

ПРОБЛЕМЫ УНИФИКАЦИИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ИНТЕРФЕЙСНОГО МОДУЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. И. Горностаев

*АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»,
г. Железнодорожск, Красноярский край, Российская Федерация*

Важным этапом разработки унифицированного многоканального интерфейсного модуля контроля температур, входящего в состав измерительных приборов и осуществляющего контроль температуры на элементах конструкции космических аппаратов, является анализ предъявляемых технических требований к измерительным приборам и условий их эксплуатации, которые могут повлиять на структуру модуля.

Статья посвящена анализу общих требований к измерительным приборам космических аппаратов, строящимся по магистрально-модульному принципу на базе центрального приборного модуля и содержащим в своём составе интерфейсный модуль контроля температур, а также анализу технических характеристик подключаемых к измерительным приборам различного типа первичных преобразователей.

Показано, что к интерфейсным модулям контроля температур, имеющим каналы контроля с различными диапазонами измерения, предъявляются различные требования по точности и стабильности измерения температуры, а в качестве первичных преобразователей для контроля температуры наиболее часто используют термопреобразователи сопротивления с медными и платиновыми чувствительными элементами с номинальными сопротивлениями 100 и 500 Ом. При невысоких требованиях к точности и стабильности измерения используют 100-омные термопреобразователи, при повышенных требованиях к точности и стабильности измерения – 500-омные термопреобразователи. Если не требуется высокое быстродействие измерения температуры, то используют термопреобразователи сопротивления с медными чувствительными элементами. Если необходимы высокое быстродействие и повышенная стабильность измерения, то используют термопреобразователи сопротивления с платиновыми чувствительными элементами.

Ключевые слова: космический аппарат, контроль температуры, точность и стабильность измерения, измерительный прибор, первичный преобразователь, термопреобразователь сопротивления.

Введение

Многоканальный интерфейсный модуль контроля температур (ИМКТ) является составной частью измерительных приборов, используемых для контроля температуры на элементах конструкции космических аппаратов (КА), в основу которых положен магистрально-модульный принцип построения на базе центрального приборного модуля (ЦПМ) [1].

При проектировании многоканального ИМКТ по требованиям, предъявляемым к измери-

тельным приборам, особое внимание уделяют его структурной унификации, которая бы позволила оптимально решить задачи обеспечения требуемой точности и стабильности измерения температуры в различных диапазонах для измерительной системы в целом [2; 3]. При этом учитывают, что оптимальность решения поставленных задач будет зависеть:

- от выбора устанавливаемых на элементы конструкции КА датчиков температуры (ДТ), которые по отношению к измерительному прибору являются первичными преобразователями и вносят собственную составляющую погрешности измерения;
- от выбора способов подключения соединительных проводов (линий связи) первичных

✉ galiv@iss-reshetnev.ru

© Горностаев А. И., 2019

преобразователей к входным цепям каналов контроля ИМКТ, которые используются для компенсации составляющей погрешности измерения, вносимой сопротивлениями соединительных проводов;

- от выбора методов измерения, которые используются для минимизации методической составляющей погрешности измерения, возникающей в самом измерительном приборе;
- от выбора способов защиты от воздействия на входные цепи каналов контроля ИМКТ помех, которые используются для повышения стабильности результатов измерения.

При определении структуры унифицированного ИМКТ также учитывают требуемое количество каналов контроля, требуемый для каждого канала контроля диапазон измерения температуры, различия технических характеристик подключаемых к входным цепям каналов контроля первичных преобразователей, а также параметры воздействующих на входные цепи синфазных и дифференциальных помех в процессе испытаний и при штатной эксплуатации измерительного прибора.

Для достижения оптимальных результатов в решении поставленных задач сначала проводят сравнительный анализ различных способов уменьшения составляющих общей погрешности измерения, вносимых в измерительной системе первичными преобразователями, линиями связи и измерительным прибором, а затем на основе проведенного анализа определяют структуру унифицированного многоканального ИМКТ.

Наилучшие результаты при решении поставленных задач могут быть достигнуты в том случае, если в структуре унифицированного ИМКТ будут предусмотрены специальные аппаратные средства компенсации систематической и случайной составляющих погрешности измерения, а в специальном программном обеспечении (СПО) ЦПМ предусмотрены алгоритмы проведения автокалибровок результатов измерения.

В данной статье проведен анализ общих требований, предъявляемых к измерительным приборам, и основных технических характеристик первичных преобразователей, используемых для контроля температур на элементах конструкции КА, которые могут повлиять на структуру унифицированного ИМКТ.

Общие требования к измерительным приборам

Измерительные приборы, используемые для измерения температуры на элементах конструкции КА, являются вторичными преобразователями, обеспечивающими преобразование аналоговых сигналов первичных преобразовате-

лей в цифровые, и содержат в своём составе многоканальный ИМКТ и ЦПМ (рис. 1).

