

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 536.5:530.145.82

Бельков  
Евгений Александрович

Прецизионное измерение температуры на основе использования ядерного  
квадрупольного резонанса

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра техники и технологии  
по специальности 1-39 80 01 «Радиосистемы и радиотехнологии»

Научный руководитель  
Крушев Владимир Тимофеевич  
канд. техн. наук, доцент

Минск 2022

## ВВЕДЕНИЕ

Температура наряду с давлением и объёмом представляет собой одну из трёх основных величин, характеризующих термодинамическое состояние вещества, и непосредственно связана с его внутренней энергией. Практически нет ни одной области деятельности человека, где не требовалось бы измерять и регулировать температуру, поэтому она является одной из наиболее часто измеряемых физических величин. В настоящее время измерение температуры играет ключевую роль в большинстве экспериментов. Она зачастую является критически важным фактором в определении эффективности технологического процесса и качества продукции.

В отличие от других физических величин, температура не может быть измерена непосредственно напрямую. Изменение температуры можно проследить через изменение других физических свойств вещества (объёма, давления, электрического сопротивления, интенсивности излучения и т.д.) связанных с температурой через определённые законы.

На сегодняшний день существует множество способов измерения температуры, и каждому присущи свои уникальные недостатки. Ключевыми недостатками являются малый диапазон измеряемых температур, нестабильность во времени, низкая чувствительность и т.д. Одной из самых главных проблем является низкая точность измерения температуры. При определении фундаментальных физических констант, необходимо измерять температуру с погрешностью  $10^{-2} - 10^{-4} \%$ . В промышленности, повышение точности измерения температуры, например, при разливке стали на  $0,1 \%$  даёт возможность улучшить на  $5 - 10 \%$  качественные показатели стали.

При выращивании монокристаллов, изготовлении интегральных микросхем и получении чистых металлов необходимо поддерживать температуру с погрешностью  $0,01 - 0,1 \%$ . Снижение погрешности измерения температуры в диапазоне  $1500 - 1800 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $3 - 5 \text{ K}$  позволяет повысить мощность атомных электростанций на  $3 - 5 \%$ .

В связи с этим можно утверждать, что на сегодняшний день, точное измерение температуры является весьма актуальной задачей. Очевидно, что для повышения точности измеряемой температуры целесообразно использование прецизионных методов измерения температуры, а также создания высокоточных датчиков и обработчиков на их основе.

Одним из методов прецизионного измерения температуры является метод ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР). Данный метод основан на взаимодействии градиента электрического поля кристаллической решётки вещества и квадрупольного электрического момента ядра, вызванного отклонением распределения заряда ядра от сферической симметрии.

На сегодняшний день ЯКР термометрию используют во многих высокотехнологичных областях, включая авиационную, аэрокосмическую и оборонную. Главными преимуществами ЯКР термометрии являются:

- достаточно высокая точность и чувствительность;

- широкий диапазон измерений;
- временная стабильность;
- вывод информации в виде частоты.

В последние годы метод ЯКР находит всё большее применение в различной измерительной аппаратуре. На основе этого метода изготавливаются датчики температуры, магнитного поля, давления и т.д. Большая абсолютная точность измерения температуры  $\approx 10^{-3}$  градуса делают их незаменимыми при прецизионных измерениях, а выход информации в виде частоты очень удобен для создания автоматических устройств. ЯКР-термометры не требуют периодической поверки и калибровки и могут быть использованы в качестве эталонов температуры, а также на долговременных орбитальных космических станциях и в технологических процессах.

Целью магистерской диссертации является разработка метода и принципа построения электронных устройств на основе применения ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР).

Для достижения требуемой цели изначально необходимо провести аналитический обзор по применению ЯКР для измерения температуры, изучить принципы построения измерителей температуры на основе ЯКР, а затем предложить принцип построения и схемотехнику на современной элементной базе. На следующем этапе необходимо выработать рекомендации по проектированию и расчёту, разработать программное обеспечение. На заключительном этапе следует предложить эффективную методику экспериментального исследования по измерению температуры.

