

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-3-3-13

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Растворова И.И., Смирнов В.А.

Санкт-Петербургский Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
Vovsm1999@gmail.com

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Применение электронных измерительных устройств в процессе бурения скважин в особенно сложных и уникальных условиях Антарктиды. В условиях экстремально низких температур, которые характерны для этого региона, поставлена задача обеспечить надежную работу электроники, что является критически важным для успешного выполнения буровых операций и получения точных данных. Особое внимание уделено анализу различных методов защиты электронных устройств от отрицательных температур. Исследуются многочисленные подходы к термоизоляции, а также используются инновационные материалы, которые способны минимизировать влияние холодного воздуха на чувствительные компоненты электроники. *ЦЕЛЬ.* Целью работы является исследование актуальных электронных измерительных систем, используемых при бурении скважин в условиях Антарктиды, а также проведение эксперимента над серийными датчиками температуры с использованием охлаждающей камеры. *МЕТОДЫ.* В рамках работы проведены тщательные эксперименты с температурными датчиками различных типов и форматов. Тестирование осуществлялось в специальных охлаждающих камерах, что позволило моделировать реальные условия, с которыми сталкиваются устройства в Антарктиде. Кроме того, в исследовании рассматривается влияние расположения датчиков относительно микрочипов, что также может существенно влиять на их показатели точности и надежности. Важной частью работы стал эксперимент с электроникой, покрытой водонепроницаемым полимерным покрытием. Это покрытие не только защищает устройства от влаги, но и дополнительно изолирует их от холода, что в условиях Антарктики имеет первостепенное значение. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Полученные результаты позволяют сделать выводы о наиболее эффективных способах защиты электронных измерительных устройств для бурения в непростых климатических условиях, а также открывают новые горизонты для дальнейших исследований в данной области.

Ключевые слова: бурение; микроэлектроник; температурный датчик; низкие температуры; Антарктида.

Для цитирования: Растворова И.И., Смирнов В.А. Исследование работы измерительной микроэлектроники в низкотемпературных климатических условиях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 3-13. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-3-13.

STUDY OF THE PERFORMANCE OF MEASUREMENT MICROELECTRONICS IN LOW-TEMPERATURE CLIMATIC CONDITIONS

Smirnov V.A, Rastvorova I.I.

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Vovsm1999@gmail.com

Abstract: *ACTUALLY.* The work addresses the topic of using electronic measuring devices in the drilling process of wells under particularly challenging and unique conditions in Antarctica. In the context of extremely low temperatures, characteristic of this region, the task is to ensure the reliable operation of electronics, which is critically important for the successful execution of drilling operations and obtaining accurate data. Special attention is given to analyzing various methods for protecting electronic devices from negative temperatures. Numerous approaches to thermal insulation are explored, and innovative materials are utilized to minimize the impact of cold air on sensitive electronic components. **OBJECT.** The aim of the work is to investigate current electronic measurement systems used in drilling wells under Antarctic conditions, as well as to conduct experiments on series temperature sensors using a cooling chamber. **METHODS.** The study includes thorough experiments with temperature sensors of various types and formats. Testing was conducted in specialized cooling chambers, allowing for the modeling of real conditions faced by devices in Antarctica. Furthermore, the study examines the impact of the sensor placement relative to the microchips, which can significantly affect their accuracy and reliability. An important part of the work was an experiment with electronics covered by a waterproof polymer coating. This coating not only protects the devices from moisture but also provides additional insulation against cold, which is of paramount importance in Antarctic conditions. **RESULTS.** Thus, the results obtained allow conclusions to be drawn about the most effective ways to protect electronic measuring devices for drilling in challenging climatic conditions, as well as opening new horizons for further research in this area.

Keywords: drilling; microelectronics; temperature sensor; low temperatures; Antarctica.

For citation: Smirnov V.A, Rastvorova I.I. Study of the performance of measurement microelectronics in low-temperature climatic conditions. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3): 3-13. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-3-13.

Введение (Introduction)

Изучение подледниковых озер Антарктиды, а также самого ледяного покрова материка уже долгое время интересует мировое научное сообщество из разных сфер, поскольку они имеют уникальную, неискаженную воздействием человека информацию о Земле. Для детального исследования ледяного покрова необходимо производить отбор керн на различных глубинах. Также немалый интерес представляют подледниковые озера, расположенные на больших глубинах. Бурение осложняется следующими факторами:

Сложная логистика. Транспортировка металлоемких конструкций и большого количества топлива очень ресурсозатратна, а в некоторых случаях – невозможна.

Сложные климатические условия (давление, температура).

Уникальная природная зона. Загрязнение или нарушение экологии может привести к необратимым последствиям.

