

СИСТЕМА ПОДДЕРЖАНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ

Н. Н. Веденеев, Д. В. Грачев, Ф. К. Киселев, М. А. Корочкин, О. С. Кротова, М. С. Миронов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Надежность ядерных энергетических установок, срок активного существования космических аппаратов напрямую связаны с характеристиками стойкости применяемой электронной компонентной базы (ЭКБ) и приборов на ее основе к ионизирующим излучениям (ИИ). За последние десятилетия электронные узлы и компоненты военной, космической и других видов техники претерпели качественные изменения, связанные с ростом их функциональной сложности и использованием микросхем высокой степени интеграции. Проведенные к настоящему времени исследования выявили существенную зависимость показателей радиационной стойкости электронной аппаратуры и ее компонентов от их режима работы и условий эксплуатации. Данные условия прописываются в нормативной документации и технических условиях. Для большинства изделий ЭКБ диапазон рабочих температур составляет от -60°C до 125°C . Так как изменение температуры существенно влияет на подвижность носителей заряда [1], время жизни носителей заряда, отжиг радиационных эффектов, то стойкость приборов и ЭКБ должна подтверждаться в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации. Также актуальны исследования механизмов накопления и отжига радиационно-стимулированных зарядовых состояний в окислах и на границах раздела окисел – полупроводник (поверхностные состояния) микросхем при различных температурных воздействиях.

Зависимость показателей радиационной стойкости ЭКБ и аппаратуры от температурных режимов привело к необходимости разработки системы, обеспечивающей проведение радиационных исследований и испытаний в широком диапазоне температур. Существующие на сегодняшний день климатические камеры не позволяют работать в условиях воздействия ИИ, поскольку при испытаниях система управления камер находится в зоне воздействия ИИ, что влияет на ее функционирование и приводит к катастрофическому отказу. Целью данной работы стала разработка радиационно-стойкой системы поддержания и контроля температуры (СПиКТ) для проведения испытаний на радиационную стойкость ЭКБ и исследований свойств полупроводниковых материалов в условиях комплексного воздействия ИИ и температуры.

Описание и принцип работы СПиКТ

Система состоит из экспериментальной камеры объемом 6 л (термостабилизируемый бокс) с креплениями для объектов испытаний, системы термостатирования с нагревательными и охлаждающими элементами, кабельными линиями и датчиками температуры, автоматизированного рабочего места (АРМ) на базе компьютера со специализированным программным обеспечением, источниками питания и измерительными модулями. Особенность системы заключается в том, что все управляющие элементы, АРМ и измерительные модули с помощью кабельных линий вынесены из зоны воздействия ИИ, а в экспериментальном зале располагаются только термостабилизируемый бокс камеры и система регулировки температуры, не чувствительные к воздействию ИИ.

Структурная схема СПиКТ представлена на рис. 1. На рис. оснастка СПиКТ 1 состоит из термостабилизируемого бокса и системы термостатирования с нагревательными и охлаждающими элементами, кабельными линиями и датчиками температуры. На рис. 2 приведен эскиз оснастки для СПиКТ. Образцы ЭКБ располагаются в термостабилизируемом боксе 1 объемом 6 литров. Бокс устанавливается на стальную раму 2, на которой закрепляется система трубопроводов с шаровыми кранами, сопловыми герметичными хомутовыми нагревателями 3 и термовоздуховодкой 4, а также сосуд Дьюара LD5 5 и баллон для азота 5л-200У 6. Охлаждение экспериментального объема термостабилизируемого бокса обеспечивается регулируемым испарением жидкого азота, а нагревание – прокачкой воздуха через сопловые нагреватели.

В соответствии с нормативными документами при проведении радиационных испытаний при пониженных температурах не допускается образования влаги и инея (проводящих элементов) в рабочем объеме и на испытуемом объекте. Баллон со сжатым азотом 5л-200У предназначен для предварительной продувки внутреннего объема бокса перед его заполнением парами азота с температурой ниже 15°C для предотвращения образования инея. Регулировка расхода азота производится с помощью редуктора А-30-КР1-М.

