

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ  
ПРЕЦИЗИОННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
ДЛЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

О. И. Ровняков<sup>✉</sup>, К. А. Дюжев, К. В. Ануфрейчик

Институт космических исследований РАН  
г. Москва, Российская Федерация

*Задача большинства научных приборов на космическом аппарате – выполнение измерений. Источник опорного напряжения – один из основных элементов измерительной системы, от которого зависит её точность. Во время штатной эксплуатации прибора опорное напряжение подвержено температурным изменениям, которые в отличие от начальной погрешности не могут быть устранены наземной калибровкой. Экспериментально исследована работа источника ISL21090B-50 в типичном рабочем диапазоне температур космической аппаратуры, определены его интегральный и дифференциальный температурные коэффициенты и тепловой гистерезис, сделаны выводы о теоретически достижимом разрешении прецизионной измерительной системы на основе данной микросхемы и описаны способы его повышения. Показана принципиальная возможность повышения разрешающей способности измерительных систем на основе опорных источников с линейной зависимостью напряжения от температуры путём введения математической поправки в результаты измерений на основе данных о фактической температуре опорного элемента. Экспериментально в климатической камере исследована работа радиационно-стойких интегральных термодатчиков 5306НТ025 для их применения в качестве внутренних телеметрических датчиков в перспективных научных приборах, получены зависимости их погрешности от температуры. Приводится пример компенсации температурного дрейфа микросхемы ISL21090B-50 на основе показаний термодатчиков.*

*Ключевые слова:* источник опорного напряжения, ИОН, АЦП, тепловой гистерезис, датчик температуры, бандгап, научное оборудование космического аппарата.

*Поступила в редакцию: 11.11.2025. Принята к печати: 28.11.2025.*

## Введение

Большинство научных приборов, составляющих полезную нагрузку современных космических аппаратов (КА), представляют собой измерительные системы (ИС). Практически каждый такой прибор можно функционально разделить на две части: датчики и остальную электронику, которые конструктивно могут быть объединены в моноблок либо реализованы в виде разных блоков (блок датчиков БД и блок электроники БЭ), например, когда требуется установка датчиков на выносной штанге, чтобы в их поле зрения не попадали элементы конструкции КА.

Особенности конструкции и схемотехники датчиков для измерений характеристик космической плазмы рассмотрены в [1], однако параметры ИС, как правило, в неменьшей степени зависят и от качества остальных её элементов – аналого-цифрового преобразователя (АЦП), источника опорного напряжения (ИОН), промежуточных аналоговых каскадов, качества электропитания и т.д.

На рисунке 1 упрощённо изображена функциональная схема прецизионной ИС для перспективных бортовых приборов в варианте с раздельными блоками датчиков и электроники. Сигнал от датчика, например от Зонда Ленгмюра [1], поступает на усилитель датчика У1, выполняющий функцию масштабирования и буферизации сигнала, а также зачастую преобразующий несимметричный вход-

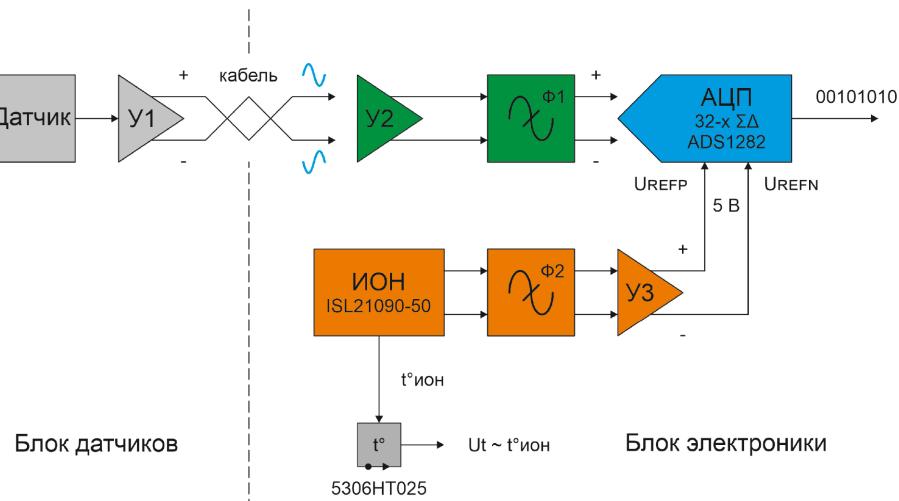


Рисунок 1. Функциональная схема прецизионной измерительной системы

ной сигнал в симметричный выходной. В последнем случае  $Y_1$  выполняет роль не просто буфера, а драйвера дифференциальной линии, имеющей повышенную устойчивость к помехам. По кабелю сигнал передаётся с выхода БД на вход БЭ. Тот же принцип может быть реализован и в моноблоке, например, если электроника датчиков и АЦП находятся в разных узлах (на разных печатных платах). Входной сигнал БЭ буферизуется усилителем  $Y_2$  и через антиалайзинговый (anti-aliasing) фильтр  $\Phi_1$  поступает на вход АЦП – у современных микросхем АЦП высокой разрядности, в том числе у показанного на схеме ADS1282 [2], он, как правило, дифференциальный. Помимо измерительного входа высокоразрядные АЦП обычно имеют вход для подключения внешнего источника опорного напряжения ( $U_{REFP}$ ,  $U_{REFN}$ ), тоже дифференциальный. Напряжение ИОН – в нашем макете это прецизионный ISL21090B-50 [3] – поступает на вход АЦП не напрямую, а через фильтр низкой частоты  $\Phi_2$ , ограничивающий полосу частот шума ИОН, и буферный каскад  $Y_3$  на операционном усилителе. Также на схеме показан интегральный термодатчик 5306HT025, речь о нём пойдёт ниже.

Одним из основных факторов, диктующих специфические требования к бортовой аппаратуре в сравнении с «наземными» устройствами, является довольно широкий температурный диапазон: температура термостабилизированной платы (ТСП) космического аппарата обычно гарантируется в лучшем случае в диапазоне от  $-20$  до  $+40$   $^{\circ}\text{C}$  (для выносных элементов конструкции КА диапазон может быть гораздо шире) [1]. При этом из-за тепловыделения на электронных компонентах верхний предел температуры внутри БЭ может достигать  $75$   $^{\circ}\text{C}$  и выше.

Все перечисленные элементы блока электроники влияют на точность и стабильность измерительной системы, однако в разной степени. Усилители  $Y_1$  –  $Y_3$  и фильтры  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , как пра-

вило, выполняются на операционных усилителях (ОУ), начальное напряжение смещения которых компенсируется калибровкой, а его изменения с температурой – выбором ОУ с малым или даже оклонулевым (zero-drift amplifiers) дрейфом [4]. Антиалайзинговый фильтр  $\Phi_1$  и фильтр ИОН  $\Phi_2$  зачастую вообще делаются пассивными и не смещают напряжение сами по себе – в этом случае нужно позаботиться только об отсутствии значительных смещений, создаваемых протекающими через них токами. АЦП является важнейшей частью измерительной системы, однако его начальное смещение по постоянному току и погрешность коэффициента усиления  $K_U$  внутреннего усилителя, а также их дрейф сводятся к минимуму калибровкой на земле и периодической автокалибровкой в полёте. Для АЦП ADS1282 типичное начальное смещение будет около  $50$  мкВ или  $10$  ppm (part per million, миллионных долей) для полной шкалы входного сигнала  $0\dots+5$  В, после калибровки уменьшается до  $1$  мкВ ( $0,2$  ppm), а его температурный дрейф равен  $0,02$  мкВ /  $^{\circ}\text{C}$  ( $0,004$  ppm /  $^{\circ}\text{C}$ ). Типичная начальная погрешность коэффициента усиления составляет  $-1$  %, температурный дрейф – около  $2$  ppm /  $^{\circ}\text{C}$  при  $K_U = 1$ , но после калибровки суммарная погрешность усиления уменьшается примерно до  $2$  ppm [2].