На сегодняшний день электромеханическая буровая установка, используемая Российской экспедицией в Антарктиде, не обладает достаточным количеством электронных измерительных средств, что приводит к снижению эффективности и скорости бурения. В условиях Антарктики эффективное бурение непосредственно зависит от точности измерений, что в свою очередь определяется качеством электронных систем, участвующих в процессе. Наличие современных измерительных приборов позволяет не только оперативно получать данные о состоянии окружающей среды и самих буровых установок, но и минимизировать возможные ошибки, связанные с изменением климатических условий. Использование современной микроэлектроники осложняется в первую очередь уникальными климатическими условиями [1,2], в частности низкой температурой и атмосферным давлением. Эти факторы могут влиять на функционирование и точность измерительных систем, а также приводить к увеличению вероятности поломок

оборудования в условиях резких температурных перепадов. Иностранные буровые установки имеют гораздо более современное электронное сопровождение, но которое также имеет ряд недостатков [3]. Так из результатов исследований на станции Восток удалось выявить слабые места в измерительной технике и установить возможности в доработке измерительного оборудования [4,5]. Целью работы является исследование актуальных электронных измерительных систем, используемых при бурении скважин в условиях Антарктиды, а также проведение эксперимента над серийными датчиками температуры с использованием охлаждающей камеры. Для достижения цели необходимо проанализировать современные технологии в этой области, определить их недостатки и оптимизировать процесс, что позволит повысить эффективность буровых работ и обеспечить более качественные и надежные результаты измерений процесса бурения.

Попадание внутрь электронного прибора даже небольшого количества влаги может быть разрушительно. Существует стандарт степени защиты электронных приборов ГОСТ 14254-2015. На производствах или месторождениях, где электроника расположена в непосредственной близости с водной средой, используются приборы, изготовленные по стандарту IP68 и IP69 (с пометкой о максимальном давлении жидкости). Для выполнения требований этих стандартов наиболее распространенный метод – использование водонепроницаемых корпусов, но он имеет ряд недостатков [6].

Полимерные защитные покрытия в отличие от корпусной герметизации наиболее экономичным и менее трудоемким методом.

Уникальным и наиболее эффективным методом надежной защиты электронных устройств различного назначения от внешних факторов является нанесение поли-пара-ксилиленовых из газовой фазы в вакууме. Покрытия, получаемые вакуумным осаждением, имеют существенное отличие по структуре и свойствам от покрытий, формируемых из жидких сред, и реализуют свои защитные свойства при значительно меньших толщинах. Процесс получения ППКП осуществляется на специальных вакуумных установках.

Буровые работы в Антарктиде осложнены низкими температурами на поверхности и в ледниках, отсутствием дорог и инфраструктуры, штормовыми ветрами, снегопадами и другими погодными явлениями. Традиционные роторные буровые установки для бурения керна в ледниках должны иметь большой вес и мощность, что затрудняет их адаптацию для исследования ледников. Для бурения глубоких скважин в Антарктиде были разработаны специальные электромеханические буры на тросовой подвеске. Основной особенностью электромеханической технологии бурения льда является способ опускания и подъема бура в скважину. Вместо труб, которые используются в обычных роторных буровых установках для подачи энергии для разрушения горных пород на забое скважины и извлечения используется забойная установка, бронированный трос и лебедка.

Такая конструкция не только снижает массу и энергопотребление бурового оборудования, но и сокращает время проходки в скважину и из скважины, упрощает очистку скважины от шлама. Технологии по очистки скважины от шлама также модифицируются.

Первая электромеханическая установка была разработана в США в 1940 году. Немного позже в 1956 в СССР была разработана собственная буровая установка для бурения в условиях Антарктиды.

В настоящее время все буровые установки, используемые в Антарктиде, имеют тепловые, герметичные камеры для размещения в них электроники, производящей мониторинг параметров процесса бурения [7].



Рис. 1 – Внешний вид и расположение элементов в тепловой камере

Fig. 1 - Appearance and arrangement of elements in the thermal chamber

*Источник: [8] Source:[8].

Антарктической подледниковой буровой установке, разработанной в Центре полярных исследований Университета Цзилинь, Китай (Рис. 1). В этом случае применяется уникальное технологическое решение и конструкция измерительного устройства, расположенного в тепловой камере. Помимо поддержания климата вокруг электронного устройства, тепловая камера является еще и защитой от ударов, высокого уровня вибраций, попадания крупных и мелких частиц керна, а также от влаги. Такое решение хорошо показало себя на практике [8]. Благодаря автоматически поддерживаемому климату в камере есть возможность расположить недорогую электронику, неприспособленную к сложным температурным условиям. Помимо применения электроники в процессе глубокого бурения, также большое значение ее использование имеет в геофизических исследованиях. Каротаж скважин в ледниках представляет собой важный источник информации о физической обстановке в скважине и решает две основные задачи: контролировать техническое состояние скважины и изучать структуру льда [9,10].