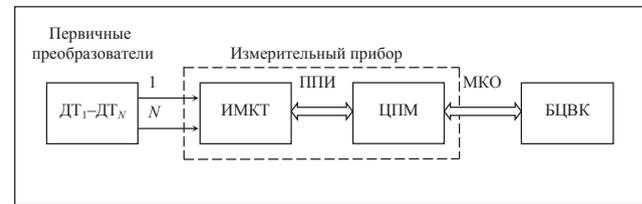


Рис. 1. Функциональная блок-схема измерительной системы

К измерительным приборам предъявляются требования по точности и стабильности измерения в условиях эксплуатации КА в диапазоне температур от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом для каналов контроля ИМКТ рабочие диапазоны измерения температур задаются индивидуально и находятся внутри указанного диапазона. В случае необходимости прецизионной термостабилизации отдельных элементов конструкции КА рабочие диапазоны измерения могут быть заданы очень узкими [4–6].

Первичные преобразователи $\text{ДТ}_1\text{--}\text{ДТ}_N$ (N – число каналов контроля в измерительной системе), устанавливаемые на элементы конструкции КА и подключаемые через линии связи бортовой кабельной сети к измерительному прибору, позволяют измерять температуру в более широком диапазоне, в котором необходимо учитывать нелинейность характеристик преобразования. Однако, в указанном эксплуатационном диапазоне температур эти характеристики в большинстве случаев считают приближенно линейными, поэтому к измерительным приборам, как правило, для повышения точности измерения не предъявляются специальные требования по линеаризации контролируемых аналоговых сигналов первичных преобразователей.

Точность и стабильность измерения входных сигналов первичных преобразователей $\text{ДТ}_1\text{--}\text{ДТ}_N$ будет меняться вместе с колебаниями температуры окружающей среды измерительного прибора. Поэтому в отдельных случаях, когда требуется повышенная точность и стабильность измерения температуры, могут предъявляться требования по установке измерительного прибора в составе КА на специальную термостабилизирующую плиту, обеспечивающую более узкий эксплуатационный диапазон температур, в котором будут гарантироваться его метрологические характеристики.

К конструкции измерительных приборов предъявляются требования по обеспечению высокой степени стойкости к электромагнитным помехам, электростатическим разрядам и радиочастотным помехам.

К многоканальному ИМКТ предъявляются требования к линейному преобразованию кон-

тролируемых аналоговых сигналов первичных преобразователей $ДТ_1-ДТ_N$ в цифровые в заданных рабочих диапазонах измерения и с заданной разрешающей способностью, а также к формированию пакета цифровых данных о результатах преобразования аналоговых сигналов и их передачи в ЦПМ с требуемой периодичностью для дальнейшей обработки. Для всех каналов контроля ИМКТ указываются основные технические характеристики первичных преобразователей, граничные значения параметров линий связи бортовой кабельной сети, а также параметры воздействующих синфазных и дифференциальных помех, при которых должна обеспечиваться требуемая для измерительного прибора точность и стабильность измерения температуры. В отдельных случаях предъявляются специальные требования к аппаратным средствам формирования эталонных (калибровочных) сигналов, необходимых для проведения автокалибровок результатов измерения, и фильтрации в цепях прохождения сигналов синфазных и дифференциальных помех, необходимых для уменьшения случайной составляющей погрешности измерения, а также быстродействию измерения. Приводятся также требования по обеспечению соответствия шкалы характеристики аналого-цифрового преобразования и её разрешающей способности требуемым для первичных преобразователей $ДТ_1-ДТ_N$ рабочим диапазонам измерения температуры и чувствительностей их градуировочных характеристик, а также соответствие этим диапазонам уровней внутренних опорных и эталонных (калибровочных) сигналов в схеме измерения каждого канала контроля, определяющих начало шкалы рабочих диапазонов измерения и калибровочные точки внутри этих диапазонов.

К СПО ЦПМ предъявляются требования по обмену цифровой информацией с ИМКТ по внутриприборному последовательному периферийному интерфейсу (ППИ) и обработки в соответствии с заданными алгоритмами принятой из ИМКТ цифровой информации о результатах измерения уровней сигналов первичных преобразователей в каналах контроля и в калибровочных точках, а также выдачи в цифровом виде откалиброванных результатов измерения по мультиплексному каналу обмена (МКО) во внешнее устройство регистрации, входящее в состав бортового цифрового вычислительного комплекса (БЦВК). Указываются требования по взаимодействию ЦПМ с БЦВК, которое должно происходить по инициативе БЦВК с заданной периодичностью и осуществляется по МКО в соответствии с ГОСТ Р 52070-2003 [7]. В требованиях к СПО ЦПМ приводятся алгоритмы проведения автокалибровок полученных из ИМКТ результатов измерений, основанные на решении линейных

калибровочных уравнений для заданных характеристик преобразования каждого канала контроля.

Кроме того, с помощью ЦПМ могут решаться и другие задачи, направленные на повышение достоверности результатов измерения (например, прецизионная линейризация сигналов и компенсация, зависящая от нелинейности градуировочной характеристики и разброса параметров первичных преобразователей, диагностика неисправностей, формирование произвольных отчётов о результатах измерения, изменение параметров конфигурации ИМКТ и ряд других математических операций, чтобы получить точное представление об измеряемой температуре).

Анализ технических характеристик первичных преобразователей

В качестве первичных преобразователей, устанавливаемых для контроля температуры на элементах конструкции КА, широкое применение нашли различные типы термопреобразователей сопротивления, принцип действия которых основан на зависимости электрического сопротивления металла от температуры. Термопреобразователь сопротивления (ТС) представляет собой средство измерения температуры, состоящее из одного или нескольких чувствительных элементов сопротивления и внутренних соединительных проводов, помещённых в герметичный защитный корпус, внешних клемм или выводов, предназначенных для подключения к измерительному прибору. По ГОСТ 6651-2009 чувствительным элементом (ЧЭ) таких ТС является медь, платина и никель [8]. Характеристики изменения сопротивления в зависимости от температуры для ЧЭ ТС из указанных материалов показаны на рис. 2.