Элементом измерительной системы, который во многом определяет реально достижимую точность измерений, является источник опорного напряжения. ИОН может быть откалиброван на земле с желаемой точностью, но в полёте его температурный дрейф нельзя устраниить автокалибровкой, как в случае с АЦП, поскольку для этого всегда требуется ещё один ИОН – образцовый.

Целью работы является экспериментальная оценка влияния температурного дрейфа прецизионного ИОН ISL21090B-50 в рабочем диапазоне температур КА на теоретически достижимое разрешение измерительной системы для пер-

спективных научных приборов, а также экспериментальная проверка точности современных интегральных термодатчиков 5306HT025 для их применения в роли внутренних телеметрических датчиков в бортовой аппаратуре.

## 1. Эксперимент с ИОН

Исследование проводилось на макете блока электроники (без датчиков), функциональная схема которого соответствует изображённой на рисунке 1. Внешний вид платы макета представлен на рисунке 2.

Микросхема ISL21090B-50 – прецизионный ИОН на основе ширины запрещённой зоны, или так называемый бандгап [5] – расположена в центре платы. Выходное напряжение – 5 В, начальная точность  $\pm 0,025\%$ , температурный коэффициент напряжения (ТКН) не более 7 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ , рабочая

температура от  $-40$  до  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Этот опорный источник близок по параметрам к лучшим отечественным ИОН специального назначения, таким как 1380ЕС065, и рассматривался нами как их более доступный функциональный аналог, подходящий для макетирования и создания технологических образцов приборов.

Схема эксперимента показана на рисунке 3. Для нагрева платы с ИОН обдувалась термофоном с регулировкой температуры – меняя температуру и располагая фен ближе к плате или дальше от неё, можно добиться нужной температуры ИОН. Для охлаждения использовался аэрозольный охладитель со сжиженным газом. Плата обдувалась с нижней стороны для более равномерного и плавного воздействия на микросхему. Сама микросхема была при этом сверху закрыта толстым слоем поролона в качестве теплового барьера для увеличения тепловой инерции.

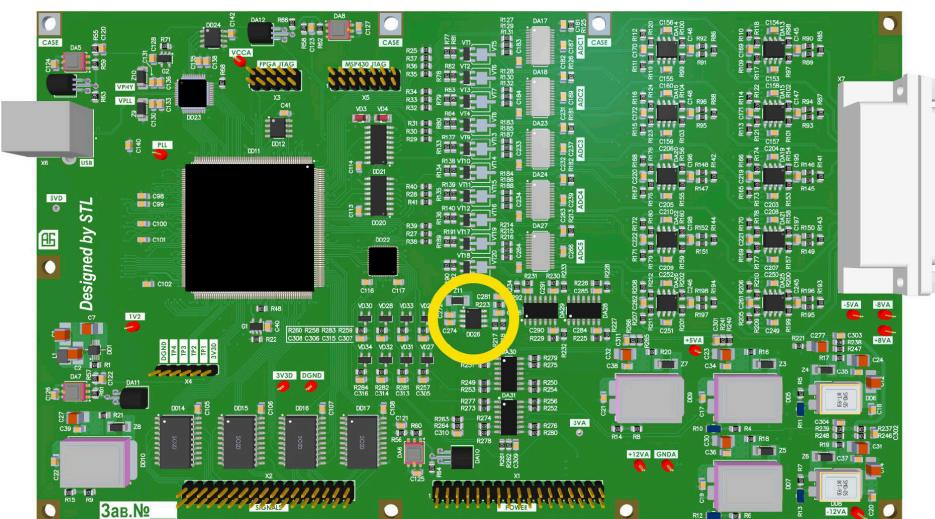


Рисунок 2. Внешний вид макетной платы, ИОН в центре

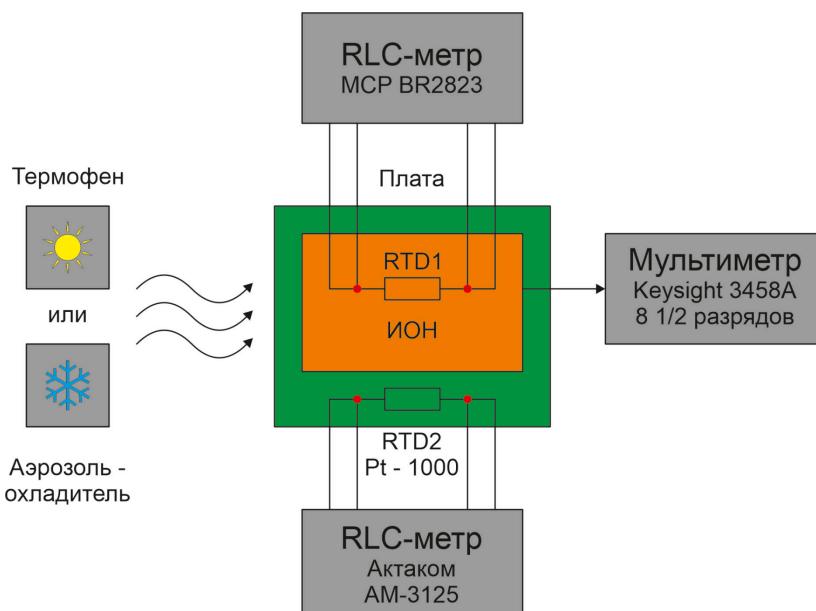


Рисунок 3. Схема измерения дрейфа ИОН

Контроль температуры осуществлялся с помощью двух платиновых терморезисторов (RTD) со сопротивлением по 1 кОм (Pt-1000): один приклеен к корпусу микросхемы, а второй – к печатной плате в непосредственной близости от микросхемы (рисунок 4). Сопротивление RTD терморезисторов контролировалось двумя RLC-метрами, и в дальнейшем их показания усреднялись. Отслеживаемые изменения напряжения ИОН были крайне малы (максимальное отклонение от начального значения менее 3 мВ за весь эксперимент), поэтому измерение осуществлялось прецизионным мультиметром Keysight 3458A, 8,5 разрядов (рисунок 5).

Эксперимент проходил в три этапа: нагревание феном от комнатной температуры до 92,6 °C, естественное остывание до комнат-

ной температуры и последующее охлаждение аэрозолем до –30,5 °C с дальнейшим естественным нагревом снова до комнатной температуры. Соответствующий этим изменениям температуры дрейф напряжения ИОН показан на рисунке 6.

