

ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ

Дата поступления рукописи в редакцию: 04.03.2026 г.

Дата принятия рукописи в печать: 07.04.2026 г.

DOI: 10.24412/3034-4042-2026-1-48-51

СМИРНОВ Владимир Алексеевич,

аспирант,

Санкт-Петербургский горный университет

императрицы Екатерины II,

e-mail: vovsm1999@gmail.com

САНДОВ Андрей Михайлович,

студент,

Санкт-Петербургский горный университет

императрицы Екатерины II,

e-mail: SandovAndrey@yandex.ru

НАДЁЖНОСТЬ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Аннотация. Освоение арктических регионов предъявляет повышенные требования к надёжности оборудования в условиях критически низких температур, достигающих -60°C и ниже. В таких экстремальных климатических условиях стандартные ограничения серийной микроэлектроники, рассчитанной на эксплуатацию до -40°C , создают значительные риски технологических сбоев. Статья посвящена проблеме обеспечения надёжной работы электронных измерительных устройств в условиях экстремально низких температур (до -60°C), характерных для Антарктики. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности буровых работ и буровых установок в частности, в полярных регионах, где отказы оборудования могут приводить к значительным временным и финансовым потерям. В работе проведён целенаправленный эксперимент с микроконтроллерами PIC16F18855 и полупроводниковыми датчиками температуры в холодильной камере, моделирующей антарктические условия. Особое внимание уделено изучению влияния двух факторов: предварительного охлаждения устройств до экстремально низких температур и наличия влагозащитного полимерного покрытия – на общую работоспособность и стабильность измерений. Результаты эксперимента продемонстрировали, что исследуемые электронные устройства сохраняют базовую функциональность даже при температурах ниже заявленного производителем предела (-40°C). На основании полученных данных сформулированы выводы о важности дальнейшего изучения долговременной стабильности (долговечности) электронных компонентов при эксплуатации в экстремальных низкотемпературных условиях. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для разработки и эксплуатации электронного оборудования в экстремальных климатических условиях. Исследование подчёркивает необходимость дальнейших работ по изучению долговременной стабильности электронных компонентов при эксплуатации в условиях низких температур.

Ключевые слова: низкотемпературные условия, измерительные системы, датчики температуры, Антарктида, надёжность, микроконтроллер.

SMIRNOV Vladimir Alekseevich

postgraduate student

St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II

SANDOV Andrey Mikhailovich

student

St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II

RELIABILITY OF MICROELECTRONIC MEASUREMENT SYSTEMS IN EXTREMELY LOW TEMPERATURE CONDITIONS

Annotation. The development of the Arctic regions places increased demands on the reliability of

equipment in conditions of critically low temperatures reaching -60°C and below. In such extreme climatic conditions, the standard limitations of serial microelectronics designed for operation up to -40°C pose significant risks of technological failures. The article is devoted to the problem of ensuring reliable operation of electronic measuring devices in conditions of extremely low temperatures (up to -60°C), typical for the Antarctic. The relevance of the study is due to the need to improve the efficiency of drilling operations and drilling rigs, in particular, in the polar regions, where equipment failures can lead to significant temporary and financial losses. A targeted experiment with PIC16F18855 microcontrollers and semiconductor temperature sensors in a refrigerator simulating Antarctic conditions was carried out. Special attention is paid to the study of the influence of two factors: pre-cooling of devices to extremely low temperatures and the presence of a moisture-proof polymer coating on the overall performance and stability of measurements. The experimental results demonstrated that the studied electronic devices retain their basic functionality even at temperatures below the manufacturer's stated limit (-40°C). Based on the data obtained, conclusions are formulated about the importance of further studying the long-term stability (durability) of electronic components during operation in extreme low-temperature conditions. The practical significance of the work lies in the possibility of using the results obtained for the development and operation of electronic equipment in extreme climatic conditions. The study highlights the need for further work to study the long-term stability of electronic components during operation at low temperatures.

Key words: low-temperature conditions, measurement systems, temperature sensors, Antarctica, reliability, microcontroller.

Введение

В условиях интенсивного освоения полярных регионов возрастает потребность в обеспечении надежного функционирования высокотехнологичного оборудования в условиях экстремально низких температур, достигающих до -60°C и ниже [1]. Одним из ключевых направлений является бурение скважин в приполярных зонах. Точность и надежность измерительных систем в этих условиях прямо влияют на экономическую эффективность проектов и безопасность персонала.

Низкие температуры оказывают существенное влияние на физические параметры полупроводниковых компонентов, включая подвижность носителей заряда, пороговое напряжение и токи утечки, что может приводить к систематическим погрешностям в измерениях. В условиях буровых работ, где точность измерения температуры, давления и позиционирования критически важна для качественного вскрытия пласта и обеспечения безопасности ствола скважины, такие погрешности являются недопустимыми [2].