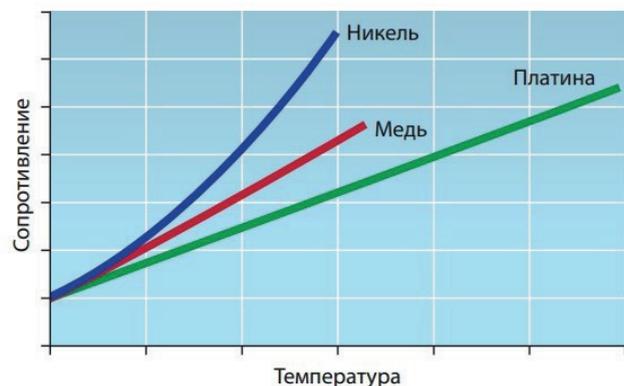


Рис. 2. Характеристики изменения сопротивления в зависимости от температуры для ЧЭ

В стандарте приведены для ТС диапазоны измерения, классы допуска, таблицы номинальных статических характеристик и стандарт-

ные зависимости сопротивление-температура. ГОСТ 6651-2009 соответствует международному стандарту МЭК 60751 (2008) [9].

Нормируемыми параметрами ТС или ЧЭ для построения номинальной статической характеристики (зависимости сопротивления ТС или ЧЭ от температуры) являются номинальное сопротивление R_0 при 0 °С и температурный коэф-

фициент сопротивления $\alpha = (R_{100} - R_0) / (R_0 \times 100 \text{ °С})$, где R_{100} – сопротивление при 100 °С. Связь между изменением сопротивления ТС и температурой, устанавливаемой температурным коэффициентом сопротивления α , также часто называют α -характеристикой ТС. Типы ТС и ЧЭ, на которые распространяется указанный стандарт, приведены в табл. 1 [8].

Таблица 1

Типы ТС и ЧЭ согласно ГОСТ 6651-2009

Тип ТС	Обозначение типа ТС	$\alpha, \text{°С}^{-1}$	Класс допуска		
			для проволочных ЧЭ	для плёночных ЧЭ	для ТС
Платиновый	Pt	0,00385	W0.1, W0.15, W0.3, W0.6	F0.1, F0.15, F0.3, F0.6	AA, A, B, C
	П	0,00391	AA, A, B, C	AA, A, B, C	AA, A, B, C
Медный	M	0,00428	A, B, C	–	A, B, C
Никелевый	N	0,00617	C	–	C

Температурный коэффициент α нормируется для конкретного материала и состава сплава. Медные (М), платиновые (П или Pt) и никелевые (Н) ЧЭ имеют разные коэффициенты α , и у самих платиновых ЧЭ коэффициенты тоже могут быть разными, в зависимости от чистоты платины и состава сплава. Значения коэффициента α определяют взаимозаменяемость ТС. Разные ТС с одним и тем же коэффициентом α гарантируют, что зависимость сопротивления от температуры останется неизменной в пределах указанного для ТС класса допуска. Класс допуска ТС указывает, насколько близка его α -характеристика к идеальной линейной зависимости.

В широком диапазоне температур, соответствующем диапазону измерения ТС, зависимость сопротивления ТС от температуры $R(t)$ является нелинейной и даёт слишком большую погрешность, поэтому для исключения влияния систематической составляющей нелинейности ТС на результат измерения стандарт рекомендует для расчёта номинальной статической характеристики ТС в пределах диапазона измерений использовать нелинейные уравнения, или выполнять его индивидуальную градуировку с получением индивидуальных коэффициентов зависимости сопротивления от температуры, требующих для измерения температуры использования специальных процедур исключения погрешности нелинейности на основе альтернативных интерполяционных уравнений [8]. Однако в узком диапазоне температур (от 0 до +100 °С), для которого нормируются R_0 и α , зависимость $R(t)$ можно считать приближённо в пределах указанного для ТС класса допуска линейной $R(t) = R_0(1 + \alpha t)$

и для измерения температуры использовать методы, основанные на решении линейных уравнений.

Величину погрешности, возникающей при линейной аппроксимации характеристики по нормируемым точкам диапазона 0 °С и +100 °С, можно оценить для конкретного типа ТС по отклонению графика нелинейной зависимости $R(t)$, приведённой для указанного в стандарте температурного диапазона измерений, от прямой линии [8]. Для медных ТС и ЧЭ с $\alpha = 0,00428 \text{ °С}^{-1}$ в диапазоне измерений от 0 °С до +200 °С зависимость $R(t) = R_0(1 + \alpha t)$, т. е. совпадает с линейной аппроксимацией. Для платиновых ТС и ЧЭ с $\alpha = 0,00391 \text{ °С}^{-1}$ в диапазоне измерений от 0 °С до +850 °С необходимо пользоваться нелинейной зависимостью $R(t) = R_0(1 + At + Bt^2)$, где $A = 3,969 \times 10^{-3} \text{ °С}^{-1}$ и $B = -5,841 \times 10^{-7} \text{ °С}^{-2}$. Аналогично для никелевых ТС и ЧЭ с $\alpha = 0,00617 \text{ °С}^{-1}$ в диапазоне измерений от -60 °С до +100 °С необходимо пользоваться нелинейной зависимостью $R(t) = R_0(1 + At + Bt^2)$, где $A = 5,4963 \times 10^{-3} \text{ °С}^{-1}$ и $B = 6,7556 \times 10^{-6} \text{ °С}^{-2}$.