Первое, что бросается в глаза, – гистерезис напряжения, который никак не нормируется производителем и вообще не упоминается в спецификации. Тепловым гистерезисом называют изменение напряжения ИОН в сравнении с начальным значением после прохождения микросхемой цикла нагрева и охлаждения с возвратом к исходной температуре. Причина этого явления – механические напряжения, возникающие в кристалле ИОН с изменениями температуры из-за неодинаковых коэффициентов теплового расширения кристал-

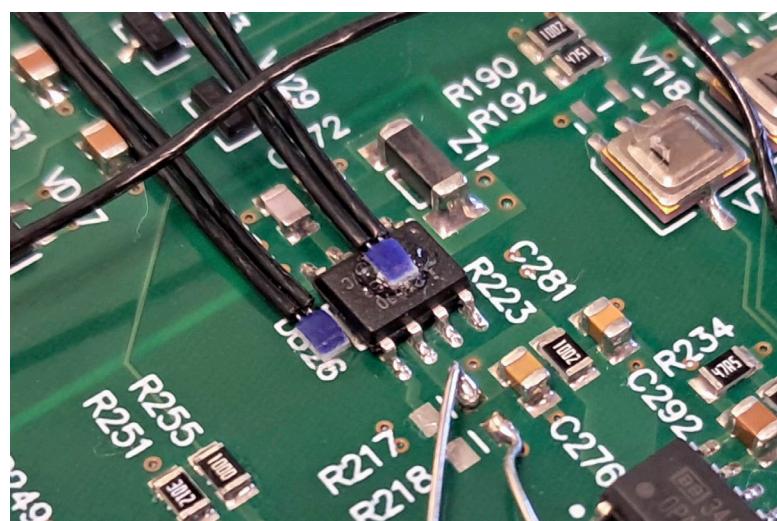


Рисунок 4. Контроль температуры ИОН с помощью миниатюрных RTD

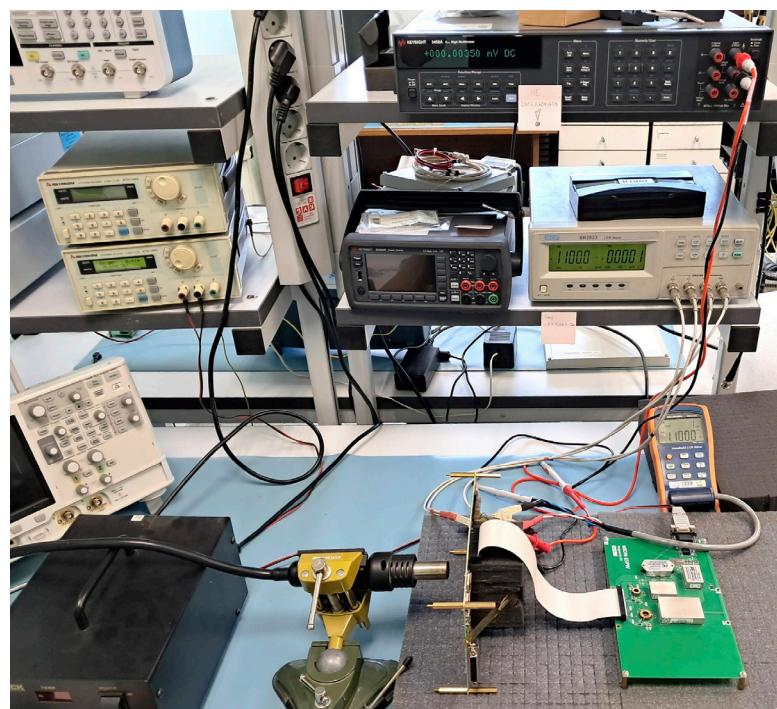


Рисунок 5. Общий вид эксперимента в лаборатории

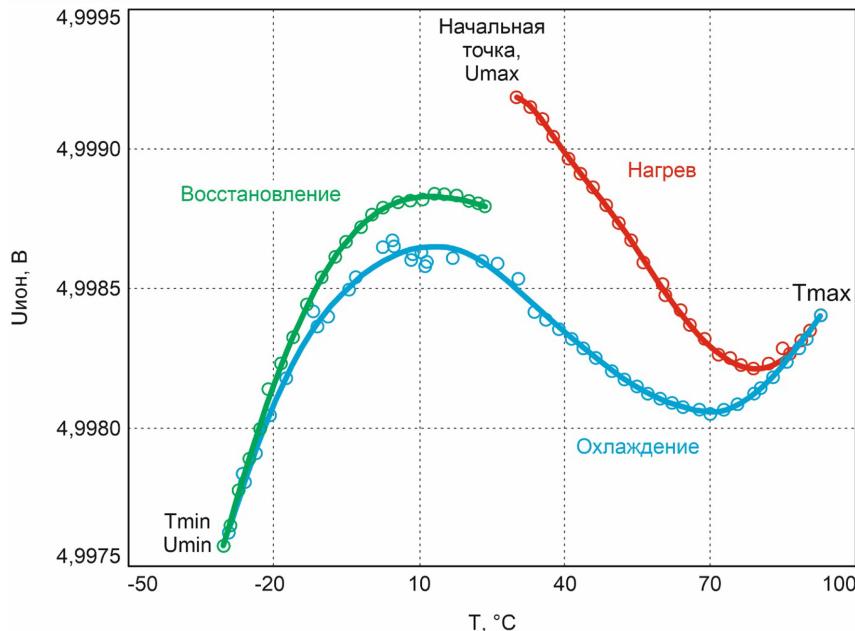


Рисунок 6. Температурный дрейф ИОН ISL21090B-50

ла, корпуса микросхемы и материала печатной платы, и сохраняющиеся после возврата температуры к начальному значению [6; 7]. Приведённые в спецификации [3] кривые  $U_{\text{ион}}(T)$ , очевидно, сняты при прогоне температуры лишь в одном направлении – это создаёт иллюзию того, что гистерезис отсутствует или, по крайней мере, настолько мал, что им можно пренебречь.

Определим «интегральный» температурный коэффициент напряжения (1) методом «коробка» или «box method» [5] – именно так определяет его производитель. Также построим зависимость дифференциального коэффициента напряжения (2) от температуры (рисунок 7).

$$\alpha_{\text{инт}} = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} \cdot \frac{10^6}{5 \text{ В}} = 2,6 \text{ ppm/}^{\circ}\text{C}. \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{диф}} = \frac{dU(T)}{dT} \cdot \frac{10^6}{5 \text{ В}}. \quad (2)$$

Полученное значение  $\alpha_{\text{инт}} = 2,6 \text{ ppm/}^{\circ}\text{C}$  меньше гарантированного спецификацией значения – не более 7 ppm/°C, хотя такое сравнение не совсем корректно, так как производитель определяет  $\alpha_{\text{инт}}$  по предельным значениям  $U_{\text{ион}}$  во всём рабочем диапазоне температур, от  $-40$  до  $+125$  °C. Отметим, что локальная величина дифференциального температурного коэффициента при этом может быть гораздо больше: например, на участках охлаждения и восстановления в точке  $-30,5$  °C он достигает 10,5 и 12 ppm/°C соответственно (рисунок 7). Это лишний раз подтверждает, что для применения конкретного ИОН в разработках важно не просто учитывать его параметры из спецификации, но и уточнять, как именно производитель определяет тот или иной параметр.

Изобразим относительные изменения напряжения ИОН, нормированные к начальной точке, предполагая, что в ней проведена наземная калибровка измерительной системы (3), а также определим значение теплового гистерезиса между начальной точкой и точкой А (4), рисунок 8.

$$\delta U_{\text{ион}} = \frac{U_{\text{ион}} - U_{\text{нач}}}{U_{\text{нач}}} \cdot 10^6 \text{ (ppm)}. \quad (3)$$

$$\text{HYST} = \frac{\Delta U_{\text{ион}}}{5 \text{ В}} \cdot 10^6 = -138 \text{ ppm}. \quad (4)$$

Тепловой гистерезис в сочетании с температурным дрейфом приводит к тому, что в рабочем диапазоне температур внутри блока от  $-20$  до примерно 70 °C (например, если рядом с ИОН расположены элементы с большим тепловыделением) уход опорного напряжения от калиброванного значения может превысить 200 ppm (точки Б и В). Но даже если температура вновь возвращается к исходному значению, при котором проводилась наземная калибровка (в данном случае это 30 °C), остаточное смещение опорного напряжения вследствие гистерезиса вполне может превысить сотню ppm. Много это или мало? Ответ зависит от желаемой точности измерительной системы. В таблице 1 показано, какой должна быть суммарная погрешность измерительной системы от всех воздействующих факторов (не более половины младшего значащего разряда (5)) для достижения заданного разрешения и соответствующий этому максимальный теоретически допустимый  $\alpha_{\text{инт}}$  ИОН, определённый «коробочным» методом, – в первом случае температура ИОН в полёте меняется в диапазоне от  $-20$  до  $+70$  °C, а во втором пред-