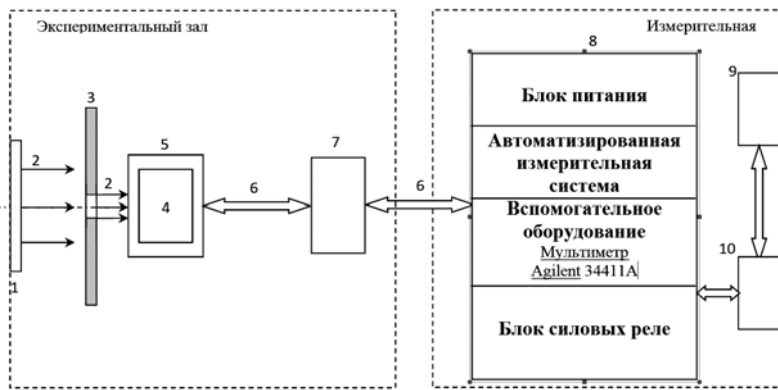


Рис. 1. Структурная схема СПиКТ: 1 – источник ИИ; 2 – ИИ; 3 – коллиматор; 4 – испытуемый объект; 5 – оснастка СПиКТ; 6 – комплект кабелей и разъемов: термопарные кабели – 8 шт., сигнальный кабель типа «витая пара», силовые линии питания нагревателя; 7 – панель коммутации для кабельных соединений; 8 – контрольно-измерительная аппаратура; 9 – система мониторов; 10 – компьютер

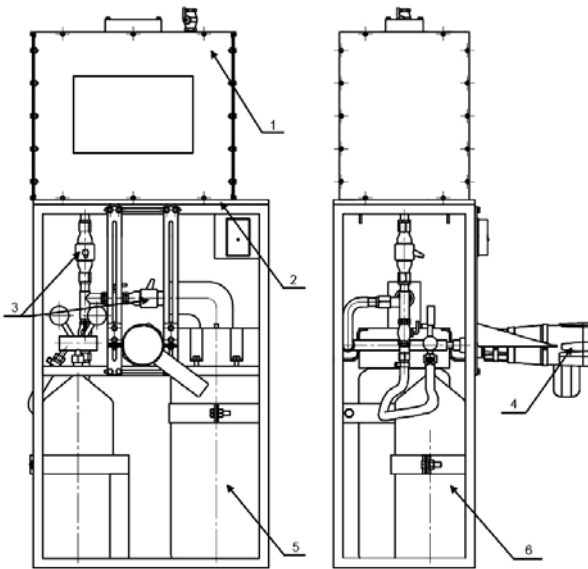


Рис. 2. Оснастка для системы поддержания и контроля температуры: 1 – термостабилизируемый бокс; 2 – силовая рама; 3 – сопловые герметичные хомутовые нагреватели; 4 – термовоздуховка Steinel; 5 – сосуд Дьюара LD5; 6 – баллон для азота 5л-200У

На рис. 3 приведена система трубопроводов системы поддержания и контроля температуры с кранами и потоковыми нагревателями.

Для создания температуры в боксе в диапазоне от -60°C до температуры помещения используется магистраль с жидким азотом. В этом режиме кран 3 открыт, а краны 4 и 5 перекрыты. Начальная температура паров жидкого азота в сосуде Дьюара -195°C . Регулировка расхода жидкого азота производится путем изменения электрической мощности, подаваемой к нагревателю 6. Величина сопротивления нагревателя 12,7 Ом. Контроль нижнего уровня азота осуществляется с помощью двух термопар. Первая термопара (поз. 7) предназначена для контроля уровня жидкого азота и подачи сигнала на отключение нихромового нагревателя. Вторая термопара распо-

лагается на 5 см выше первой и предназначена для предупреждения о критически низком уровне азота, сигнализируя о необходимости своевременно добавить жидкий азот в систему без отключения нагревающего элемента испарителя. Добавление азота в сосуд Дьюара производится через специальное заливное отверстие. Отключение нагревателя и срабатывание сигнализации низкого уровня азота происходит в автоматическом режиме, сообщение о низком уровне жидкого азота выводится с помощью специализированного программного обеспечения (ПО) на экран компьютера.