Российская экспедиция использует буровую установку марки КЭМС-132 (Рис. 2). Данная буровая установка показала себя как одно из лучших решений для бурения в условиях Антарктиды. С ее помощью была пробурена самая глубокая скважина в этом регионе [11].

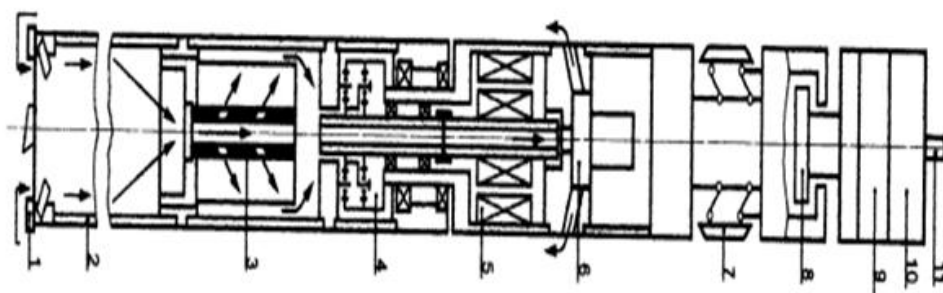


Рис. 2 – Электромеханический бур КЭМС-132: 1 - буровая головка, 2 - колонковый бур, 3 - камера с фильтром для шлама, 4 - редуктор, 5 - приводной электродвигатель, 6 - насос, 7 - противомоментная система, 8 - ударный блок, 9 - электрокамера, 10 - скоба подвеса троса, 11 – трос

*Источник: [11] Source:[11].

Fig. 2 - Electromechanical drill KEMS-132: 1 - drilling head, 2 - column drill, 3 - chamber with a mud filter, 4 - gearbox, 5 - drive electric motor, 6 - pump, 7 - counter-torque system, 8 - impact block, 9 - electric chamber, 10 - cable suspension bracket, 11 – cable

В настоящее время специально для ледниковых исследований разработаны кусочные скважинные регистраторы на основе использования 3D-акселерометров и 3D-магнитометров. Эти регистраторы использовались для получения кинематических измерений текучего льда на леднике Джарвис, Аляска [10,12] и для определения профиля деформации ледника, который определяется по измерениям наклона скважины на леднике Store, Гренландия [13]. Новый скважинный регистратор, предназначенный для сверхнизких температур и сверхвысоких давлений, разработанный в Центре полярных исследований Цзилиньского университета в Китае, позволяет одновременно измерять несколько параметров скважины: температуру, давление, угол наклона скважины, азимут скважины, ориентированный по стволу диаметр и поперечное сечение, разрез [14,15].

Основной проблемой использования электроники в условиях Антарктиды является ее ненадежная защита от воздействия низкотемпературной среды, влажности и вибраций. Как было отмечено выше, все электронные компоненты буровой установки располагают в тепловые герметичные камеры, которые обладают следующими проблемами:

1. Высокое энергопотребление, расходуемое на обогрев камеры.
2. Высокий риск повреждения герметичности камеры.

В условиях Антарктиды, где существуют большие проблемы с логистикой, и как следствие ограниченного количества топлива, необходимо избегать лишнего потребления электроэнергии. А поскольку буровые установки в сезон бурения работают круглосуточно, то потребление энергии на обогрев электроники нельзя недооценивать.

При повреждении камеры происходит нарушение теплоизоляционного слоя, что приводит к большим потерям энергии. Расчет этих потерь дает понимание о невозможности функционирования оборудования в штатном режиме, что приводит к снижению времени и качества работы [16,17]. Также появляется риск попадания влаги внутрь корпуса с

электроникой, что приведет к выводу ее из строя, что в некоторых случаях может быть недопустимо.

Для решения проблемы надежности одним из способов является использование сразу несколько дублирующих друг друга камер с датчиками, как представлено на рисунке 3



Рис. 3 – Тепловая герметичная камера с четырьмя блоками измерительных устройств

Fig. 3 - Thermal hermetic chamber with four measuring device units

*Источник: [18] Source:[18].

Решение использовать несколько аналогичных устройств повышает надежность в ущерб стоимости и потребления энергии.

Еще одним способом повышения надежности является использование датчика разгерметизации методом обнаружения утечек, основанном на контроле влажности. В электронной камере давления установлен датчик влажности на основе емкостного датчика. Если камера давления протекает, протечка воды на чувствительной к влаге емкости вызывает изменение емкости, и обнаруживается заметное увеличение влажности. Утечка воды может быть обнаружена по значительному изменению влажности в камере. Китайские исследователи проверили данный метод на практике с непроводящей чистой водой. Экспериментальные результаты показывали, что этот метод реализуем [7].