Информация о погрешности линейной аппроксимации помогает принять верное решение о целесообразности прецизионной линеаризации характеристики ТС, которая может потребовать использования дополнительных компонентов, вычислительных ресурсов процессорной части измерительного прибора или ограничиться линейной аппроксимацией. После исключения (в случае необходимости) систематической составляющей погрешности нелинейности ТС остаётся случайная составляющая, обусловленная технологическим разбросом его номинального сопротивления R_0 при

0 °С и разбросом температурного коэффициента α . Эта погрешность вносит основной вклад в результат измерения температуры и нормируется для различных типов ТС в соответствии с классом допуска.

Наиболее широкое применение нашли ТС с ЧЭ из платины (П) и меди (М). Их достоинством является высокая точность, превосходная повторяемость и исключительная линейность номинальной статической характеристики в широком диапазоне температур. Медные ЧЭ имеют низкую цену и наилучшую линейность зависимости сопротивления от температуры, но позволяют производить измерения в более узком диапазоне, платиновые имеют высокую стабильность (не-

изменность показаний с течением времени) и позволяют производить измерения в более широком диапазоне. Использование ТС с никелевым (Н) ЧЭ ограничено ввиду их недостаточной точности и линейности, а также сравнительно узкого диапазона измерения.

Существует несколько классов допусков ТС, которые устанавливают взаимосвязь между допустимой погрешностью при рабочей температуре и эталоном в пределах диапазона измерения, указанного для каждого типа ТС. Для широко используемых платиновых и медных ТС классы допусков и предъявляемые к ним установленные стандартные требования приведены в табл. 2 [8].

Таблица 2

Классы допуска платиновых и медных ТС согласно ГОСТ 6651-2009

Класс допуска	Допуск, °С	Диапазон измерений, °С		
		Платиновый ТС, ЧЭ		Медный ТС, ЧЭ
		Проволочный ЧЭ	Плѐночный ЧЭ	
АА	$\pm(0,1+0,0017 t)$	От -50 до +250	От 0 до +150	–
А	$\pm(0,15+0,002 t)$	От -100 до +450	От -30 до +300	От -50 до +120
В	$\pm(0,3+0,005 t)$	От -196 до +660	От -50 до +500	От -50 до +200
С	$\pm(0,6+0,01 t)$	От -196 до +660	От -50 до +600	От -180 до +200

Примечание: $|t|$ – абсолютное значение температуры, °С, без учёта знака

Следует отметить, что допустимая погрешность увеличивается по мере того, насколько температура отдалена от точки 0 °С, где сопротивление равно R_0 . Чтобы определить допустимую абсолютную погрешность измерения при рабочей температуре для выбранного класса допуска ТС, необходимо при расчёте допуска воспользоваться соответствующим выражением из табл. 2.

Допуски ТС и ЧЭ по сопротивлению при температуре t получают умножением допусков из табл. 2 на коэффициент чувствительности dR/dt [Ом/°С] при температуре t , определённый по интерполяционным уравнениям нелинейной зависимости $R(t)$ [8]. В узком диапазоне температур, в котором зависимость $R(t)$ линейна, коэффициент чувствительности $dR/dt = \alpha R_0$.

Наиболее широкое применение в практике нашли платиновые и медные ТС классов А и В. Эти классы используются для определения допуска отклонения характеристик ТС от идеальных, описанных международным стандартом МЭК 60751 (IEC 60751), в целях их взаимозаменяемости [9]. При этом ТС класса В имеют почти вдвое больший допуск отклонения, чем ТС класса А (рис. 3).

Существуют различные виды ТС, обеспечивающие большое разнообразие способов их установки на элементы конструкции [10]. Каждый из них имеет свои отличительные черты для каждого способа применения и установки. ТС могут быть

либо погружаемыми в рабочую среду технологического процесса, либо монтируемыми на поверхности. Выбор способа монтажа зависит от применения, условий технологического процесса и ограничений, налагаемых окружающей средой.

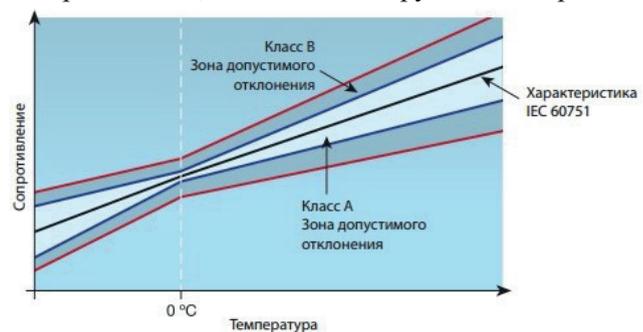


Рис. 3. Идеальная характеристика и допустимые отклонения от неё для ТС классов А и В

Два наиболее широко распространѐнных вида ТС – это проволочные и тонкоплѐночные. Проволочные ТС изготавливаются либо путѐм наматки резистивной проволоки на керамический сердечник, либо в виде спирально навитой проволоки, заключѐнной в защитную оболочку (поэтому они и получили название «проволочные»). Для изготовления тонкоплѐночных ТС тонкое резистивное покрытие наносится на плоскую (обычно прямоугольную) керамическую подложку.