Цель данной работы заключается в проведении экспериментальной оценки работоспособности серийных микроконтроллеров и датчиков температуры в условиях приближенных к антарктическим.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1. Провести серию экспериментов с микроконтроллерами семейства PIC16 в условиях, приближенных к антарктическим (до -60°C), что значительно превышает рабочую температуру микроконтроллера. Также оценить запас прочности у серийных компонентов и определить их устойчивости к низким температурам.

2. Исследовать влияние влагозащитного пленочного покрытия на стабильность работы, включая предотвращение конденсации влаги на элементах. Также провести исследование эффективности защиты от образования конденсата,

что является критическим фактором для обеспечения долговечности оборудования при резких изменениях температуры и повышения общей надежности системы, а также снижения вероятности возникновения коротких замыканий и коррозии проводящих элементов [3;4]

Научная новизна исследования заключается в получении экспериментальных данных о работоспособности серийных микроконтроллеров и датчиков температуры при температуре ниже официально заявленного производителем предела. Полученные результаты расширяют представление о границах применимости стандартной элементной базы в условиях арктических регионов и могут быть использованы для оптимизации проектирования и эксплуатации оборудования в экстремальных.

Материалы и методы

В рамках экспериментов был проведен анализ четырех микроконтроллеров PIC16F18855 производства компании Microchip Technology. На микроконтроллере расположена цепь полупроводниковых диодов, функционирующая по принципу зависимости прямого падения напряжения от температуры, и выполняющая функцию температурного сенсора. Цепь диодов подключается в прямом смещении, и через нее протекает стабильный ток. Падение напряжения на данном участке измеряется с помощью АЦП микроконтроллера. [5]. Выбор данных компонентов обусловлен их широкой распространенностью в промышленных приложениях, сочетанием высокой функциональности и энергоэффективности, а также необходимостью тестирования их работоспособности за пределами заявленных температурных диапазонов [6]. Данные с микроконтроллера передавались на компьютер посредством интерфейса UART и выводились на монитор компьютера в числовом значении в режиме реального времени.

Серия экспериментов проводилась в моро-

зильной камере при температуре -60°C и включала два этапа. На первом этапе микроконтроллер подвергался тестированию в стандартных условиях для оценки его работоспособности при экстремально низких температурах, включая стабильность функционирования процессора и датчиков. На втором этапе проверялась работа охлажденного оборудования с учетом возможного влияния конденсата. Один из микроконтроллеров был дополнительно защищен влагозащитной пленкой для оценки эффективности данной меры в условиях повышенной влажности.

Основной целью эксперимента являлась демонстрация эффективности влагоустойчивых технологических решений при эксплуатации в условиях экстремально низких температур

Результаты

Исследования подтвердили высокую устойчивость тестируемых микроконтроллеров и датчиков к экстремально низким температурам. В рамках эксперимента были получены следующие результаты:

1. Все четыре микроконтроллера успешно активировались при температуре -60°C как при плавном охлаждении, так и при холодном старте, что свидетельствует о высоком уровне надежности в обоих сценариях.

2. В течение 10 часов непрерывной работы при температуре -60°C ни одно из устройств не продемонстрировало критических сбоев, что подтверждает стабильность функционирования основных компонентов.

3. После проведения пяти циклов охлаждения и нагрева (от -60°C до +20°C) не было зафиксировано признаков накопления деградации, что указывает на их способность к многократному функционированию в экстремальных температурных условиях.

Обсуждение

Существующие модели описывают изменение характеристик полупроводниковых устройств при температурах ниже -40°C через зависимость подвижности носителей заряда (μ) от температуры:

$$\mu(T) \sim T^{-\frac{3}{2}} \quad (1)$$

для фононного рассеяния в кремнии, что приводит к росту сопротивления, но сохраняет функциональность до 200K без фазовых переходов. Модель Вейскольда дополняет это прогнозируя

нелинейную зависимость порогового напряжения:

$$V_{th}(T) = V_{th0} + \alpha(T - T_0) \quad (2)$$

где $\alpha > 0$, объясняя стабильность PIC16F18855 при -60°C за счет запаса прочности по напряжению.

Классическая модель Аррениуса описывает интенсивность отказов как экспоненциальную функцию от температуры. При температуре 213K член функции $e^{-E_a/kT}$ становится значительно меньше по сравнению с комнатной температурой, коэффициент снижения скорости деградации достигает 10^6 , что означает о практически полном торможении диффузии примесей и окислении контактов.