Большинство производимой промышленной микроэлектроники с микросхемами менее 1 мкм имеют рабочий температурный диапазон от -40 до +70 градусов. Это связано с использованием полупроводниковых технологий в их основе. В бытовых условиях, условиях промышленного производства температура окружающей среды, как правило, не превышает устанавливаемого производителями микросхем диапазона, но нередко появляется необходимость в различных электронных устройствах и в более сложных температурных условиях. При высоких температурах электроника деградирует, а при температурах превышающих температуру плавления материалов интегральной схемы или микросхем устройство полностью или частично перестанет выполнять свои функции. Также есть большая вероятность короткого замыкания вследствие повреждения контактных площадок, что может привести к возгоранию. В настоящий момент наиболее распространенным способом защиты электроники от воздействия температур является использование материалов с фазовым переходом, в частности парафин. Такие покрытия позволяют защитить не только микроэлектронику, но и аккумуляторы. Литий-ионные (Li-ion) батареи были являются источником питания для электронных устройств благодаря их высокой плотности энергии и мощности. Тем не менее, чувствительный к температуре литий-ионный аккумулятор требует строгих температурных условий от 20 до 55 °C для работы с высокой производительностью и высокой безопасностью. При высоких температурах выше 55 °C аккумуляторы подвержены потере емкости или даже тепловому разгону, что может привести к пожарам и взрывам. В то же время низкие температуры снижают проводимость электролита и скорость диффузии ионов лития батареи, что приводит к падению напряжения, необратимой потере емкости или даже внутреннему короткому замыканию [17,19].

Для питания электроники с можно использовать суперконденсаторы, которые менее подвержены воздействию температур. Современные конденсаторы могут обладать даже большими емкостями, нежели традиционные литий-ионные и питать электронику с напряжением в тысячи вольт. Таким образом, можно избежать огромных затрат энергии, уходящих на обогрев изолированной камеры.

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве объектов исследования было взято следующее электронное оборудование в количестве четырех экземпляров:

1. Микроконтроллер PIC16F18855
2. Цепь для измерения температуры основанная на полупроводниковых диодах

Микроконтроллеры PIC16F18855 оснащены аналоговыми, независимыми от ядра периферийными устройствами и периферийными устройствами связи в сочетании с технологией экстремально низкого энергопотребления (XLP) для широкого спектра приложений общего назначения и с низким энергопотреблением. Платы поддерживают множество функций, включая светодиоды, датчики температуры, переключатели, динамики, интерфейсы RS-232. Данные микроконтроллеры получили широкое распространение в системах умного дома благодаря своей универсальности и производительности.

Полупроводниковые датчики температуры используются для широкого диапазона задач как промышленных условиях, так и бытовых. Физический принцип функционирования полупроводникового термометра заключается в том, что падение напряжения на прямосмещенном p-n переходе зависит от температуры. Эта зависимость имеет характеристики, близкие к линейным, что дает возможность разрабатывать датчики, которые не нуждаются в усложненных схемах для корректировки показаний [19].

Эксперимент проводился в холодильной камере с пределом отрицательной температуры в -60 градусов и был разделен на два этапа с отличными друг от друга начальными условия эксплуатации микроконтроллера. Это позволяет создать необходимые условия для изучения работы выбранных объектов в экстремально низкотемпературной среде. Заведомо известно, что в условиях низких температур могут возникать различные физические явления, которые могут повлиять на функционирование электронных элементов, такие как изменение электрических характеристик и увеличенный риск появления конденсата. На первом этапе микроконтроллер был исследован в условиях, приближенных к стандартным, чтобы получить базовые характеристики его работы и затем подвержен воздействию температурного диапазона в -60 градусов. Это был основной этап, на котором мы планировали оценить, как низкие температуры влияют на работу электроники, а также на точность показаний термометра. На этом этапе важно отметить, что при понижении температуры электроника может демонстрировать различные эффекты, такие как задержка в обработке данных, нестабильность напряжения и температурные колебания, что может привести к ошибкам в измерениях. Основные параметры, которые измерялись в этот период, включали в себя стабильность работы процессора при заданной температуре и стабильность работы датчиков температуры. Этот этап был необходим для создания контрольной базы, с которой можно было бы сравнивать результаты, полученные в условиях низких температур.

Второй этап включал в себя проверку работоспособности оборудования, которое было предварительно охлаждено в холодильной камере до необходимой для измерений температуры, и сравнения результатов с полученными в первом этапе данными.

Важным аспектом, который также учитывался в ходе эксперимента, было влияние конденсата, который мог образовываться на поверхности оборудования из-за разницы температур между внутренней средой холодильной камеры и внешней атмосферой. Образование конденсата представляет собой значительную угрозу для работы микроэлектронных компонентов, так как может привести к коротким замыканиям и повреждению схем. Чтобы минимизировать риск, один из микроконтроллеров был покрыт влагозащитным пленочным покрытием. Это покрытие обеспечивает защиту от влаги, создавая барьер, который препятствует попаданию воды на чувствительные элементы устройства.