Проволочные ТС нашли более широкое применение, так как они, по сравнению с плёночными, дают более стабильные результаты измерения. Однако иногда возникает необходимость использования тонкоплёночных ТС, так как они обладают минимальной тепловой инерционностью, а также большей устойчивостью к вибрации и, следовательно, более длительным сроком службы.

ТС с ЧЭ из платины выпускаются различных видов, включая проволочные и тонкоплёночные, а ТС с ЧЭ из меди – только проволочные. Конструктивно проволочные и тонкоплёночные ТС бывают различных модификаций с номинальными сопротивлениями из стандартизованного для каждого вида ТС ряда в пределах диапазона от 10 до 1000 Ом.

Конструкция ТС позволяет использовать их в цепях постоянного и переменного токов с частотой до 100 Гц.

Выводы корпуса ТС представляют собой прикреплённые к ЧЭ изолированные проводники, проходящие через защитную оболочку. Эти проводники имеют уплотнения на конце оболочки и используются для соединения ТС с точками под-

ключения измерительного прибора либо непосредственно, либо через дополнительные удлинительные провода.

По схеме подключения выводов, в зависимости от класса допуска, существуют двух-, трёх- или четырёхпроводные ТС, при этом в корпусе ТС могут содержаться один или два ЧЭ. Схемы соединения внутренних проводников ТС и маркировка выводов согласно требованиям стандарта показаны на рис. 4 [8].

В схеме подключения простейшего ТС используется два провода. Такая схема ТС используется там, где не требуется высокой точности измерения, так как сопротивление подводящих проводов включается в измеренное сопротивление и приводит к появлению дополнительной погрешности. ТС с двухпроводной схемой подключения изготавливают только по классу допуска В и С. При изготовлении имеются ограничения по монтажным длинам и длинам удлинительных проводов. В соответствии с требованиями стандарта следует обеспечить, чтобы сопротивление внутренних проводников ТС не превышало 0,1 % номинального сопротивления ТС при 0 °С [8].

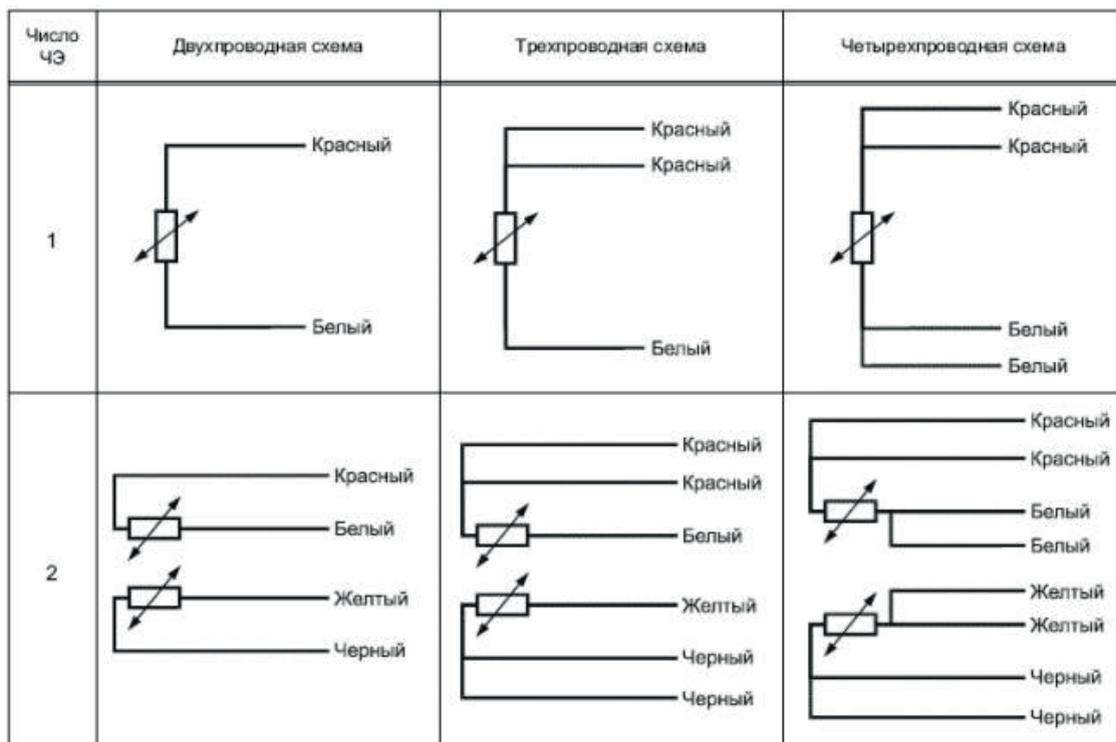


Рис. 4. Схемы соединения внутренних проводников ТС и маркировка выводов

Трёхпроводная схема обеспечивает значительно более точные измерения за счёт того, что появляется возможность измерить в отдельном опыте сопротивление подводящих проводов и учесть их влияние на точность измерения сопротивления ТС. Четырёхпроводная – наиболее точная схема, обеспечивает полное исключение влияния подводящих проводов. ТС с трёх- и четырёх-

проводной схемой подключения изготавливают в зависимости от конструктивных модификаций по классу допуска АА, А, В и С. При изготовлении ограничения по монтажным длинам и длинам удлинительных проводов отсутствуют.