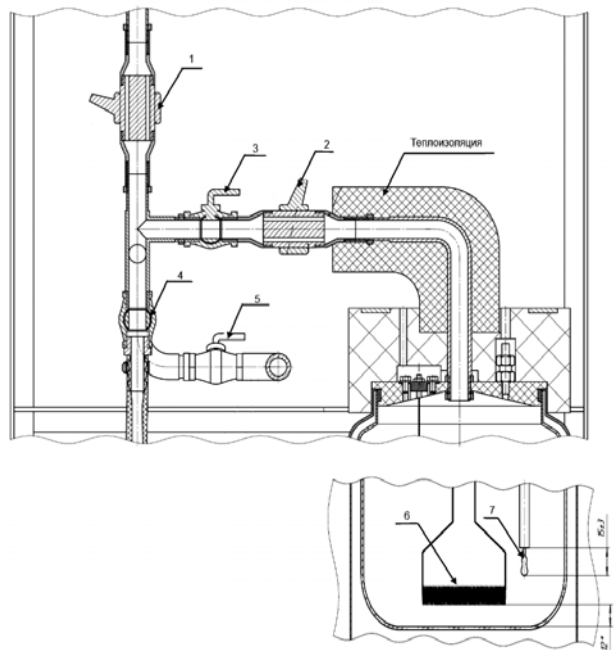


Рис. 3. Система трубопроводов системы поддержания и контроля температуры: 1, 2 – сопловые герметичные хомутовые нагреватели; 3, 4, 5 – кран шаровый; 6 – нихромовый нагреватель; 7 – термопара

Для создания температуры в боксе в диапазоне от температуры в помещении ($18-23^{\circ}\text{C}$) до 125°C

используется магистраль с термовоздуходувкой. В этом режиме кран 5 открыт, а краны 3 и 4 перекрыты. Начальная температура воздуха, подаваемого термовоздуходувкой, не превышает 230 °С, но может быть кратковременно повышена для ускорения выхода на стационарный режим поддержания температуры.

При разработке конструкции системы поддержания и контроля температуры для подтверждения правильности выбранных решений были выполнены теплофизические расчеты. Расчеты выполнялись в приложении Flow Simulation к CAD-продукту SolidWorks [2]. Для выполнения расчетов построена модель СПиКТ. При выполнении расчетов проведена оценка рабочих параметров камеры в диапазоне температур от плюс 125 °С до –60 °С при изменении потока газа (азота), проходящего через теплообменники, и в зависимости от мощности потоковых нагревателей, установленных на теплообменниках. Мощность нагревателей изменялась от 30 до 105 Вт. Скорость потока газообразного азота менялась за счет изменения массового расхода жидкого азота. Расход жидкого азота задавался от 0,1 до 0,3 г/с. Температура жидкого азота принята равной –195°С. На рис. 4 показана часть расчетной модели (теплообменник) с результатом проведения одной итерации расчета со следующими

параметрами: расход жидкого азота 0,1 г/с, мощность поточного нагревателя 30 Вт.

Для дополнительного нагрева воздуха, подаваемого термовоздуходувкой, предусмотрены сопловые герметичные хомутовые нагреватели типа Z.11 (поз. 1 и 2 рис. 3), предназначенные для увеличения скорости изменения температуры в рабочем объеме бокса и уменьшения времени выхода на термостатированный режим.

На рис. 5 представлен термостабилизируемый бокс, который состоит из внутренней и внешней камер. Внутренняя термоизолированная камера объемом 6 л имеет крепления для образцов и систему рассеивания поступающего воздуха или азота. Внешняя камера предназначена для механической защиты теплоизоляции и крепления панелей с разъемами типа CP-50: 4 на верхней панели и 21 на боковой панели. Впускное окно бокса не закрывается теплоизоляцией и имеет крепеж для сменных конверторов ИИИ различной толщины и состава. В пробных экспериментах термостабилизируемый бокс имел впускное окно для прохождения ИИИ из стали толщиной 4 мм. Вид оснастки СПиКТ со снятым впускным окном представлен на рис. 6.