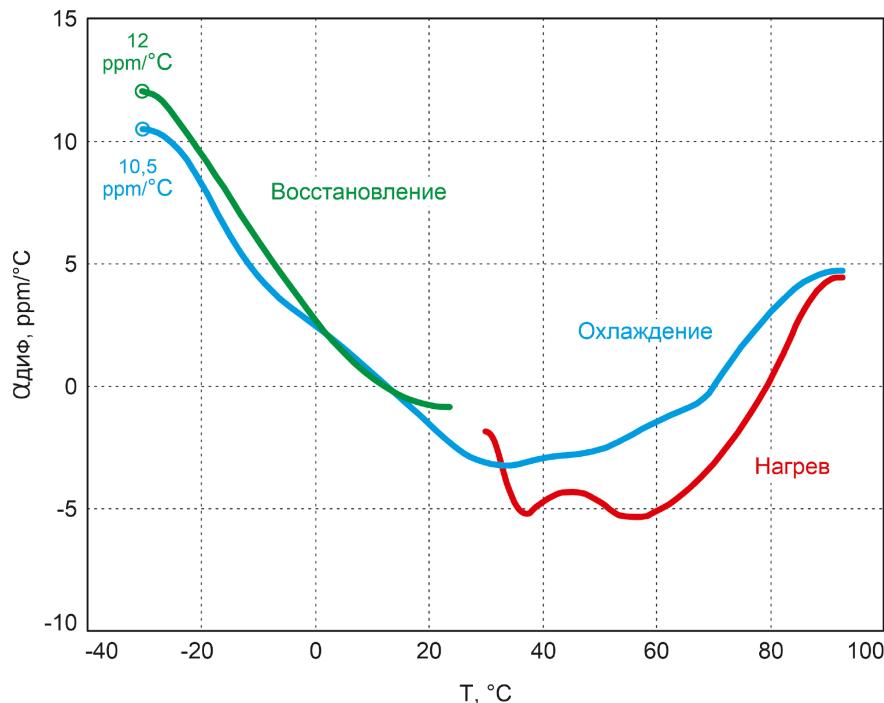


Рисунок 7. Дифференциальный температурный коэффициент

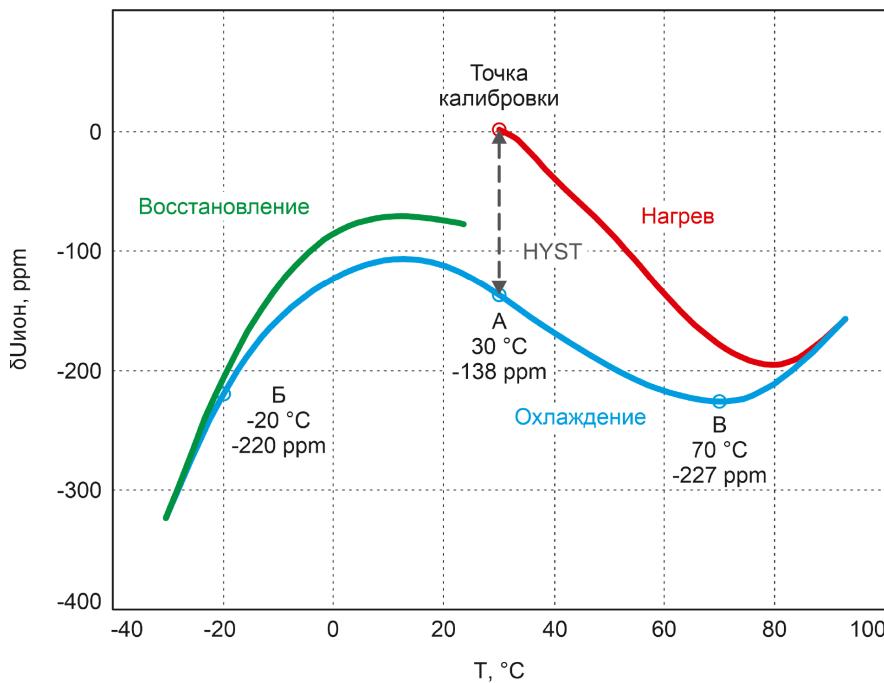


Рисунок 8. Температурный дрейф ИОН, нормированный к начальной точке, и определение теплового гистерезиса в точке А

полагается, что обеспечено термостатирование, и изменение температуры не превышает  $\pm 1$  °C от значения  $T_{CAL}$ , при котором ИОН прошёл калибровку на земле. Здесь и далее предполагаем, что основной вклад в погрешность измерений вносит именно ИОН.

$$\delta_{MAX} = 0,5 \cdot \frac{10^6}{2^n} (\text{ppm}), \quad (5)$$

где  $n$  – необходимое разрешение, бит.

Как видим, реальное разрешение нашей измерительной системы – около 11 бит при условии, что температура ИОН во время эксплуатации на КА может меняться в диапазоне от  $-20$  до  $+70$  °C. Необходимый для такого разрешения  $\alpha_{\text{инт}}$  – не более  $2,7$  ppm/°C – согласуется с рассчитанным значением  $2,6$  ppm/°C для нашей микросхемы (1). Если же ориентироваться на предельное значение из спецификации –  $7$  ppm/°C, то реальное разрешение измерительного прибора

на основе ISL21090B-50 может оказаться даже ниже 10 бит, и это без учёта других источников ошибок.

Как повысить разрешение системы? Первый и самый очевидный способ – выбрать ИОН с ещё меньшим  $\alpha_{\text{инт}}$ , однако выбор будет не очень широк: большинство современных прецизионных ИОН имеют гарантированный ТКН в лучшем случае не более 2...3 ppm/°C, и его типичные значения 0,5...1 ppm/°C, что ненамного лучше рассматриваемого ISL21090B-50 [8]. Исключением являются лишь немногие ИОН на основе стабилитронов со скрытой структурой, другой вариант перевода – стабилитроны с захороненным слоем (buried zener): типичное значение температурного коэффициента LTZ1000 – около 0,05 ppm/°C, что соответствует разрешению 16–17 бит [9]. Дальнейшее повышение разрешения возможно путём терmostатирования ИОН: установленный в макете ISL21090B-50, температура которого стабилизована на уровне  $\pm 1$  °C относительно значения  $T_{\text{CAL}}$  при калибровке, теоретически даст разрешение до 16 бит, а LTZ1000 в тех же внешних условиях – до 22 бит. Стоит отметить, что LTZ1000, являющийся основой для многих прецизионных измерительных устройств, включая используемый в нашем эксперименте 8 ½ – разрядный мультиметр Keysight 3458A, уже содержит внутренние средства стабилизации температуры кристалла – нагреватель и датчик температуры, но это не отменяет требований к стабильности внешней температуры, если необходимо разрешение выше 16 бит.

Выбор ИОН с малым ТКН и стабилизация его температуры значительно снижают и тепловой гистерезис, который может возникнуть при смене температуры ТСП в полёте, но ничто не мешает

появлению гистерезиса, когда термостабилизация выключена. Поэтому в самых точных системах температура ИОН должна оставаться неизменной всё время с момента наземной калибровки: прибор должен иметь автономный внутренний источник питания с аккумулятором либо надёжное внешнее энергоснабжение, например от РИТЭГ, по крайней мере, до момента включения целевой аппаратуры КА в полёте.