Для анализа степени воздействия этого физического явления на эксперимент один из контроллеров был покрыт влагозащитным пленочным покрытием. Использовались полимерные материалы, которые обеспечивают не только защиту от влаги, но и сохраняют свои изоляционные свойства при низких температурах. Этот эксперимент был направлен на то, чтобы продемонстрировать, как применение влагоустойчивых технологий может

улучшить долговечность и надежность работы электронных компонентов в экстренных условиях.

Результаты (Results)

Производитель выбранной электроники указывает предел низкой температуры до -40 градусов по Цельсию. Температура в антарктических условиях может достигать порядка -60 градусов. В первом эксперименте мы производили запуск электронных устройств в помещении при комнатной температуре, затем помещали их в охлаждённую до -60 градусов камеру и постепенно ее нагревали. Несмотря на температуру в камере ниже, чем заявлена производителем, устройства отработали в штатном режиме (рис. 4)

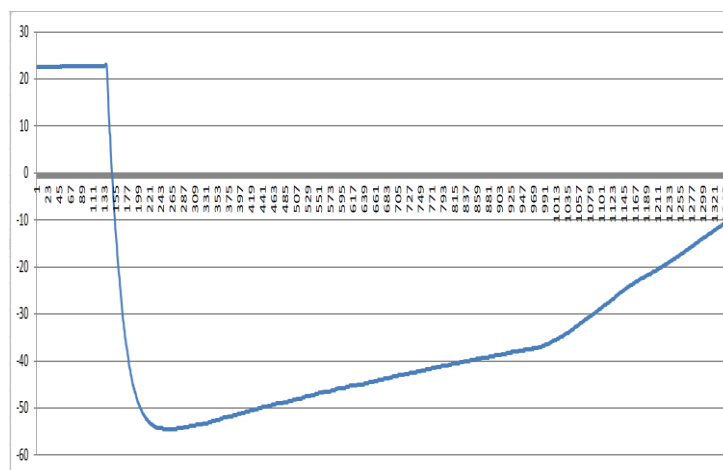


Рис. 4 – График изменения температуры при запуске устройства в комнатной температуре (по вертикальной оси – значения температуры в градусах по Цельсию, по горизонтальной – время в секундах)

Fig. 4 - Temperature change chart during device startup at room temperature (vertical axis - temperature values in degrees Celsius, horizontal axis - time in seconds)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Во втором эксперименте было принято решение производить запуск, предварительно охладив устройства в камере. Все устройства запустились нормально, но показания температурного датчика стали нелинейными. Среднее отклонение температуры составило 5 градусов по Цельсию (рис. 5).

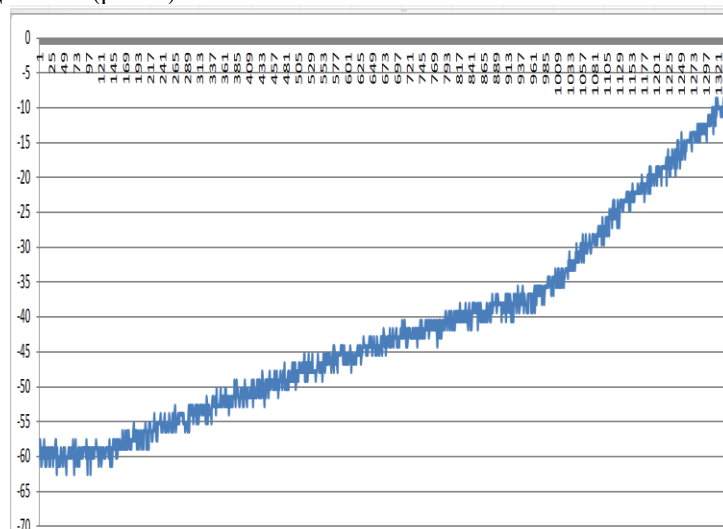


Рис. 5 – График изменения температуры при запуске устройства в охлажденной камере температуре (по вертикальной оси – значения температуры в градусах по Цельсию, по горизонтальной – время в секундах)

Fig. 5 - Temperature change chart during device startup in a cooled chamber (vertical axis - temperature values in degrees Celsius, horizontal axis - time in seconds)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Оба эксперимента были повторены три раза и результаты оказались аналогичными.

Мы предполагаем, что такую ошибку может давать полупроводниковый диод в цепи измерения температуры. Планируется дальнейшее исследование его вольт-амперной характеристики в различных температурных условиях.

Также, в эксперименте одно из устройств было покрыто специальным влагозащитным полимером, но его наличие не повлияло на результаты.