Отличительной особенностью разработки является обеспечение повышенной точности и диапазона измерения температур. Это требует учёта множества факторов, например, подбора термочувствительного вещества для датчика, выбора канала связи между датчиком и индикатором и т. д. Принимается во внимание использование определённых схемотехнических решений для обеспечения необходимых требований, например, выбор разрядности процессора и т.д.

Результаты выполненных исследований планируются для использования в тех направлениях, где требуется точное измерение температуры.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Измерение температуры как параметра окружающей среды является важным в различных технологических процессах. Главной проблемой является низкая точность измерения температуры. Одним из методов точного измерения температуры является метод ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР). На сегодняшний день ЯКР термометрию используют во многих высокотехнологичных областях, например, при разливке стали, выращивании монокристаллов, изготовлении интегральных микросхем и получении чистых металлов. В связи с этим можно утверждать, что точное измерение температуры методом ЯКР является весьма актуальной задачей.

Степень разработанности проблемы.

Отсутствие в настоящее время высокоточных методов и принципов построения электронных устройств измерения температуры не позволяет достоверно определять и оценивать температуру с достаточно высокой точностью.

Цель и задачи исследования.

Целью магистерской диссертации является разработка метода и принципа построения электронных устройств на основе применения ядерного квадрупольного резонанса. Для достижения данной цели в работе сформулированы следующие задачи:

- провести аналитический обзор по применению ЯКР для измерения температуры;
- изучить принципы построения измерителей температуры на основе ЯКР;
- разработать принцип построения и схемотехнику на современной элементной базе;
- выработать рекомендации по проектированию и расчёту, а также разработать программное обеспечение;
- провести экспериментальное исследование по измерению температуры.

Объектом исследования является метод ядерного квадрупольного резонанса и его применение для прецизионного измерения температуры.

Предметом исследования является реализация электронных устройств для прецизионного измерения температуры на основе ЯКР.

Область исследования.

Содержание диссертационной работы относится к прецизионному измерению температуры и соответствует образовательному стандарту высшего

образования второй степени (магистратуры) по специальности 1-39 80 01 «Радиосистемы и радиотехнологии».

Теоретическая и методологическая основа исследования.

В основу диссертации легли результаты разработки методики по экспериментальному исследованию прецизионного измерителя температуры на основе использования ядерного квадрупольного резонанса. Теоретической основой исследования является измерение температуры методом ЯКР. Экспериментальное моделирование термометра ЯКР, а также измерение температуры и наблюдение ядерного квадрупольного резонанса производились в среде разработки *LabView* 2011.

Научная новизна диссертационной работы заключается в обеспечении повышенной точности и диапазона измерения температур за счёт выбора нового термочувствительного вещества для датчика и современной схемотехнической реализации, например, применения прямого цифрового синтеза, а также использования операционных усилителей, коэффициент передачи которых имеет минимальные отклонения при изменении температуры.

Личный вклад соискателя.

Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Соискателем проработаны теоретические и практические основы методов и принципов построения электронных устройств на основе применения ядерного квадрупольного резонанса. Разработаны структурная и функциональная схемы термометра ЯКР, использующие предложенные методы повышения точности и диапазона измеряемых температур. Разработаны электрические принципиальные схемы ЯКР-термометра. Проведено экспериментальное измерение температуры и выполнено наблюдение ядерного квадрупольного резонанса.

Положения, выносимые на защиту.

1. Принцип построения измерителя температуры на основе использования ядерного квадрупольного резонанса на современной элементной базе.

- Измерение температуры методом ядерного квадрупольного резонанса;
- Принцип построения ядерного квадрупольно-резонансного термометра;
- Принцип повышения диапазона измеряемых температур ядерного квадрупольно-резонансного термометра.

2. Разработка архитектуры прецизионного измерителя температуры на основе ядерного квадрупольного резонанса.