Общие меры борьбы с тепловым гистерезисом начинаются с разработки такой печатной платы (ПП), на которой механические напряжения, действующие на ИОН, сведены к минимуму. Для этого ИОН следует располагать по возможности в углах или хотя бы рядом с краем ПП. Как видно на рисунке 2, ИОН в нашем макете оказался в самом центре платы, т.е. в наихудшем месте из возможных: даже при небольшом изгибе платы заметны изменения опорного напряжения порядка нескольких десятков микровольт. Альтернативой или дополнительной мерой может быть «отделение» посадочного места микросхемы ИОН от остальной платы с помощью вырезов в материале ПП [6; 10]. Наибольшее изменение опорного напряжения вследствие теплового гистерезиса обычно наблюдается в первые несколько циклов нагрева и охлаждения [6], поэтому может быть полезным провести многократное термоциклирование платы или собранного изделия перед калибровкой для снижения механических напряжений, возникших в кристалле ИОН при монтаже микросхемы.

Кривая зависимости опорного напряжения микросхемы ISL21090B-50 от температуры (рисунки 6 и 8) имеет характерную для ряда бандгапов и стабилитронов с захороненным слоем S-образную форму [5] с «линейным» участком посередине, примерно от 20 до 60 °C, на котором

Максимально допустимая погрешность измерительной системы для заданного разрешения и соответствующие требования к ИОН

n, бит	$\delta_{\text{MAX}}$ , ppm	$\alpha_{\text{инт}}$ ppm/°C, не более	
		$T_{\text{ИОН}} = -20 \dots +70$ °C	$T_{\text{ИОН}} = T_{\text{CAL}} \pm 1$ °C
8	1953	21,7	976,6
10	488	5,4	244,1
11	244	2,7	122,1
12	122	1,4	61,0
14	30,5	0,34	15,3
16	7,6	0,085	3,8
18	1,9	0,021	1,0
20	0,48	0,0053	0,24
22	0,12	0,0013	0,060
24	0,030	0,00033	0,015
32	0,00012	0,0000013	0,000058

Таблица 1

напряжение меняется с ТКН около 2...5 ppm/°C. Представляет интерес возможность частичной математической компенсации дрейфа ИОН на этом участке. Предположим, что тепловой гистерезис сведен к минимуму, а температура ИОН ограничена диапазоном 20...60 °C с помощью внешней термостабилизации, причём измерительная система откалибрована в середине этого диапазона при  $T_{CAL} = 40$  °C (3). Для иллюстрации принципа компенсации примем, что зависимости опорного напряжения от температуры соответствует синяя кривая (рисунки 6 и 8), тогда, зная локальное значение ТКН (2) нашего экземпляра ИОН в точке калибровки  $\alpha_{\text{диф}}(T_{CAL})$ , введём компенсирующую функцию (6) и прибавим её к исходной зависимости (7). Здесь  $T_{\text{ион}}$  – фактическая температура ИОН, а  $T_{\text{дат}}$  – значение, измеренное температурным датчиком с некоторой погрешностью.

$$\text{COMP}(T_{\text{дат}}) = -\alpha_{\text{диф}}(T_{CAL}) \cdot (T_{\text{дат}} - T_{CAL}). \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{ион.комп}}(T_{\text{ион}}, T_{\text{дат}}) &= \\ &= \delta U_{\text{ион}}(T_{\text{ион}}) + \text{COMP}(T_{\text{дат}}) \end{aligned} \quad (7)$$

На рисунке 9 изображены: часть исходной кривой  $\delta U_{\text{ион}}$ , компенсирующая функция COMP и напряжение ИОН после компенсации дрейфа  $\delta U_{\text{ион.комп}}$  для «идеального» случая, когда температура ИОН измерена со стопроцентной точностью, и  $T_{\text{дат}} = T_{\text{ион}}$ . На практике точность такой компенсации будет напрямую зависеть от точности измерения  $T_{\text{ион}}$  термодатчиками – им посвящена вторая часть статьи.

## 2. Эксперимент с термодатчиками

При разработке макета помимо элементов собственно измерительной системы в него также были заложены микросхемы 5306HT025 производства АО «Дизайн Центр «Союз» – одни из немногих отечественных интегральных радиационностойких термодатчиков – для оценки возможности их применения в перспективной бортовой аппаратуре, прежде всего в качестве внутренних телеметрических датчиков для контроля температуры печатных узлов вблизи критичных элементов.

Микросхема 5306HT025 представляет собой законченное устройство, состоит из термоэлемента, схемы обработки сигнала и средств калибровки. Выходной сигнал – напряжение в диапазоне от 0,2 до 4,8 В – соответствует изменениям температуры от -60 до +125 °C [11]. Температурный коэффициент напряжения равен 22,5 мВ/°C. Выходное напряжение пересчитывается в температуру по формуле (8). Типичная погрешность преобразования – не хуже  $\pm 2$  °C, датчики этого типа уступают по точности термометрам сопротивления, но выигрывают в простоте применения. Расположение датчиков на макете показано на рисунке 10 – они находятся довольно далеко от микросхемы ISL21090B-50, так как на этапе разработки макета возможность их применения для компенсации температурного дрейфа ИОН не рассматривалась.

$$T_{\text{дат}} = \frac{U_{\text{вых}}(\text{вольт}) - 1,675}{0,0225} (\text{°C}). \quad (8)$$

