-69.
2. Prokopenko N.N., Bugakova A.V., Chumakov V.E. Osnovnye napravleniya razvitiya skhemotekhniki transimpedansnykh i operatsionnykh usiliteley s uchetom novykh i perspektivnykh tekhnologicheskikh protsessov [The main directions of development of circuitry for transimpedance and operational amplifiers, taking into account new and promising technological processes], *Radioelektronnaya tekhnika: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Radioelectronic engineering: interuniversity collection of scientific papers], ed. by V.A. Sergeeva. Ul'yanovsk: UIGTU, 2022, pp. 4-16.
3. Salem J.M., Pour F.L., Sam Ha D. A High-Temperature Model for GaN-HEMT Transistors and its Application to Resistive Mixer Design, *Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. IEEE, 2021, Vol. 68, No. 2, pp. 581-591.
4. Neudeck P.G., Garverick S.L., Spry D.J., Chen L.Y., Beheim G.M., Krasowski M.J., Mehregany M. Extreme temperature 6H-SiC JFET integrated circuit technology, *Physica Status Solidi (a)*, 2009, Vol. 206, No. 10, pp. 2329-2345.
5. Ehteshamuddin M. Design of a High Temperature GaN-Based Variable Gain Amplifier for Downhole Communications. Available at: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/749_58/Ehteshamuddin_M_T_2017.pdf?isAllowed=y&sequence=1 (accessed 01 August 2023).
6. Ehteshamuddin M., Salem J.M., Ha D.S. A high temperature variable gain amplifier based on GaN HEMT devices for downhole communications, *International Symposium on Circuits and Systems*. IEEE, 2017, pp. 1-4.
7. Alekseev A., Petrov S. Sozdanie moshchnykh SVCH-tranzistorov i mikroskhem na osnove GaN-otechestvennyy kompleks tekhnologicheskogo oborudovaniya [Creation of high-power microwave transistors and microcircuits based on GaN-domestic complex of technological equipment], *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, technology, business], 2016, No. 5, pp. 48-53.
8. Kargarrazi S., Yalamarthy A.S., Satterthwaite P.F., Blankenberg S.W., Chapin C., Senesky D.G. Stable Operation of AlGaIn/GaN HEMTs for 25 h at $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ in air, *Journal of the Electron Devices Society*. IEEE, 2019, Vol. 7, pp. 931-935.
9. Publikatsii v oblasti primeneniya vysokotemperaturnykh mikroskhem [Publications in the field of application of high-temperature microcircuits]. Available at: https://disk.yandex.ru/i/2OztJ_c6Fq1UHG (accessed 21 August 2023).
10. Bahl I.J. Control Components Using Si, GaAs, and GaN Technologies. Artech House, 2014, 325 p.
11. Hassan A., Ali M., Trigui A., Savaria Y., Sawan M. A GaN-based wireless monitoring system for high-temperature applications, *Sensors*, 2019, Vol. 19, No. 8, pp. 1785.
12. Publikatsii, otrazhayushchie obshchie svoystva GaAs, GaN, SiC i osobennosti tekhnologicheskikh protsessov [Publications reflecting the general properties of GaAs, GaN, SiC and features of technical processes]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/2mNo3yo9eqiWhQ> (accessed 21 August 2023).
13. Publikatsii po vysokotemperaturnym komp'yuternym modelyam tranzistorov [Publications on high-temperature computer models of transistors]. Available at: https://disk.yandex.ru/i/x50jo_RvnMtHHQ (accessed 21 August 2023).