Следует учитывать, что метрологические характеристики, нормируемые стандартом, распространяются на ЧЭ ТС при подключении к внешним

клеммам или выводам в соответствии с указанной изготовителем схемой. Если на корпусе ТС с двухпроводной схемой указано значение сопротивления внутренних проводников, то оно должно быть вычтено из значения измеренного сопротивления ТС.

Следует также учитывать, что у измерительных приборов, к которым подключают ТС, могут существовать ограничения по входным сопротивлениям измерительных линий связи, зависящим от длины удлинительных проводов ТС.

Учитывая тот факт, что в ряде случаев первичные преобразователи при эксплуатации невозможно заменить, часто отдают предпочтение ТС с двумя ЧЭ. Сдвоенные ЧЭ обеспечивают резервированное измерение, что может оказаться полезным для контроля дрейфа показаний в режиме горячего резервирования с помощью методики сравнения или для формирования входных сигналов на два независимых контроллера или две системы (например, систему управления и систему телеметрического контроля).

На точность измерения также влияет самонагрев ТС. Повышение температуры ТС вызвано нагревом ЧЭ измерительным током $I_{и}$, подаваемым от измерительного прибора. Более высокий измерительный ток, с одной стороны, увеличивает температурную чувствительность ТС, пропорциональную силе тока, с другой стороны, вызывает самонагрев ЧЭ, что приводит к дополнительной погрешности. Самонагрев ЧЭ зависит от мощности тепловыделения, которая возрастает пропорционально квадрату силы тока, коэффициентом пропорциональности которой является электрическое сопротивление ЧЭ, и интенсивности рассеяния тепловой энергии. Поэтому величину измерительного тока выбирают, исходя из конкретных условий измерения. В частности, принципиальное значение имеет теплопроводность среды (воздух, вода, контакт с металлом), в которой находится ТС.

Для уменьшения эффекта самонагрева ЧЭ следует снижать величину измерительного тока $I_{и}$, однако это приводит к уменьшению отношения сигнала к шуму и увеличению случайной составляющей погрешности измерений. Для уменьшения погрешности измерений изготовитель устанавливает значение допустимого измерительного тока для конкретного типа ТС (обычно 1–3 мА). Однако лучшие результаты дает измерение с помощью импульса, длительность которого выбирают из условия минимизации энергии, поступающей в ЧЭ за время измерения. Поскольку в импульсном режиме среднее значение измерительного тока может быть задано очень малым (обычно не более 200–250 мкА), выделяющееся тепло на ЧЭ также будет очень мало и будет оказывать пренебрежимо малое влияние на точность измерения.

Источником погрешности измерений с помощью ТС также являются термоэлектрический

эффект, который проявляется в виде термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) в измерительной цепи ТС в условиях температурных градиентов вследствие использования различных металлов и их неоднородности, и гистерезиса, который проявляется в виде разности показаний ТС при одной и той же температуре, полученных в температурных циклах при нагреве и охлаждении ТС [8]. Обычно ТЭДС не превышает 20 мкВ и не приводит к выходу ТС из класса допуска, а изменения показаний ТС в одной и той же температурной точке после термоциклирования остаются в пределах допуска соответствующего класса.

Важный параметр при эксплуатации первичных преобразователей для измерения температуры – быстродействие ТС, которое непосредственно влияет на точность измерения в технологических процессах с большой скоростью изменения температуры окружающей среды. Быстродействие ТС – это время термической реакции, которое необходимо для изменения показаний ТС на определённый процент полного изменения при ступенчатом изменении температуры среды при определённом наборе условий.

Следует отметить, что существуют разные стандарты на испытания с целью определения быстродействия, которые приводят к результатам, варьирующимся в широких пределах. Сравнить быстродействие ТС можно только в том случае, если испытания ТС проводятся по одному стандарту при одинаковых условиях.

Быстродействие ТС обычно указывают в секундах в виде значения « t », а рядом указывают уровень сигнала в процентах, при котором это время регистрируют [10]. Например, $t(0,5)$ означает быстродействие для уровня ступенчатого изменения 50 %, а $t(0,9)$ означает быстродействие для уровня ступенчатого изменения 90 %. Типичное быстродействие ТС приведено на рис. 5.