Обсуждение (Discussion)

По результатам исследования, можно утверждать, что выбранный серийный микроконтроллер и температурные датчики являются надежными компонентами, способными функционировать в экстремальных условиях, с некоторыми оговорками относительно отклонений в показаниях полупроводниковых датчиков. На основе полученных данных, вытекают следующие рекомендации для дальнейших исследований и практического применения:

1. Дальнейшие испытания при экстремальных температурах: Рекомендуется проведение дополнительных тестов на устойчивость микроконтроллеров и датчиков при температурах, находящихся за пределами современных испытаний, чтобы определить границы их эксплуатации и выявить возможные точки отказа.

2. Калибровка полупроводниковых датчиков: Введение программных решений для калибровки полупроводниковых датчиков с учетом отклонений, зафиксированных в ходе нашего эксперимента, позволит повысить точность и надежность систем, основанных на этих датчиках.

3. Исследование влияния внешних факторов: Так же необходимо уделить внимание изучению влияния внешних факторов, таких как влажность, давление влияние магнитных полей на характеристики датчиков с покрытием и без, что даст более полное понимание их эксплуатационных возможностей.

4. Анализ долговечности и износостойкости: Для значительного повышения надежности применения датчиков и контроллеров в длительных и экстремальных условиях стоит рассмотреть возможность использования различных защитных покрытий конструкторских решений, а так же их влияние на долговечность компонентов.

Рекомендации могут послужить основой для дальнейших исследований, целью которых станет создание более точного и надежного измерительного оборудования, способного работать в условиях экстремально низких температур. Они также подчеркивают необходимость комплексного подхода к разработке промышленных систем, что в конечном итоге может привести к повышению их эффективности и долговечности в эксплуатации.

Заключение (Conclusions)

В ходе исследования были проанализированы современные методы противодействия негативным последствиям отрицательных температур для электроники. Результаты работы предоставляют ценные данные для дальнейшего использования полученной информации в тех областях, где стабильность работы оборудования при изменении климатических условий играет критическую роль.

По результатам эксперимента сделаны следующие выводы:

- выбранные серийные микроконтроллеры и температурные датчики демонстрируют высокую степень устойчивости к низким температурам, при этом не выходя из строя даже при значительных отклонениях от предельно допустимых значений, установленных производителем. Обнаруженные отклонения в температурном режиме в пределах 15-20 градусов Цельсия ниже указанной основаны на результатах испытаний, что говорит о значительном запасе прочности этих компонентов;

- разница в показаниях температурных датчиков с покрытием и без него оказалась незначительной. Выбранные датчики при наличии защитной пленки или без нее работают с высокой точностью и надежностью в необходимых нам условиях. Такой результат подчеркивает, что не всегда целесообразно использовать дополнительные защитные покрытия для достижения стабильности измерений. Однако стоит отметить, что отсутствие покрытия может указывать на снижение износостойкости в условиях длительного воздействия внешних факторов. Для более точной оценки целесообразности использования покрытия для повышения долговечности и устойчивости датчиков к внешним воздействиям необходимы дальнейшие исследования;

- при запуске полупроводникового температурного датчика в условиях низких температур обнаружены отклонения в среднем 5 градусов по Цельсию. В связи с этим следует вывод, что существует необходимость разработки методов коррекции и более точной калибровки для учета этого смещения.