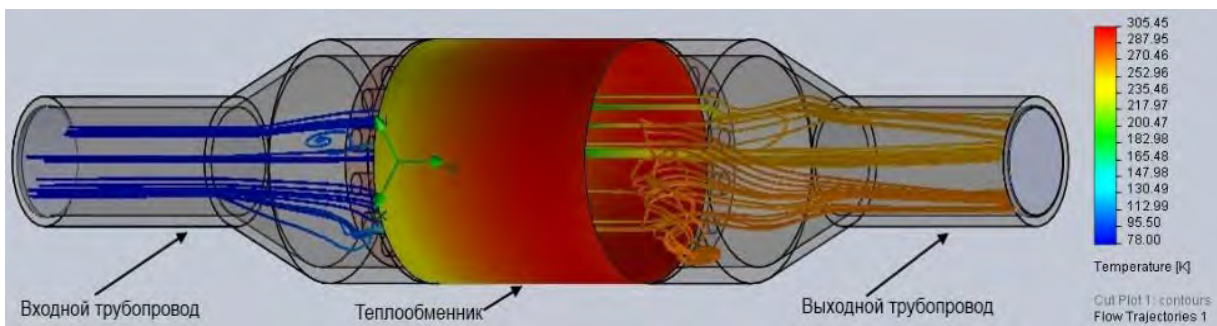


Рис. 4. Теплообменник

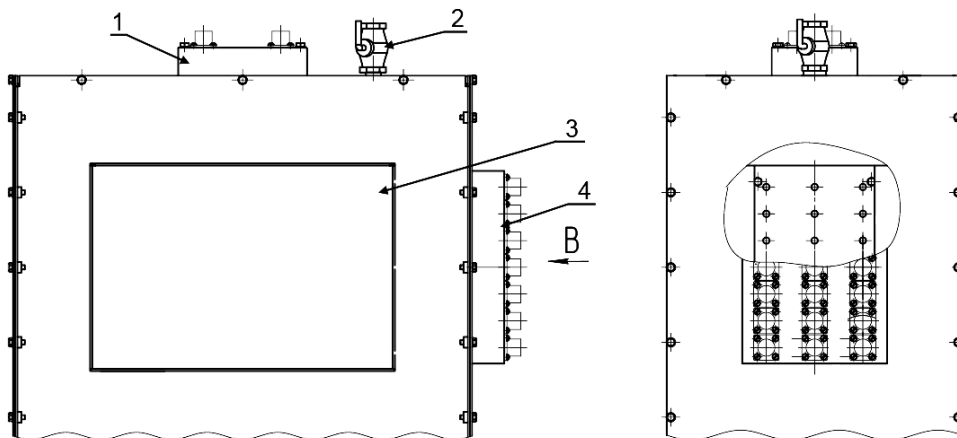


Рис. 5. Термостабилизируемый бокс: 1 – верхняя панель разъемов; 2 – выпускной клапан; 3 – впускное окно; 4 – боковая панель разъемов