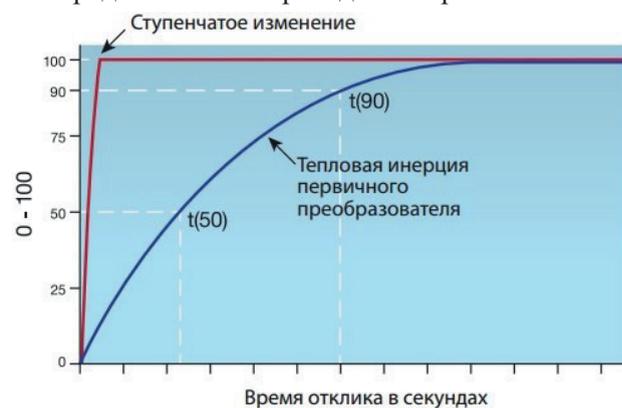


Рис. 5. Типичное быстродействие ТС

Быстродействие и точность измерения первичных преобразователей зависят от вида и размеров ТС, а также теплового сопротивления между ЧЭ и контролируемой средой. Тонкоплёночные

ТС обладают минимальной тепловой инерционностью (в 5–10 раз меньше, чем у проволочных ТС). Для повышения быстродействия отдают предпочтение ТС меньших размеров, потому что они имеют меньшую массу и меньше изолирующего материала. ТС меньших размеров также обеспечивают более точное измерение благодаря меньшей погрешности, обусловленной теплопроводностью защитной оболочки, в которую помещён ЧЭ.

При эксплуатации первичных преобразователей также необходимо учитывать стабильность и дрейф показаний ТС. Стабильность связана с величиной дрейфа показаний ТС и представляет собой взаимосвязь изначальной характеристики сопротивления ТС с его характеристикой после некоторого периода эксплуатации. Стабильность и дрейф показаний нормированы техническими документами на ТС конкретных типов и обычно подтверждаются после выдержки при температуре верхнего предела рабочего диапазона температур в течение 1000 ч.

Для ТС, предназначенных для длительного использования без поверки, и для ТС, устанавливаемых на особо важных объектах, предъявляются повышенные требования к стабильности. В этом случае отдают предпочтение ТС с платиновыми ЧЭ, обладающими по сравнению с медными ЧЭ большей стабильностью.

На стабильность ТС с платиновыми ЧЭ в объектах эксплуатации влияют различные факторы, определяемые конкретными условиями эксплуатации, которые приводят в зависимости от температуры к неодинаковому смещению номинального сопротивления R_0 со временем [10]. Определенно эта стабильность будет несколько хуже, чем дрейф показаний, указанный при 0 °С в контролируемой среде (рис. 6).

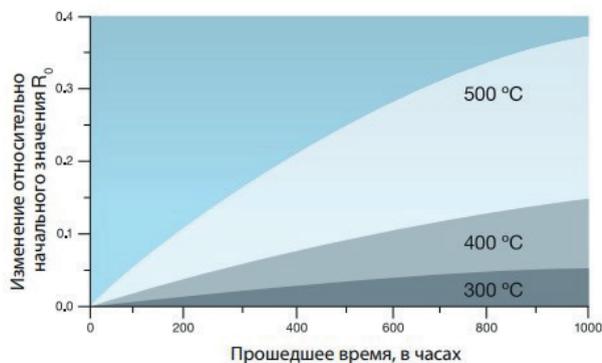


Рис. 6. Смещение R_0 со временем в зависимости от температуры

Эксплуатация при более высоких температурах сильно увеличивает скорость дрейфа показаний. Например, при 500 °С дрейф может составить 0,35 °С через 1000 часов работы.

Факторами, влияющими на стабильность ТС, могут быть термические и механические на-

пряжения, которые вызывают физические изменения в кристаллической структуре платины, приводящие к отклонению от штатной кривой зависимости сопротивления от температуры. Химические реакции, в которых участвует платина и примеси, а также перенос внутренних материалов, также могут оказывать влияние на стабильность ТС. Эксплуатация при повышенных температурах увеличивает скорость химических реакций, чем вызывает увеличение дрейфа показаний. Дрейф, вызванный этими условиями, обычно не является катастрофическим и его можно считать очень маленьким при эксплуатации при температурах ниже 300 °С (обычно изменение в точке $R_0 < \pm 0,05$ °С).

Периодическое повторение режимов работы также вносит небольшой вклад в дрейф показаний, который увеличивается по мере роста количества накопленных периодических циклов повторения режимов работы и максимальной температуры, достигаемой в каждом цикле. Обычно этот вклад пренебрежимо мал.

Ещё одним фактором влияния на стабильность ТС может быть шунтирующий эффект из-за снижения сопротивления изоляции. Для ТС под сопротивлением изоляции понимают электрическое сопротивление между внешними выводами ТС и защитным корпусом, а также между цепями ТС с двумя или более ЧЭ при комнатной или другой заданной температуре. Корпус ТС для защиты от внешней среды обычно заполняется неорганической изоляцией, которая снижает воздействие вибрации и ударов на ТС. Однако материалы такой изоляции в большой степени гигроскопичны и при попадании небольшого количества влаги в ТС происходит эффект шунтирования ЧЭ. Кроме того, электрическое сопротивление изоляции зависит от температурных условий эксплуатации. Для ТС электрическое сопротивление изоляции при различных температурах согласно требованиям стандарта должно быть не менее значений, указанных в табл. 3 [8].

Таблица 3

Нормированные значения электрического сопротивления изоляции ТС

Диапазон температур, °С	Электрическое сопротивление изоляции, МОм
15–35	100
100–250	20
251–450	2
451–650	0,5
651–850	0,2

При эксплуатационных условиях, когда шунтирующий эффект сопротивления изоляции может оказывать существенное влияние, для из-

мерения температуры используют модели ТС с низкоомными значениями номинальных сопротивлений R_0 , однако в этом случае учитываются ограничения, связанные с уменьшением разрешающей способности ТС и увеличением влияния сопротивлений подводящих проводов на точность измерения. Если условия эксплуатации таковы, что шунтирующий эффект сопротивления изоляции проявляется незначительно, предпочтительнее использовать модели ТС с высокоомными значениями номинальных сопротивлений R_0 , дающим большее разрешение и тем самым обеспечивающим более точное измерение.