Влияние влагозащитного покрытия оказалось минимальным для кратковременных тестов, что согласуется с моделями адсорбции влаги по БЭТ, где при -60°C мономолекулярный слой конденсата не формируется из-за низкой парциальной скорости водяного пара. В реальных антарктических условиях с циклическими перепадами температур риск коррозии контактов возрастает, что делает такие покрытия необходимыми для обеспечения надежности.

Заключение

Серийные микроконтроллеры семейства PIC продемонстрировали высокую устойчивость к экстремально низким температурам. Исследования продемонстрировали возможность функционирования микроконтроллеров при температурах значительно превосходящих диапазон рабочих температур, что подтверждает гипотезу о значительном запасе прочности у исследуемых компонентов.

Различия в работе микроконтроллеров с защитным покрытием и без него оказались незначительными при кратковременном использовании. Данный факт указывает на то, что дополнительные защитные покрытия не являются обязательными для обеспечения стабильности измерений в отсутствии продолжительного воздействия экспериментальных условий на макет. Однако отсутствие защитного слоя может привести к снижению износостойкости датчиков при длительном воздействии неблагоприятных внешних факторов. Для точной оценки целесообразности применения защитных покрытий с целью повышения долговечности и устойчивости датчиков необходимо проведение дополнительных исследований.

Список литературы:

- [1] Serbin D. V., & Dmitriev A. N. *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.* — 2022. — №. 257. — С. 833-842.
- [2] Nian-Han Wu, Ming-Zhong Gao, Liang-Yu Zhu, Jia-Nan Li, Dong Fan, Bin You, Wei Luo, Guo-Dong Zhu *Pressure control method and device innovative design for deep oil in-situ exploration and coring* // *Petroleum Science.* — 2023. — №. 20. — С. 1169-1182.
- [3] Shishkin E. V., Bolshunov A. V., Timofeev I. P., Avdeev A. M., & Rakitin I. V. *Model of a walking*

sampler for research of the bottom surface in the subglacial lake vostok // Journal of Mining Institute. — 2022. — №. 257. — С. 853-864.

[4] Bolshunov A. V., Vasilev D. A., Ignatiev S. A., Dmitriev A. N., & Vasilev N. I Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air. // Led i Sneg. — 2022. — №. 62(1). — С. 35-46.

[5] Петросянц К.О., Измаил-Заде М.Р., Самбурский Л.М Особенности моделирования ВАХ JFET-транзисторов в диапазоне криогенных температур // Известия вузов. Электроника. — 2019. — №. 24. — С. 174-184.

[6] Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Альзаккар А., Низамиев М.Ф., Шумихина О.А., Вяльцев С.С. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2022. — №. 24(6). — С. 3-12.

References:

[1] Serbin D. V., & Dmitriev A. N. 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. - 2022. - No. 257. - pp. 833-842.

[2] Nian-Han Wu, Ming-Zhong Gao, Liang-Yu Zhu, Jia-Nan Li, Dong Fan, Bin You, Wei Luo, Guo-Dong Zhu Pressure control method and device innovative design for deep oil in-situ exploration and coring // Petroleum Science. - 2023. - No. 20. - pp. 1169-1182.

[3] Shishkin E. V., Bolshunov A. V., Timofeev I. P., Avdeev A. M., & Rakitin I. V. Model of a walking sampler for research of the bottom surface in the subglacial lake vostok // Journal of Mining Institute. - 2022. - No. 257. - pp. 853-864.

[4] Bolshunov A. V., Vasilev D. A., Ignatiev S. A., Dmitriev A. N., & Vasilev N. I Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air. // Led i Snow. - 2022. - No. 62(1). — P. 35-46.

[5] Petrosyants K.O., Izmail-Zade M.R., Sambursky L.M. Features of modeling the I-V characteristics of JFET transistors in the cryogenic temperature range // News of higher education institutions. Electronics. - 2019. - No. 24. - P. 174-184.

[6] Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Alzakkar A., Nizamiyev M.F., Shumikhina O.A., Vyal'tsev S.S. Forecasting and analysis of electricity consumption and losses at industrial facilities. // News of higher education institutions. Problems of energy. - 2022. - No. 24(6). - P. 3-12.





ЮРКОМПАНИ
www.law-books.ru

Юридическое издательство «ЮРКОМПАНИ»
издает научные журналы:

- Научно-правовой журнал «Образование и право», рекомендованный ВАК Министерства науки и высшего образования России (специальности 12.00.01, 12.00.02), выходит 1 раз в месяц.
- Научно-правовой журнал «Право и жизнь», рецензируемый (РИНЦ, E-Library), выходит 1 раз в 3 месяца.