- Расчёт необходимой полосы пропускания линейного тракта термометра ЯКР;
- Выбор средств обеспечения избирательности термометра ЯКР;
- Выбор первых каскадов блока обработки сигналов;
- Расчёт числа преобразователей частоты;

- Выбор АЦП и средств обеспечения усиления линейного тракта;
  - Выбор и обоснование средств прямого цифрового синтеза частоты.
3. Схемотехника и программное обеспечение прецизионного измерителя температуры.
- Расчёт основных функциональных узлов термометра ЯКР;
  - Разработка программного обеспечения термометра ЯКР.
4. Экспериментальное исследование прецизионного измерителя температуры на основе ядерного квадрупольного резонанса.
- Экспериментальное моделирование термометра ЯКР в среде *LabView*;
  - Результаты измерения температуры и наблюдения ядерного квадрупольного резонанса в среде *LabView*.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в разработке и исследовании новых методов и средств, предназначенных для прецизионного измерения температуры на основе ядерного квадрупольного резонанса, и позволяющих повысить точность и диапазон температурных измерений. Результаты выполненных исследований планируются для использования в тех направлениях, где требуется точное измерение температуры.

Апробация и внедрение результатов исследования.

Результаты исследования были представлены на 57-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (19-23 апреля 2021 г, Минск); X Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов ГГУ имени Ф. Скорины (22 апреля 2021 г, Гомель); 25-ом международном молодёжном форуме "Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке" (20-22 апреля 2021 г, Харьков).

Структура и объём работы.

Работа состоит из общей характеристики, введения, пяти глав исследования, заключения, библиографического списка и графического материала. Общий объём диссертации составляет 144 страницы. Работа содержит 2 таблицы, 65 рисунков, 2 приложения. Библиографический список включает 50 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В общей характеристике работы указана актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования. Указаны научная новизна и практическая значимость диссертации, а также личный вклад соискателя. Приведены положения, выносимые на защиту.

Во введении рассмотрено современное состояние проблемы, определены основные направления исследований, а также даётся обоснование актуальности темы диссертации.

Первая глава содержит обзор литературы по применению ядерного квадрупольного резонанса для измерения температуры. Подробно рассмотрены существующие методы и средства измерения температуры. Проведён анализ зависимости частоты квадрупольного резонанса от температуры и давления. Рассмотрен опыт разработки приборов термометрии на базе ядерного квадрупольного резонанса.

Во второй главе рассматриваются принципы построения измерителя температуры на основе использования ядерного квадрупольного резонанса. Описан процесс измерения температуры методом ядерного квадрупольного резонанса. Изложены принципы построения ядерного квадрупольно-резонансного термометра и повышения диапазона измеряемых температур.

В третьей главе приведена разработка архитектуры прецизионного измерителя температуры на основе ядерного квадрупольного резонанса. Проведён расчёт необходимой полосы пропускания линейного тракта и числа преобразователей частоты. Были выбраны: средства обеспечения избирательности термометра ЯКР, первые каскады блока обработки сигналов, АЦП и средства обеспечения усиления линейного тракта, средства прямого цифрового синтеза частоты.

В четвёртой главе приведены схемотехника и программное обеспечение прецизионного измерителя температуры. Проведён расчёт ключевых параметров катушки индуктивности, входной цепи, фильтров НЧ и СС, и амплитудного детектора. Также была выполнена разработка программного обеспечения ЯКР-термометра, которая подразумевает настройку синтезатора частоты и прошивку микроконтроллера.

В пятой главе изложена методика экспериментального исследования прецизионного измерителя температуры на основе ядерного квадрупольного резонанса. Было проведено моделирование термометра ЯКР, а также получены результаты измерения температуры и наблюдения ядерного квадрупольного резонанса в среде разработки *LabView* 2011.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации были рассмотрены методы и средства прецизионного измерения температуры, одним из которых является метод ядерного квадрупольного резонанса.

В соответствии с выбранным методом были рассмотрены принципы построения измерителя температуры на основе использования ядерного квадрупольного резонанса с применением современной элементной базы.

В ходе изучения принципов построения термометров ЯКР была предложена эффективная методика по измерению температуры, на основе которой была спроектирована структурная схема для проведения исследований. На основании спроектированной структурной схемы была построена и проанализирована функциональная схема ЯКР-термометра.

Изучение принципов построения ЯКР-термометров показало, что для повышения точности и уменьшения погрешности устройство может быть реализовано с помощью, так называемого цифрового синтезатора частот (*direct digital synthesis, DDS*), который может быть чрезвычайно точным и задавать возбуждающий сигнал высокой частоты, что имеет решающее значение для поставленной задачи.