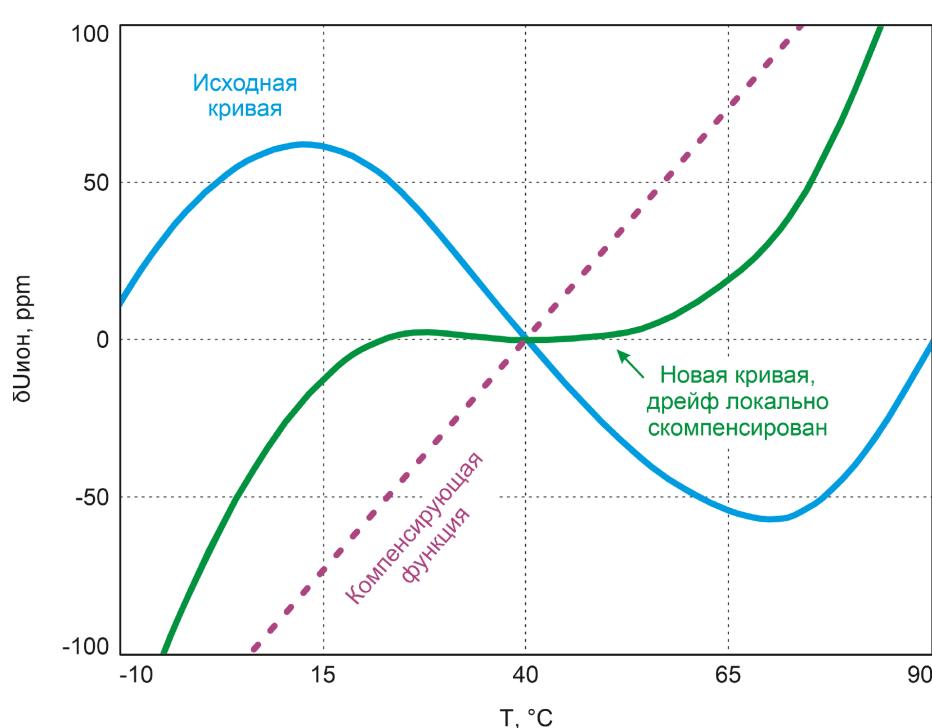


Рисунок 9. Принцип компенсации дрейфа ИОН

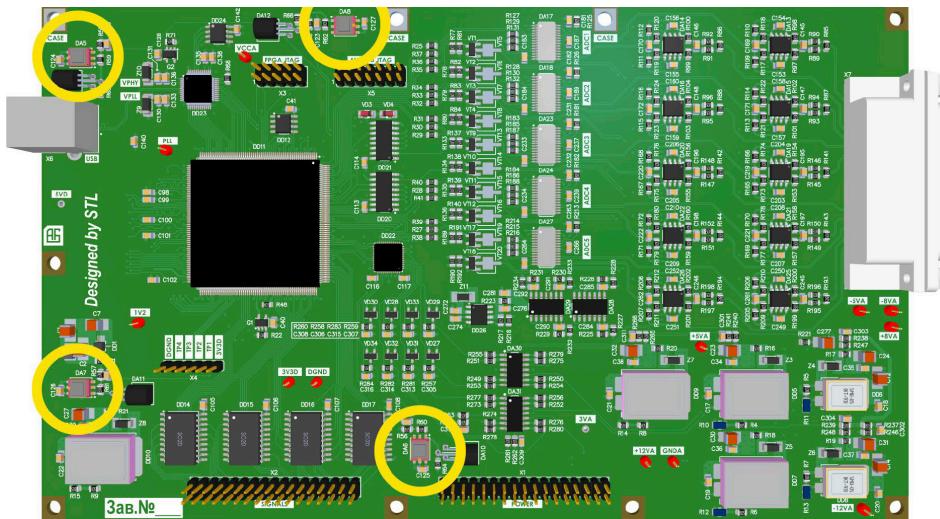


Рисунок 10. Расположение интегральных термодатчиков на макете

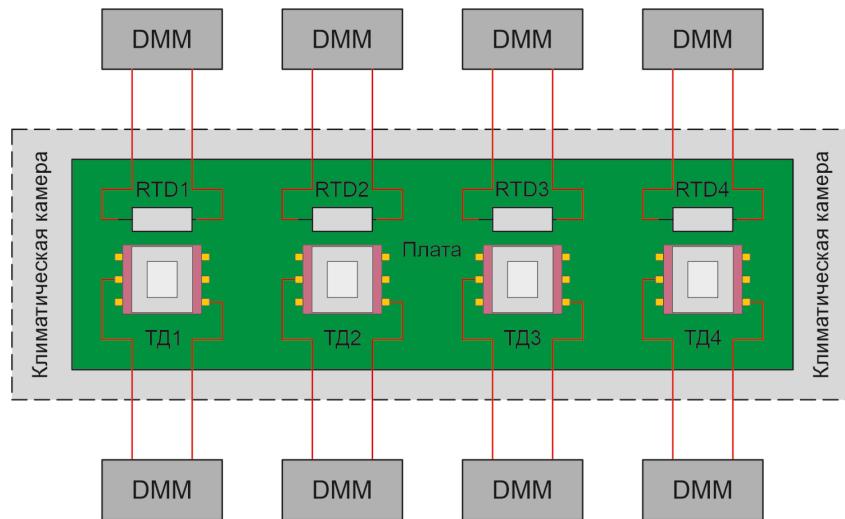


Рисунок 11. Схема эксперимента с термодатчиками

В эксперименте показания термодатчиков сравнивались с показаниями контрольных RTD-элементов Pt-1000, приклеенных к плате максимально близко к каждой из четырёх микросхем. Для выявления погрешностей 5306HT025 на уровне  $\pm 2$  °C и менее температуры микросхемы и контрольного RTD-элемента в каждый момент времени должны быть как можно ближе друг к другу, а изменение температуры должно происходить как можно медленнее – нагрев с помощью термофена и охлаждение аэрозолем в данном случае не годятся, поэтому эксперимент проводился в климатической камере в течение девяти часов при росте температуры от  $-35$  до  $+75$  °C со средней скоростью  $0,2$  °C в минуту. Схема эксперимента показана на рисунке 11, DMM – цифровые мультиметры.

На рисунке 12 показаны экспериментально определённые характеристики преобразования четырёх датчиков 5306HT025, а на рисунке 13 – отклонение  $\Delta T$  их показаний от температур контрольных RTD-элементов.

Все микросхемы 5306HT025, установленные в нашем макете, – опытные образцы, не прошедшие контроль качества при крайних температурах, на которые не распространяются гарантии производителя. Тем не менее погрешности микросхем 1 и 2 не превышают предельных значений во всём рассмотренном диапазоне температур. Отклонения для микросхемы 3 тоже укладываются в допустимый диапазон за исключением участка в районе  $0$  °C. Погрешность образца 4 выходит за рамки допустимой ниже  $18$  °C и быстро растёт в области отрицательных температур – в точке  $-33,9$  °C она достигает  $9,8$  °C. Производитель калибрует микросхемы в нескольких точках, поэтому зависимость погрешности такого датчика от температуры – не монотонная.

Интегральные датчики температуры 5306HT025 имеют приемлемую точность для использования их в качестве телеметрических, причём другие микросхемы той же серии – 5306HT015B/C [12] и 5306HT015E/K/H [13] – име-