Литература

1. X.K. Yu, Y.B. Tao, Preparation and characterization of paraffin/expanded graphite composite phase change materials with high thermal conductivity,(2022) International Journal of Heat and Mass Transfer, p. 123433 doi:10.1016/j.jheatmasstransfer.2022.123433
2. Serbin, D. V., & Dmitriev, A. N. (2022). Experimental research on the thermal method of drilling by melting the well in ice mass with simultaneous controlled expansion of its diameter. Journal of Mining Institute, 257, 833-842. doi:10.31897/PMI.2022.82
3. Zhang N et al. (2020). Antarctic Subglacial Drilling Rig: Part IV. Electrical and Electronic Control System. Annals of Glaciology 1–12. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.40>
4. Shishkin, E. V., Bolshunov, A. V., Timofeev, I. P., Avdeev, A. M., & Rakitin, I. V. (2022). Model of a walking sampler for research of the bottom surface in the subglacial lake Vostok. Journal of Mining Institute, 257, 853-864. doi:10.31897/PMI.2022.53
5. Bolshunov, A. V., Vasilev, D. A., Ignatiev, S. A., Dmitriev, A. N., & Vasilev, N. I. (2022). Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air. [Механическое бурение ледников с очисткой забоя сжатым воздухом] *Led i Sneg*, 62(1), 35-46. doi:10.31857/S2076673422010114
6. Shilin Peng, Xiao Jiang, Yongzhen Tang, Chong Li, Xiaodong Li, Shengmiao Huang, Tianxin Zhu, Jianguang Shi, Youhong Sun, Pavel Talalay, Xiaopeng Fan, Nan Zhang, Bing Li, Da Gong and Haibin Yu (2021). Recoverable autonomous sonde for subglacial lake exploration: electronic control system design. Annals of Glaciology 62(85-86), 263–279. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.1>
7. Pressure control method and device innovative design for deep oil in-situ exploration and coring Author links open overlay panel Nian-Han Wu, Ming-Zhong Gao, Liang-Yu Zhu, Jia-Nan Li, Dong Fan, Bin You, Wei Luo, Guo-Dong Zhu <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.10.011>.
8. Lee, Ian & Hawley, Robert & Bernsen, Steven; Campbell, Seth & Clemens-Sewall, David & Gerbi, Christopher & Hruby, Kate. (2019). A novel tilt sensor for studying ice deformation: application to streaming ice on Jarvis Glacier, Alaska. Journal of Glaciology. 66. 1-9. 10.1017/jog.2019.84.
9. Performance of a deep in situ pressure-preserving coring controller in a high-temperature and ultrahigh-pressure test system Xiaojun Shi a,b, Heping Xie a,b, Cong Li a,b*, Jianan Li a,b, Guikang Liu a,b, Zhenxi You b,c, Mingzhong Gao <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.01.012>
10. Sterkhov I.A. Kraev N. A., Denisova O. V Features of the Development of the Functional Units for Submersible Blocks of Downhole Telemetry Systems DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396635
11. Васильев, Н. И., А. Н. Дмитриев и П. А. Блинов (2012), Бурение глубокой скважины на российской антарктической станции Восток, Вестник ОНЗ РАН, 4, NZ2001, doi:10.2205/2012NZ000111.
12. Doyle, Samuel & Hubbard, Bryn & Christoffersen, Poul & Young, Tun Jan & Hofstede, Coen & Bougamont, Marion & Box, Jason & Hubbard, Alun. (2018). Physical Conditions of Fast Glacier Flow: 1. Measurements From Boreholes Drilled to the Bed of Store Glacier, West Greenland. Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 123. 10.1002/2017JF004529.
13. Markov, Aleksey & Talalay, Pavel & Sysoev, Mikhail & Miller, Andrey; Cherepakhin, Alexander. (2021). Borehole multi-functional logger for geophysical high-precision monitoring in Antarctic and Greenland ice sheets and glaciers. Annals of Glaciology. 62. 1-11. 10.1017/aog.2021.17.
14. Mortensen, N., Goetz, J., Gibson, C., Johnson, J., & Shturmakov, A. (2014). Replicate ice-coring system architecture: Electrical, electronic and software design. Annals of Glaciology, 55(68), 156-164. doi:10.3189/2014AoG68A014
15. Moon, Sung In & Extrand, C. (2009). Water Vapor Permeation Resistance of Polycarbonate at Various Temperatures. Industrial & Engineering Chemistry Research – IND ENG CHEM RES. 48.10.1021/ie900842t.
16. Исмоилов И.И., Грачева Е.И. Повышение управляемости энергетическими системами и улучшение качества электроэнергии // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №1 (53). С. 3-12.
17. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Альзакар А., Низамиев М.Ф., Шумихина О.А., Valtchev S. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(6):3-12. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>.
18. Bons, P., Jansen, D., Mundel, F. et al. Converging flow and anisotropy cause large-scale folding in Greenland's ice sheet. Nat Commun 7, 11427 (2016). <https://doi.org/10.1038/ncomms11427>.
19. Петросянц К.О., Исмаил-Заде М.Р., Самбурский Л.М. Особенности моделирования ВАХ JFET-транзисторов в диапазоне криогенных температур // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 174–184. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-174-184

Авторы публикации

Растворова Ирина Ивановна – д-р техн. наук, доцент кафедры Электронных систем Санкт-Петербургского Горного университета. Email: rastvorova@mail.ru.

Смирнов Владимир Алексеевич – аспирант кафедры Электронных систем Санкт-Петербургского Горного университета. Email: Vovsm1999@gmail.com