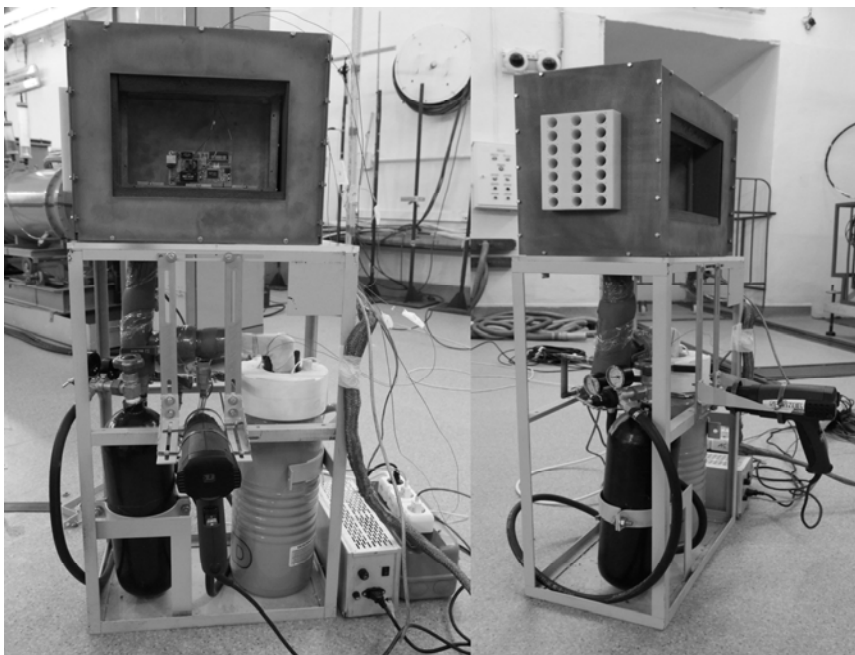


Рис. 6. Оснастка СПиКТ со снятым выпускным окном

Электрическая схема системы поддержания и контроля температуры представлена на рис. 7. Измерение температуры в контрольной точке термостатированного бокса проводится с помощью ХК-термопары по «0»-каналу 8-ми канального аналогового измерительного модуля i7018P [3]. Если требуемая температура выше температуры испытательного объема с помощью модуля i7063D [4] замыкается цепь реле К1 и включается термовоздуходувка, нагнетающая горячий воздух во внутреннюю камеру термостатированного бокса. При достижении требуемой температуры модуль i7063D выключает реле

термовоздуходувки. Если требуемая температура ниже температуры испытательного объема с помощью модуля i7063D замыкается цепь реле К2 и включается нихромовый нагреватель в сосуде Дьюара, что приводит к интенсивному выбросу азота во внутреннюю камеру термостатированного бокса. При достижении требуемой температуры i7063D выключает реле нихромового нагревателя. С помощью i7063D можно включить через реле К3 сопловые герметичные хомутовые нагреватели, что позволяет ускорять процесс прогрева внутренней камеры термостатированного бокса.

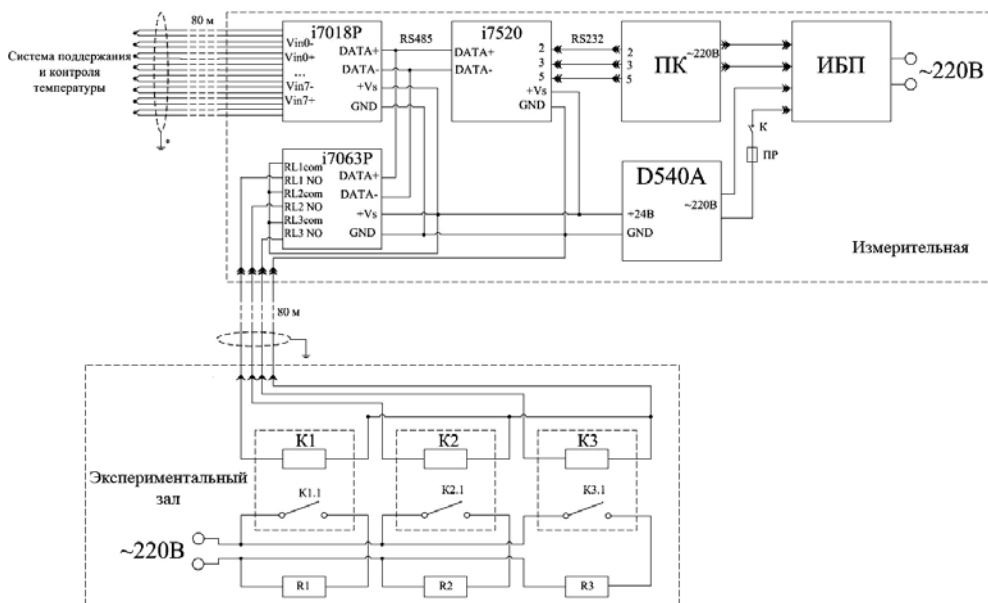


Рис. 7. Упрощенная электрическая схема СПиКТ: ИБП – источник бесперебойного питания; ПК – персональный компьютер; D540A – источник питания 24 В; i7520 – конвертер интерфейсов RS232/485; i7018P – модуль аналогового ввода; i7063D – модуль ввода/вывода; К1, К2, К3 – реле МКУ48-С; R1, R1, R3 – нагреватели