14. Vitanov S., Palankovski V., Maroldt S., Quay R. High-temperature modeling of AlGaIn/GaN HEMTs, *Solid-State Electronics*, 2010, Vol. 54, No. 10, pp. 1105-1112.
15. Publikatsii po vysokotemperaturnoy elektronike na GaN [Publications on high-temperature electronics on GaN]. Available at: <https://disk.yandex.ru/d/YTYyxjPoFFImKw> (accessed 21 August 2023).
16. Publikatsii po vysokotemperaturnoy elektronike na GaAs [Publications on high-temperature electronics based on GaAs]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/OM5WL1jNfIGFcg> (accessed 21 August 2023).
17. Soong C.-W., Patil A.C., Garverick S.L., Fu X., Mehregany M. 550°C Integrated Logic Circuits using 6H-SiC JFETs, *Electron Device Letters*. IEEE, 2012, Vol. 33, No. 10, pp. 1369-1371.
18. Spry D.J., Neudeck P.G., Chang C. Experimental study on mitigation of lifetime-limiting dielectric cracking in extreme temperature 4H-SiC JFET Integrated Circuits, *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2020, Vol. 1004, pp. 1148-1155.
19. Stum Z., Tilak V., Losee P.A., Andarawis E.A., Chen C.P. 300° C Silicon Carbide Integrated Circuits, *Materials Science Forum*, 2011, Vol. 679-680, pp. 730-733.
20. Brown D.M. Silicon Carbide MOSFET Integrated Circuit Technology, *Physica Status Solidi (A)*, 1997, Vol. 162, pp. 459-479.
21. Patil A.C., Fu X.A., Anupongongarch C., Mehregany M., Garverick S.L. 6H-SiC JFETs for 450 °C Differential Sensing Applications, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2009, Vol. 18, No. 4, pp. 950-961.
22. Khanna V.K. Extreme-temperature and harsh-environment electronics: physics, technology and applications, *IOP Publishing*, 2023. DOI: 10.1088/978-0-7503-5072-3.
23. Publikatsii po vysokotemperaturnoy elektronike na SiC [Publications on High Temperature Electronics on SiC]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/zW4DgGBx9B9aQA> (accessed 21 August 2023).
24. Rahman A., Roy S., Murphree R., Kotecha R., Addington K., Abbasi A., Mantooth H.A., Francis A.M., Holmes J., Di J. High-temperature SiC CMOS comparator and op-amp for protection circuits in voltage regulators and switch-mode converters, *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. IEEE. 2016, Vol. 4, No. 3, pp. 935-945.
25. Patil A.C., Fu X.A., Mehregany M., Garverick S.L. Fully-monolithic, 600°C differential amplifiers in 6H-SiC JFET IC technology, *Proceedings of the CICC*. IEEE, 2009, pp. 73-76.
26. Neudeck P.G., Garverick S.L., Spry D.J., Chen L.Y., Beheim G.M., Krasowski M.J., Mehregany M. Extreme temperature 6H-SiC JFET integrated circuit technology, *Physica Status Solidi (A)*, 2009, Vol. 206, No. 10, pp. 2329-2345.
27. Publikatsii po problemam vysokotemperaturnoy analogovoy skhemotekhniki na GaN, SiC, GaAs [Publications on the problems of high-temperature analog circuitry based on GaN, SiC, GaAs]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/R0kIX06Fmpw6Ig> (accessed 21 August 2023).
28. Vikulov I. Monolitnye integral'nye skhemy SVCh tekhnologicheskaya osnova AFAR [Microwave monolithic integrated circuits are the technological basis of AFAR], *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business], 2012, No. 7, pp. 060-073.
29. Publikatsii po seriyam vysokotemperaturnym mikroskhemam [Publications on serial high-temperature microcircuits]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/eacY7GF4CDRtg> (accessed 21 August 2023).
30. Publikatsii v oblasti SVCh izdeliy na GaN [Publications in the field of microwave products based on GaN]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/inwYk5hcV1jjpg> (accessed 21 August 2023).
31. Lee H., Smet V., Tummala R. A review of SiC power module packaging technologies: Challenges, advances, and emerging issues, *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. IEEE, 2019, Vol. 8, No. 1, pp. 239-255.
32. Publikatsii v oblasti silovoy vysokotemperaturnoy elektroniki [Publications in the field of power high temperature electronics]. Available at: https://disk.yandex.ru/d/SB1_FPzrpFJP9A (accessed 21 August 2023).
33. Publikatsii po problemam konstruktivno-tekhnologicheskikh resheniy vysokotemperaturnykh mikroskhem i otvoda tepla [Publications on the problems of constructive and technological solutions for high-temperature microcircuits and heat removal]. Available at: <https://disk.yandex.ru/i/9w7ZTgNQj13jZQ> (accessed 21 August 2023).