References

1. X.K. Yu, Y.B. Tao, Preparation and characterization of paraffin/expanded graphite composite phase change materials with high thermal conductivity,(2022) International Journal of Heat and Mass Transfer, p. 123433 doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123433
2. Serbin, D. V., & Dmitriev, A. N. (2022). Experimental research on the thermal method of drilling by melting the well in ice mass with simultaneous controlled expansion of its diameter. Journal of Mining Institute, 257, 833-842. doi:10.31897/PMI.2022.82
3. Zhang Netal. (2020). Antarctic Subglacial Drilling Rig: Part IV. Electrical and Electronic Control System. Annals of Glaciology 1–12. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.40>
4. Shishkin, E. V., Bolshunov, A. V., Timofeev, I. P., Avdeev, A. M., & Rakitin, I. V. (2022). Model of a walking sampler for research of the bottom surface in the subglacial lake Vostok. Journal of Mining Institute, 257, 853-864. doi:10.31897/PMI.2022.53
5. Bolshunov, A. V., Vasilev, D. A., Ignatiev, S. A., Dmitriev, A. N., & Vasilev, N. I. (2022). Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air. [Mekhanicheskoye bureniye lednikov s ochistkoy zaboya szhatym vozdukhom] Led i Sneg, 62(1), 35-46. doi:10.31857/S2076673422010114
6. Shilin Peng , Xiao Jiang, Yongzhen Tang, Chong Li, Xiaodong Li, Shengmiao Huang, Tianxin Zhu, Jianguang Shi, Youhong Sun, Pavel Talalay , Xiaopeng Fan, Nan Zhang, Bing Li, Da Gong and Haibin Yu (2021). Recoverable autonomous sonde for subglacial lake exploration: electronic control system design. Annals of Glaciology 62(85-86), 263–279. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.1>
7. Pressure control method and device innovative design for deep oil in-situ exploration and coring Author links open overlay panel Nian-Han Wu, Ming-Zhong Gao, Liang-Yu Zhu, Jia-Nan Li, Dong Fan, Bin You, Wei Luo, Guo-Dong Zhu <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.10.011>.
8. Lee, Ian & Hawley, Robert & Bernsen, Steven; Campbell, Seth & Clemens-Sewall, David & Gerbi, Christopher & Hruby, Kate. (2019). A novel tilt sensor for studying ice deformation: application to streaming ice on Jarvis Glacier, Alaska. Journal of Glaciology. 66. 1-9. 10.1017/jog.2019.84.
9. Performance of a deep in situ pressure-preserving coring controller in a high-temperature and ultrahigh-pressure test system Xiaojun Shi a,b , Heping Xie a,b , Cong Li a,b,* , Jianan Li a,b , Guikang Liu a,b , Zhenxi You b,c , Mingzhong Gao <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.01.012>
10. Sterkhov I.A. Kraev N. A., Denisova O. V Features of the Development of the Functional Units for Submersible Blocks of Downhole Telemetry Systems DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396635
11. Vasilyev, N. I., A. N. Dmitriev i P. A. Blinov (2012), Bureniye glubokoy skvazhiny na rossiyskoy antarkticheskoy stantsii Vostok, Vestnik ONZ RAN, 4, NZ2001 doi:10.2205/2012NZ000111.
12. Doyle, Samuel & Hubbard, Bryn & Christoffersen, Poul & Young, Tun Jan & Hofstede, Coen & Bougamont, Marion & Box, Jason & Hubbard, Alun. (2018). Physical Conditions of Fast Glacier Flow: 1. Measurements From Boreholes Drilled to the Bed of Store Glacier, West Greenland. Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 123. 10.1002/2017JF004529.
13. Markov, Aleksey & Talalay, Pavel & Sysoev, Mikhail & Miller, Andrey; Cherepakhin, Alexander. (2021). Borehole multi-functional logger for geophysical high-precision monitoring in Antarctic and Greenland ice sheets and glaciers. Annals of Glaciology. 62. 1-11. 10.1017/aog.2021.17.
14. Mortensen, N., Goetz, J., Gibson, C., Johnson, J., & Shturmakov, A. (2014). Replicate ice-coring system architecture: Electrical, electronic and software design. Annals of Glaciology, 55(68), 156-164. doi:10.3189/2014AoG68A014
15. Moon, Sung In & Extrand, C. (2009). Water Vapor Permeation Resistance of Polycarbonate at Various Temperatures. Industrial & Engineering Chemistry Research – IND ENG CHEM RES. 48.10.1021/ie900842t.
16. Ismoilov I.I., Gracheva E.I. Povyshenie upravlyaemosti energeticheskimi sistemami i uluchshenie kachestva elektroenergii // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2022. T. 14. №1 (53). S. 3-12.
17. Abdul lazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Alzakkar A., Nizamiev M.F., Shumikhina O.A., Valtchev S. Prognozirovanie i analiz elektropotrebleniya i potery elektroenergii na promyshlennykh ob'yektakh.

Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI. 2022;24(6):3-12. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>. 18. Bons, P., Jansen, D., Mundel, F. et al. Converging flow and anisotropy cause large-scale folding in Greenland's ice sheet. Nat Commun 7, 11427 (2016). <https://doi.org/10.1038/ncomms11427>.

19. Petrosyants K.O., Ismail-Zade M.R., Samburskiy L.M. Osobennosti modelirovaniya VAKH JFET-tranzistorov v diapazone kriogennykh temperatur // Izv. vuzov. Elektronika. – 2019. – Т. 24. – № 2. – S. 174–184. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-174-184.

Authors of the publication

Irina I. Rastvorova - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electronic Systems, Saint Petersburg Mining University. Email: rastvorova@mail.ru

Vladimir A. Smirnov – graduate student at the Department of Electronic Systems, Saint Petersburg Mining University. Email: Vovsm1999@gmail.com

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Получено **03.02.2025 г.**

Отредактировано **10.02.2025 г.**

Принято **17.02.2025 г.**