Контроль уровня жидкого азота осуществляется по показаниям термопары «7»-канала. При резком повышении температуры модуль i7063D должен отключать реле нихромового нагревателя в сосуде Дьюара, предотвращая его перегрев.

Управление модулями СПиКТ осуществляется с помощью компьютера из состава автоматизированного рабочего места (АРМ) со специализированным программным обеспечением (ПО) по последовательному интерфейсу RS232. Модули серии i7000 не поддерживают RS232 непосредственно, поэтому в схеме предусмотрен автоматически настраиваемый преобразователь интерфейсов RS232/RS485 – i7520 [5]. Специализированное ПО СПиКТ с закрытым кодом построено на основе свободно распространяемого производителем модулей серии i7000 ActiveX компонента DCON_X (www.icpdas.com) на языке программирования Object Pascal [6], разработанном компанией Borland, для операционной системы MS Windows XP, Windows 7, Windows 8 и Windows 8.1 с 32х или 64х битной архитектурой.

Главное окно программы, имеющей стандартный, интуитивно-понятный интерфейс (SDI), представлено на рис. 8. Верхнюю часть окна программы занимает автоматически масштабируемый график зависимости температур, регистрируемых с помощью i7018P, и требуемой температуры от времени. В нижнем левом углу главного окна программы в разделе «Общие настройки» расположены органы

«Дополнительно» расположены органы задания требуемой температуры, температуры помещения, сигнализатор уровня жидкого азота и периода опроса измерительного модуля i7018P. С помощью кнопки «Поиск» проводится инициализация начального состояния модулей i7018P и i7063D, кнопкой «Пуск» – запуск и остановка считывания значений температуры включенных измерительных каналов и вывод информации в виде графика зависимости этих температур от времени на экран и в файл автоматически создаваемого протокола, кнопкой «Сохранить» – сохранение считанных данных в текстовый файл типа Comma Separated Values (*.csv). Кнопки «О программе» и «Выход» выполняют стандартные для SDI функции. В нижней полосе программы показываются данные о работе модулей: наличие связи, температура холодных спаев термопар, время регистрации температуры, текущее время.

Испытания СПиКТ

Испытания проводились с целью проверки работоспособности СПиКТ, а также для определения точности поддержания температуры для крайних значений диапазона температур -50°C и 120°C .

Характеристики СПиКТ проверены экспериментально в условиях воздействия ИИ установок комплекса «Пульсар» [7]. Оснастка СПиКТ была размещена в экспериментальном зале ОК «Пульсар»