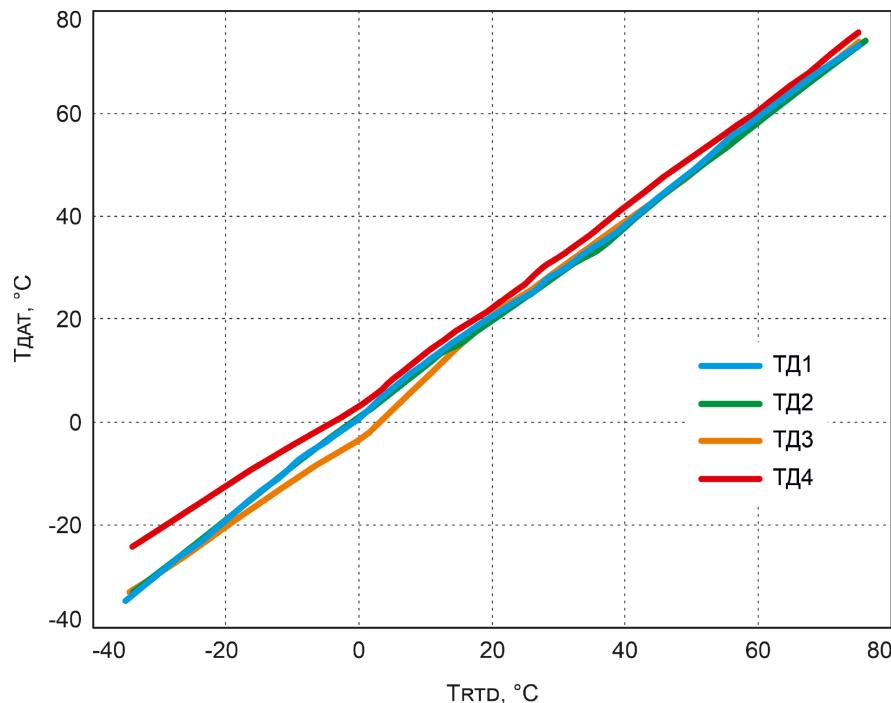


Рисунок 12. Характеристики преобразования четырёх термодатчиков

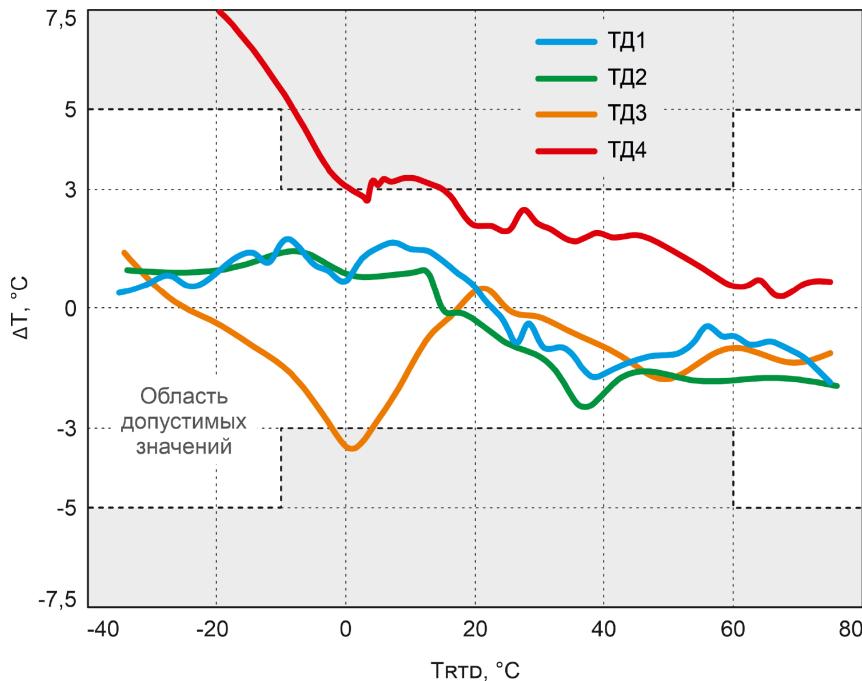


Рисунок 13. Зависимость погрешности измерения от температуры

ют интерфейсы 1-Wire и SPI соответственно, что позволяет подключать их напрямую к процессору или ПЛИС без АЦП.

Можно ли использовать такие датчики температуры для компенсации теплового дрейфа ИОН? В соответствии с ранее изложенным принципом (6), (7) построим зависимости  $\delta U_{\text{ион,комп}}(T_{\text{ион}}, T_{\text{дат}})$ , если бы в качестве датчиков температуры использовались микросхемы ТД1 – ТД4, тоже откалиброванные в точке  $T_{\text{CAL}} = 40^\circ\text{C}$ , рисунок 14 (чёрная кривая – «идеальный» случай, когда по-

грешность измерения температуры ИОН равна нулю, и  $T_{\text{дат}} = T_{\text{ион}}$ ).

С учётом компенсации дрейфа в диапазоне от 20 до  $55^\circ\text{C}$   $\delta U_{\text{ион}}$  не превышает 7 прт, что соответствует теоретическому разрешению 16 бит (таблица 1). В измерительной системе с невысоким разрешением, но линейной зависимостью  $U_{\text{ион}}(T)$  в рабочем диапазоне температур наличие такого телеметрического датчика рядом с ИОН даёт возможность почти без дополнительных усилий повысить точность, внося поправку в из-

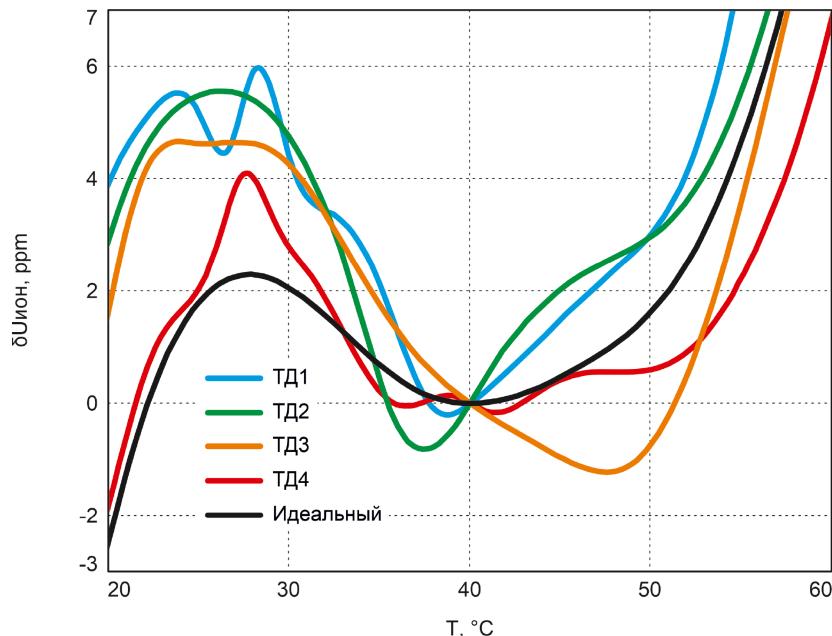


Рисунок 14. Дрейф напряжения ИОН после термокомпенсации

мерения с учётом известной температуры опорного источника. Если же от системы изначально требуется высокое разрешение, то следует сфокусироваться на выборе прецизионного ИОН и стабилизации его температуры в как можно более узком диапазоне, но для этого лучше использовать термодатчики с заведомо меньшей погрешностью, чем у серии 5306.

## Заключение

Разрешающая способность измерительной системы зависит не только от датчиков, но и от остальных её элементов: аналоговых каскадов, ИОН, АЦП. Одними из основных параметров, определяющих реальную точность измерений, являются температурный дрейф и тепловой гистерезис опорного напряжения, которые могут быть сведены к минимуму выбором прецизионного ИОН и его термостатиро-

ванием. Разрешение систем на основе опорных источников с линейной зависимостью напряжения от температуры можно повысить, внося поправку в измерения с учётом фактической температуры ИОН. Принципы выбора и особенности применения опорных источников, проиллюстрированные на примере ISL21090B-50, могут быть использованы при разработке прецизионных измерительных систем бортовой аппаратуры на основе современных отечественных радиационно-стойких ИОН, как серийно выпускаемых (серия 1380, НЗПП Восток), так и перспективных (серия 1393, Дизайн Центр «Союз»).

Температура печатной платы рядом с критичными элементами внутри прибора на КА может быть определена с помощью простых в применении интегральных термодатчиков серии 5306HTxx, обеспечивающих приемлемую для внутренней телеметрии точность.

## Список литературы

- [1] Ровняков О. И., Чугунин Д. В., Ануфрейчик К. В. Конструктивные и схемотехнические решения на основе слаботочной электроники для измерений характеристик космической плазмы // Космические аппараты и технологии. 2025. Т. 9. № 1. С. 48–62. doi: 10.26732/j.st.2025.1.05.
- [2] ADS1282 Аналого-цифровой преобразователь высокого разрешения [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/ads1282> (дата обращения: 27.10.2025).
- [3] ISL21090 Ультра-малошумящий прецизионный источник опорного напряжения [Электронный ресурс]. URL: <https://www.renesas.com/en/document/dst/isl21090-datasheet?r=533226> (дата обращения: 27.10.2025).
- [4] Leon E., Barthel R., Alani T. Усилители с нулевым дрейфом: особенности и преимущества (краткое руководство по применению) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ti.com/lit/ab/sboa182c/sboa182c.pdf> (дата обращения: 28.10.2025).
- [5] Применение источников опорного напряжения (руководство по применению № 177) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.renesas.com/en/document/apn/an177-voltage-reference-application-and-design-note> (дата обращения: 27.10.2025).