34. Lee H., Smet V., Tummala R. A review of SiC power module packaging technologies: Challenges, advances, and emerging issues, *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. IEEE, 2019, Vol. 8, No. 1, pp. 239-255.
35. Vysokotemperaturnaya i almaznaya elektronika, primenenie, osobennosti i konstruksii [High temperature and diamond electronics, application, features and designs]. Available at: <https://intellect.icu/vysokotemperaturnaya-i-almaznaya-elektronika-primenenie-osobennosti-i-konstruksii-8496> (accessed 01 August 2023).
36. Watson J., Castro G. A review of high-temperature electronics technology and applications, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, Vol. 26, pp. 9226-9235.
37. Svoystva i kharakteristiki SiC [Properties and characteristics of SiC]. Available at: <https://www.prosofLru/products/types/poluprovodnikovye-materialy/362515/362988/> (accessed 01 August 2023).
38. Wang J., Zhu Z., Liu S., Ding R. A low-noise programmable gain amplifier with fully balanced differential difference amplifier and class-AB output stage, *Microelectronics Journal*, 2017, Vol. 64, pp. 86-91.
39. Royo G., Sanchez-Azqueta C., Martinez-Perez A.D., Aldea C., Celma S. Fully-differential transimpedance amplifier for reliable wireless communications, *Microelectronics Reliability*, 2018, Vol. 83, pp. 25-28.
40. Ku Y.-T., Hwang Y.-S., Chen J.-J., Shih C.-C., Cheng D. A new current-mode Wheatstone bridge based on a new fully differential operational transresistance amplifier, *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2019, Vol. 101, pp. 85-92.
41. Sabry M.N., Nashaat I., Omran H. Automated design and optimization flow for fully-differential switched capacitor amplifiers using recycling folded cascode OTA, *Microelectronics Journal*, 2020, Vol. 101, pp. 104814. DOI: 10.1016/j.mejo.2020.104814.
42. Beev N., Kiviranta M. Fully differential cryogenic transistor amplifier, *Cryogenics*, 2013, Vol. 57, pp. 129-133. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2013.06.004.
43. Kim K., Yoo C. Time-Domain Operational Amplifier with Voltage-Controlled Oscillator and Its Application to Active-RC Analog Filter, *Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. IEEE, 2020, Vol. 67, No. 3, pp. 415-419.
44. Gebreyohannes F. T., Loueratand M., Aboushady H. Design of a 4th-Order Feed-Forward-Compensated Operational Amplifier for Multi-GHz Sampling Frequency Continuous-Time Bandpass Sigma-Delta Modulators, *International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. IEEE, 2019, pp. 1-5.
45. Flenrion W.S., Kruczkowski P.J., Sen S. Trans-impedance amplifier, US Patent 6.323.734, Feb. 29, 2001.
46. Ma D., Geng X., Dai F.F., Cressler J.D. A 6th order butterworth SC low pass filter for cryogenic applications from $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, *Proceedings of the AEROS Conference*, 2009, pp. 1-8.
47. Watson J., Castro G. High-temperature electronics pose design and reliability challenges, *Analog Dialogue*, 2012, Vol. 46, No. 2, pp. 3-9.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.А. Сергеев.

Бугакова Анна Витальевна – Донской государственный технический университет; e-mail: annabugakova.1992@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79094169380; к.т.н.; младший научный сотрудник Управления научных исследований; доцент кафедры информационных систем и радиотехники.