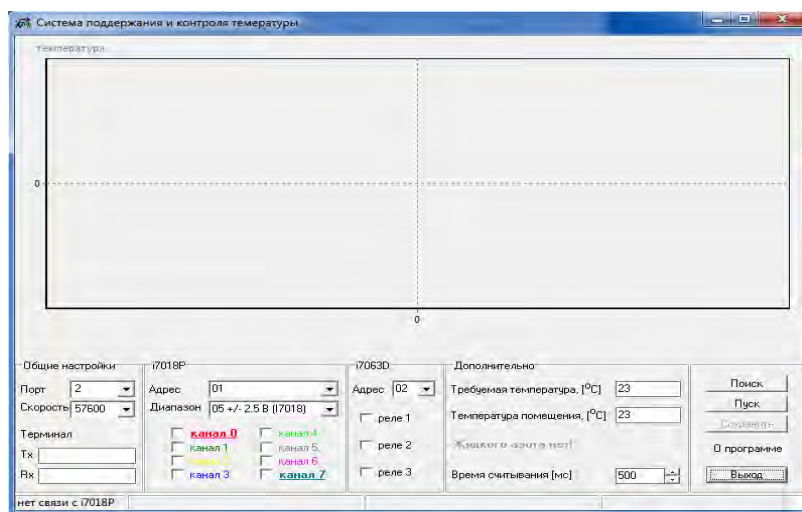


Рис. 8. Интерфейс специализированного ПО

настройки последовательного порта компьютера: адрес порта, скорость порта и строчный терминал последовательного порта. В разделе «i7018P» находятся настройки измерительного модуля i7018P: адрес устройства, диапазон измерений и включение или отключение измерительных каналов. В разделе «i7063D» находятся настройки измерительного модуля i7063D: адрес устройства и включение или отключение релейных выходов. Другие настройки модулей могут быть осуществлены с помощью DCON-Utility, разработанной ICPDAS CO, Ltd. В разделе

и с помощью 80 м экранированного жгута кабелей состыкована с АРМ, размещённым в «измерительной» ОК «Пульсар». Силовая, релейная часть СПиКТ и АРМ подключались непосредственно к сети общего питания 220 В.

Во внутреннюю камеру термостабизируемого бокса была установлена типовая плата с ЭКБ. Горячий спай термопары «0»-канала был закреплен на поверхности ЭКБ. Горячие спаи двух других термопар были закреплены в произвольных местах платы. В сосуд Дьюара был залит жидкий азот. После

запуска программы выставлена требуемая температура $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Контрольная температура в точке в термостабилизируемом боксе установилась за 40 минут и автоматически поддерживалась в течение 2-х часов. На рис. 9 представлены показания термопар при измерениях. Красным цветом на графике указана внешняя температура бокса. Броски значений температуры связаны с наличием электромагнитных помех экспериментальном зале. Оранжевым цветом обозначена установившаяся температура в контрольной точке. Желтым и зеленым цветом обозначены температуры на образце платы в термостабилизируемом боксе. Бирюзовым цветом на графике обозначена температура в сосуде Дьюара. Видно, что после 100 минут работы уровень жидкого азота снизился до критического.

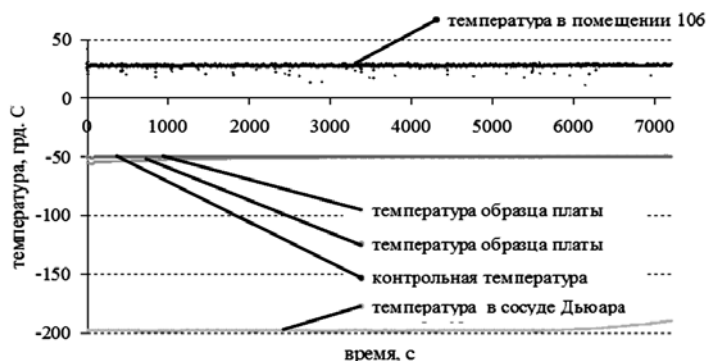


Рис. 9. Показания термопар при измерениях

На рис. 10 представлены результаты измерения контрольной температуры. Температура в течение 2-х часов поддерживалась на уровне $-49,98 \pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$.

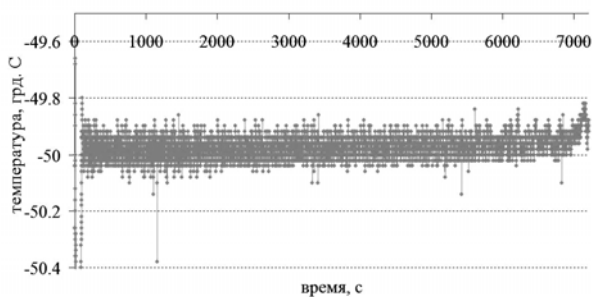


Рис. 10. Измерения контрольной температуры $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Аналогичные эксперименты проведены для температуры $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выход на режим составил 1 час. Установившаяся температура в контрольной точке в течение 2-х часов составляла $119,99 \pm 0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис. 11 представлены результаты измерения контрольной температуры $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На следующем этапе проверки работоспособности СПиКТ были проведены испытания в условиях облучения на установке ЛИУ-30 [8]. В рабочем объеме камеры располагалась печатная плата, имити-