Для достижения оптимального отношения сигнал/шум, которое составило 23,5 дБ, были рассчитаны параметры катушки индуктивности. В качестве термочувствительного вещества был использован оксид меди  $Cu_2O$  ядер  $Cu^{65}$  и массой 2 г. Такой выбор обусловлен возможностью вещества обеспечивать высокую воспроизводимость ширины линии отклика сигнала, а также относительно узкую ширину линии поглощения (~10 кГц) и высокую температурную чувствительность ~4-5 кГц/°С.

В соответствии с функциональной схемой была разработана архитектура термометра ЯКР с применением современной элементной базы. Для выбора схемы линейного тракта была рассчитана необходимая полоса пропускания. Избирательность по побочным каналам в 30 дБ обеспечивается двухконтурным преселектором с одиночным преобразованием частоты. Для обеспечения избирательности по соседнему каналу был выбран и рассчитан полосовой биквадратный фильтр второго порядка. Во избежание проблем с компенсацией потерь и согласованием трактов по динамическому диапазону, был использован 14-битный АЦП *LTC1418*. В качестве цифрового синтезатора частот был выбран *AD9958*, содержащий два *DDS* ядра, которые обеспечивают независимое управление частотой, фазой и амплитудой на каждом канале.

На основании разработанной архитектуры был проведён подробный расчёт отдельных функциональных узлов, а также проведена разработка программного обеспечения исследуемого ЯКР-термометра. Была выполнена настройка оценочной платы цифрового синтезатора частоты *AD9958* посредством *AD9958 Evaluation Software*. После настройки синтезатор частоты способен генерировать сигналы частоты от 24,053629 МГц до 26,901850 МГц с шагом роста/спада частоты 2,380 Гц и интервалом шага 2,054 мкс. Перенастройка минимальной

частоты на максимальную занимает порядка 2,15 с. Также была проведена отладка микроконтроллера AT91SAM7S64 с помощью специального программного обеспечения *H-JTAG*.

В результате проведения экспериментального исследования по прецизионному измерению температуры на основе метода ЯКР было выполнено моделирование измерительного устройства в среде *LabView*. С помощью данной модели удалось провести измерение температуры, с точностью до 0,001 °С. Такая точность наблюдалась в диапазоне температур от -175 °С (98,15 К) до 530 °С (803,15 К), который соответствует диапазону частот от 24,05 до 26,65 МГц. Для предотвращения спада обеих характеристик можно применить более совершенный алгоритм преобразования частоты в температуру и использовать более точный полосовой фильтр.

В ходе проведённого исследования были получены следующие результаты по разработке метода и принципа построения ЯКР-термометра:

- минимальная температура – 100,025 К (-173,125 °С);
- максимальная температура – 800,014 К (526,864 °С);
- точность измерений – 0,001 °С.

Графический материал подготовлен с помощью программы для быстрого черчения электрических и структурных схем *sPlan 7.0*. Моделирование, а также экспериментальное исследование основных функциональных блоков ЯКР-термометра производились в среде разработки *LabView 2011*.

Результаты выполненных исследований планируются для использования в тех направлениях, где требуется точное измерение температуры.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1] Бельков, Е.А. Исследование методов и средств прецизионного измерения температуры / Е.А. Бельков // Перспективы развития инфокоммуникаций и информационно-измерительных технологий: тезисы докл. науч.-техн. конф. ХНУРЭ. – Харьков, 2021. – Т. 4. – С. 116 – 118.

[2] Бельков, Е.А. Разработка устройства для прецизионного измерения температуры на основе ядерного квадрупольного резонанса / Е.А. Бельков // Актуальные вопросы физики и техники: тезисы докл. науч.-техн. конф. ГГУ им. Ф. Скорины. – Гомель, 2021. – Ч. 1. – С. 29 – 32.

[3] Belkov, E.A. Research of the nuclear quadrupole resonance method and its application for precision temperature measurement and other relevant fields / E. A. Belkov // 57<sup>th</sup> Scientific Conference of postgraduates, undergraduates and students of BSUIR – Minsk, Belarus, 2021. – P. 126–128.