Кузнецов Дмитрий Владимирович – e-mail: dkuznetsov2000@mail.ru; тел.: +79525816170; магистрант кафедры информационных систем и радиотехники.

Чумаков Владислав Евгеньевич – e-mail: chumakov.dssa@mail.ru; тел.: +79895020032; аспирант кафедры информационных систем и радиотехники; инженер Управления научных исследований.

Клейменкин Дмитрий Владимирович – e-mail: k-dima-01@mail.ru; тел.: +79281970049; магистрант кафедры информационных систем и радиотехники.

Сергеенко Марсель Алексеевич – e-mail: mars1327el@gmail.com; тел.: +79185704519; студент кафедры информационных систем и радиотехники.

Bugakova Anna Vitalievna – Don State Technical University; e-mail: annabugakova.1992@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79094169380; cand. of eng. sc.; junior research fellow of the Office of scientific research; associate professor of the department of information systems and radio engineering.

Kuznetsov Dmitry Vladimirovich – e-mail: dkuznetsov2000@mail.ru; phone: +79525816170; master's student of the department of information systems and radio engineering.

Chumakov Vladislav Evgenievich – e-mail: chumakov.dssa@mail.ru; phone: +79895020032; graduate student of the department of information systems and radio engineering; research engineer of scientific research.

Kleimenkin Dmitriy Vladimirovich – e-mail: k-dima-01@mail.ru; phone: +79281970049; master's student of the department of information systems and radio engineering.

Sergeenko Marsel Alexeyevich – e-mail: mars1327el@gmail.com; phone: +79185704519; student of the department of information systems and radio engineering.

УДК 616-71; 519.688

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-254-264

М.Р. Шарипов, А.Ф. Фахрутдинов, П.А. Кокунин**МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ СЕРДЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСТРАИВАЕМЫХ В СМАРТФОНЫ СЕНСОРОВ**

Неинвазивный мониторинг является перспективным направлением в медицине для определения биометрических показателей. Целью предлагаемого исследования является обзор современных неинвазивных методов определения биометрического показателя, такого как частота сердечных сокращений. Рассмотрены проблемные вопросы имеющихся решений, связанные с методами проведения расчетов и методиками проведения испытаний. В настоящее время смартфон является неотъемлемой частью жизни любого человека. С помощью этих устройств пользователи могут выполнять практически любые действия, не выходя из дома, например, делать покупки, смотреть фильмы и развлекаться, что делает их жизнь гораздо проще, удобнее и эффективнее. Кроме того, современные смартфоны имеют широкие возможности в сфере телекоммуникаций, позволяя группам людей часто общаться в режиме реального времени. В связи с пандемией COVID-19 актуальной стала необходимость мониторинга состояния здоровья, а также постоянного контроля биомедицинских показателей сотрудников, которые находятся на рабочем месте. Одним из важнейших показателей является частота сердечных сокращений, анализ этого показателя позволяет характеризовать работу важнейшей сердечно-сосудистой системы. В настоящем обзоре рассматриваются методики контроля частоты сердечных сокращений на основе методов, которые могут быть использованы на базе смартфонов, с использованием датчиков, которыми оснащаются все современные смартфоны. Основным подходом, который может быть применен в смартфонах для определения частоты сердечных сокращений является использование источника света и светочувствительного устройства, которое принимает свет, проходящий через капилляры, чаще всего пальца, человека у которого измеряется частота сердечных сокращений. Отличие подходов заключается в аппаратной части – какой источник света используется и что используется в качестве приемника отраженного света. В качестве источника света может использоваться светодиод, в смартфонах это мощные светодиоды, которые используются в фотовспышке, в качестве приемника либо фотодиод, либо видеокамера. В части обработки получаемого сигнала существует несколько подходов в настоящем обзоре они рассмотрены.

Частота сердечных сокращений; биомониторинг; смартфон; неинвазивный мониторинг; сенсор.