рующая реальный объект испытаний. Термопара располагалась непосредственно на плате. На рис. 12 приведены показания температуры печатной платы при работе СПиКТ во время рабочего импульса установки ЛИУ-30. Рабочая температура в камере составляла $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. На впускном окне располагался стальной фильтр толщиной 1 мм. Уровень экспозиционной дозы на переднем фланце впускного окна составил 1,5 кР. Измерения дозы внутри рабочего объема камеры не проводилось, так как температура внутри превышала рабочую температуру детекторов.

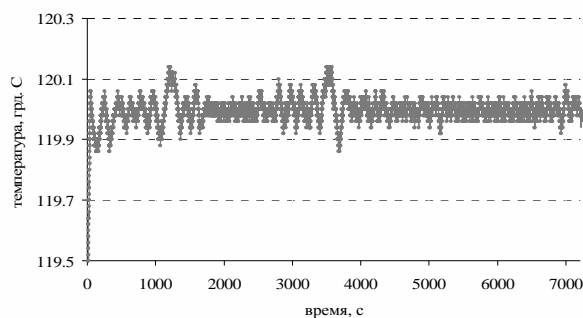


Рис. 11. Измерения контрольной температуры $120\text{ }^{\circ}\text{C}$

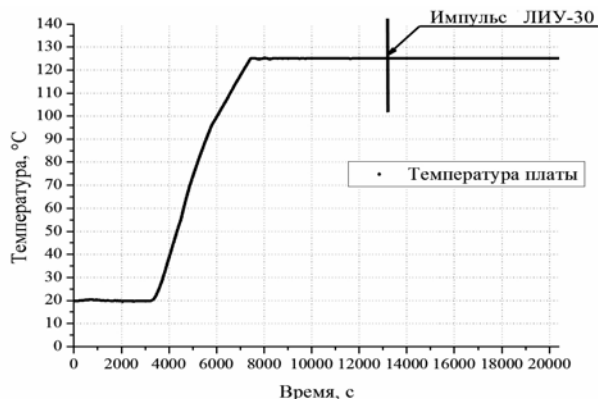


Рис. 12. Температура печатной платы в рабочем объеме СПиКТ при воздействии И И ЛИУ-30

Заключение

Во ВНИИЭФ создана радиационнотойкая система поддержания и контроля температуры для исследований и испытаний ЭКБ и малогабаритных приборов в условиях воздействия импульсного гамма-излучения.

Экспериментально подтверждена работоспособность СПиКТ по заданию и поддержанию температур в диапазоне от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $125\text{ }^{\circ}\text{C}$

Литература

1. Модель космоса: Научно-информационное издание: В 2 т. /Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. – Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – М.: КДУ, 2007. С. 1144.

2. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. – СПб.: Питер, 2005 г. С. 768.

3. I-7017/18/19, M-7017/18/19 User's Manual, Rev: B1.3 7PH-020-B13.

4. I-7000 DIO Manual Rev: B1.3.

5. 7000 Bus Converter User's Manual (Version 1.8 Jan/2006, 7PH-006-10).

6. Миллер, Тодд, Пауэл, Дэвид и др. Использование Delphi 3. Специальное издание. :Пер. с англ. – К. :Диалектика, 1997. С. 768. – Парал. Тит. Англ.

7. Пунин В. Т., Савченко В. А., Завьялов Н. В. и др. Мощные линейные индукционные ускорители электронов и облучательные комплексы на их основе для радиационных исследований // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров. Вып. 1. 2001. С. 356–363.

8. Павловский А. И., Босамыкин В. С., Герасимов А. И. и др. Мощный линейный импульсный ускоритель пучка электронов на радиальных линиях ЛИУ-30 // ПТЭ. 1998. № 2. С. 13–25.