- [6] Как измерить тепловой гистерезис источника опорного напряжения MAX6079, рекомендации к печатной плате (руководство по применению № 6651) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/design-notes/how-to-measure-the-max6079-voltage-reference-thermal-hysteresis-considerations-for-pcb-layout.pdf> (дата обращения: 27.10.2025).
- [7] Wright J. Не дайте себя обмануть насчёт долговременного дрейфа и гистерезиса источника опорного напряжения (руководство по разработке № 229) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/design-notes/dn229f.pdf> (дата обращения: 27.10.2025).
- [8] Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: учебное пособие / пер. с англ. 3-е изд. Нью-Йорк: Издательство Кембриджского университета, 2016, 1254 с.
- [9] LTZ1000/LTZ1000A Ультра-прецизионный опорный источник // Linear Technology. Справочник по линейным схемам. 1990. Милпитас, Калифорния, США: Корпорация Linear Technology, 1989.
- [10] Lee M. Понимание и применение источников опорного напряжения (руководство по применению № 82) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/app-notes/an82f.pdf> (дата обращения: 28.10.2025).
- [11] Интегральный аналоговый датчик температуры 5306HT025 [Электронный ресурс]. URL: [https://dcsoyuz.ru/files/temperature/5306HT025/specifikacija\\_5306nt025\\_ver1.0.pdf](https://dcsoyuz.ru/files/temperature/5306HT025/specifikacija_5306nt025_ver1.0.pdf) (дата обращения: 27.10.2025).
- [12] Интегральный цифровой датчик температуры с 1-Wire интерфейсом управления 5306HT015B / 5306HT015C [Электронный ресурс]. URL: [https://dcsoyuz.ru/files/temperature/5306HT015BC/specifikacija\\_5306nt015\(B\\_C\)\\_ver3.1.pdf](https://dcsoyuz.ru/files/temperature/5306HT015BC/specifikacija_5306nt015(B_C)_ver3.1.pdf) (дата обращения: 28.10.2025).
- [13] Интегральный цифровой датчик температуры с SPI интерфейсом управления 5306HT015E / 5306HT015K / 5306HT015H [Электронный ресурс]. URL: [https://dcsoyuz.ru/files/temperature/5306HT015EHK/specifikacija\\_5306nt015\(e\\_k\\_n\)\\_ver3.1.pdf](https://dcsoyuz.ru/files/temperature/5306HT015EHK/specifikacija_5306nt015(e_k_n)_ver3.1.pdf) (дата обращения: 28.10.2025).

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE CHARACTERISTICS OF PRECISION MEASUREMENT SYSTEM ELEMENTS FOR SPACECRAFT SCIENTIFIC PAYLOAD

**O. I. Rovnyakov, K. A. Dyuzhev, K. V. Anufreichik**

*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences  
Moscow, Russian Federation*

*The primary function of a spacecraft scientific payload is to perform measurements. The voltage reference is a key component of a measurement system, determining its accuracy. During normal system operation, the reference voltage is subject to temperature-induced variations which, unlike initial error, cannot be eliminated by on-ground calibration. The performance of the ISL21090B-50 voltage reference was experimentally evaluated within the typical operating temperature range for space equipment. Its integral and differential temperature coefficients and thermal hysteresis were determined. Conclusions were drawn regarding the theoretically achievable resolution of a precision measurement system based on this integrated circuit, and methods for its improvement are described. The theoretical possibility of improving measurement system resolution is demonstrated for voltage references with a linear voltage-temperature relationship, using mathematical compensation based on the actual temperature of the reference element. The performance of radiation-hard 5306NT025 integrated temperature sensors was experimentally evaluated in a climate chamber for use as internal telemetry sensors in future space projects, and their error vs. temperature curves were obtained. An example of thermal drift compensation for the ISL21090B-50 reference is presented, utilizing the data acquired from the temperature sensors.*

*Keywords: voltage reference, ADC, thermal hysteresis, temperature sensor, bandgap, spacecraft scientific payload.*

*Submitted: 11.11.2025. Accepted: 28.11.2025.*

## References

- [1] Rovnyakov O. I., Chugunin D. V., Anufreichik K. V. Low-current electronics schematic and design solutions for space plasma characteristics measurement // Spacecrafts & Technologies, 2025, vol. 9, no. 1, pp. 48–62. doi: 10.26732/j.st.2025.1.05.
- [2] ADS1282 High-Resolution Analog-To-Digital Converter. Available at: <https://www.ti.com/lit/gpn/ads1282> (accessed 27.10.2025).
- [3] ISL21090 Ultra Low Noise, Precision Voltage Reference. Available at: <https://www.renesas.com/en/document/dst/isl21090-datasheet?r=533226> (accessed 27.10.2025).
- [4] Leon E., Barthel R., Alani T. Zero-Drift Amplifiers: Features and Benefits (Application Brief). Available at: <https://www.ti.com/lit/ab/sboa182c/sboa182c.pdf> (accessed 28.10.2025).
- [5] Voltage Reference Application and Design Note – Application Note 177. Available at: <https://www.renesas.com/en/document/apn/an177-voltage-reference-application-and-design-note> (accessed 27.10.2025).
- [6] How to measure the MAX6079 voltage reference thermal hysteresis, considerations for PCB layout – Application Note 6651. Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/design-notes/how-to-measure-the-max6079-voltage-reference-thermal-hysteresis-considerations-for-pcb-layout.pdf> (accessed 27.10.2025).
- [7] Wright J. Don't Be Fooled by Voltage Reference Long-Term Drift and Hysteresis – Design Note 229. Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/design-notes/dn229f.pdf> (accessed 27.10.2025).
- [8] Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2016.
- [9] LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference // Linear Technology, 1990 Linear Databook. Milpitas, CA: Linear Technology Corporation, 1989.
- [10] Lee M. Understanding and Applying Voltage References – Application Note 82. Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/app-notes/an82f.pdf> (accessed: 28.10.2025).
- [11] Integral'nyj analogovyj datchik temperatury 5306NT025 [Integrated Analog Temperature Sensor 5306NT025]. Available at: [https://dcsoyuz.ru/files/temperature/5306HT025/specifikacija\\_5306nt025\\_ver1.0.pdf](https://dcsoyuz.ru/files/temperature/5306HT025/specifikacija_5306nt025_ver1.0.pdf) (accessed: 27.10.2025). (In Russian)
- [12] Integral'nyj tsifrovoj datchik temperatury s 1-Wire interfejsom upravleniya 5306NT015V / 5306NT015S [Integrated Digital Temperature Sensor with 1-Wire Control Interface 5306NT015V / 5306NT015S]. Available at: [https://dcsoyuz.ru/files/temperature/5306HT015BC/specifikacija\\_5306nt015\(B\\_C\)\\_ver3.1.pdf](https://dcsoyuz.ru/files/temperature/5306HT015BC/specifikacija_5306nt015(B_C)_ver3.1.pdf) (accessed: 28.10.2025). (In Russian)
- [13] Integral'nyj tsifrovoj datchik temperatury s SPI interfejsom upravleniya 5306NT015E / 5306NT015K / 5306NT015N [Integrated Digital Temperature Sensor with SPI Control Interface 5306NT015E / 5306NT015K / 5306NT015N]. Available at: [https://dcsoyuz.ru/files/temperature/5306HT015EHK/specifikacija\\_5306nt015\(e\\_k\\_n\)\\_ver3.1.pdf](https://dcsoyuz.ru/files/temperature/5306HT015EHK/specifikacija_5306nt015(e_k_n)_ver3.1.pdf) (accessed: 28.10.2025). (In Russian)

## Сведения об авторах

*Ровняков Олег Игоревич* – ведущий инженер Института космических исследований РАН. Окончил Донецкий национальный технический университет в 2010 году. Область научных интересов: космическое приборостроение, электроника.

*Дюжев Кирилл Андреевич* – инженер Института космических исследований РАН. Магистрант Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». Область научных интересов: космическое приборостроение, электроника.

*Ануфрейчик Константин Владимирович* – начальник лаборатории Института космических исследований РАН. Окончил Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» в 2002 году. Область научных интересов: космическое приборостроение, встраиваемое программное обеспечение.