Для контроля температуры на элементах конструкции КА, обеспечивающих тепловой режим бортовой аппаратуры, используют только первичные преобразователи, монтируемые на поверхности. С учётом реальных эксплуатационных ограничений, накладываемых на первичные преобразователи, и различных факторов, влияющих на точность и стабильность измерения температуры, наиболее часто применяют для поверхностного монтажа несколько видов двухпроводных ТС с ЧЭ из меди типа

ТМ (модификации ТМ 293-05 и ТМ 293-06) и платины типов ТП (с разделкой токовыводов – модификация ТП 110-11) и ТЭП (без разделки токовыводов ЧЭ – модификации ТЭП 012-05 и ТЭП 018-06) с номинальными сопротивлениями 100 Ом (низкоомные) и 500 Ом (высокоомные), основные технические характеристики которых приведены в табл. 4.

Для измерения температуры все приведённые в табл. 4 двухпроводные типы ТС могут быть подключены к измерительному прибору по трёх- или четырёхпроводной схеме измерения с помощью дополнительных удлинительных проводов. Модификации ТС с платиновыми ЧЭ типа ТЭП 012-05 и ТЭП 018-06 изготавливают без разделки выводов, что позволяет соединять дополнительные удлинительные провода непосредственно на выводах ЧЭ без использования соединителей, тем самым исключив в линиях связи влияние сопротивлений их контактов на точность измерения. Такое решение может быть особенно полезным, если требуется получить повышенную точность и стабильность результатов измерения при трёхпроводной схеме подключения.

Таблица 4

Основные технические характеристики типов ТС, наиболее часто используемых для контроля температуры на элементах конструкции КА

Тип ТС	ТМ 293-05	ТМ 293-06	ТП 110-11	ТЭП 012-05	ТЭП 018-06
Фотография ТС (внешний вид)					
Наименование	Медный ЧЭ БЫ2.821.293ТУ		Платиновый ЧЭ БЫ2.821.110ТУ	Платиновый ЧЭ БЫ6.036.012ТУ	Платиновый ЧЭ БЫ6.036.012ТУ
Назначение	Измерение температуры плоской поверхности		Измерение температуры плоской поверхности	Измерение температуры поверхности трубопроводов	Измерение температуры плоской поверхности
Диапазон измерения, °С	-196 ... +200		-260 ... +300	-260 ... +300	-260 ... +300
Номинальное сопротивление, при 0 °С, Ом	100	500	100	100	500
Температурный коэффициент сопротивления, 1/°С	0,00428		0,00391	0,00391	0,00391
Измерительный ток, мА, не более	3	1	3	3	1
Показатель термической инерции, с, не более	0,3		0,01	0,01	0,01
Сопротивление изоляции в НУ, МОм, не менее	20		20	20	20

Заключение

Модификации ТС с медными ЧЭ имеют большую тепловую инерцию и применяются

там, где быстроедействие не является определяющим фактором при измерении температуры. Модификации ТС с платиновыми ЧЭ имеют меньшую тепловую инерцию, поэтому их применяют в

том случае, если при измерении температуры требуется более высокое быстродействие.

Выбор различных номинальных сопротивлений ТС обусловлен необходимостью контроля температуры на различных элементах конструкции КА в различных рабочих диапазонах измерения. Низкоомные ТС с номинальным сопротивлением 100 Ом имеют меньшее разрешение, поэтому используются для контроля температур в широком диапазоне измерения. Как правило, в этом случае не предъявляются высокие требования к точности

и стабильности измерения. Высокоомные ТС с номинальным сопротивлением 500 Ом, напротив, имеют большее разрешение, поэтому используются для контроля температур в более узком диапазоне измерения, в котором необходимо поддерживать высокую точность и стабильность измерения.

Все приведённые различия в технических характеристиках рассмотренных ТС и условий их применения необходимо учитывать при определении структуры унифицированного многоканального ИМКТ.

Список литературы

- [1] Горностаев А. И., Капустин А. Н., Зубавичус В. А., Колесников С. М. Применение магистрально-модульного принципа при построении бортовой аппаратуры бортового комплекса управления космических аппаратов // Материалы XIII Международной научной конференции «Решетневские чтения» / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2009. Ч. 1. С. 20–22.
- [2] Горностаев А. И. Унификация интерфейсных модулей сопряжения блоков бортового комплекса управления // Известия вузов. Приборостроение. 2011. № 4. С. 13–18.
- [3] Ощепкова Д. Г., Долганов Е. С., Горностаев А. И. Проектирование унифицированных модулей приборов бортового комплекса управления космических аппаратов с применением микроконтроллеров // Материалы XVIII Международной научной конференции «Решетневские чтения» / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 238–240.
- [4] Горностаев А. И., Тульский И. Н., Ощепкова Д. Г. Экспериментальный блок коммутации нагревателей модуля системы прецизионной термостабилизации // Материалы XVII Международной научной конференции «Решетневские чтения» / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2013. Ч. 1. С. 9–12.
- [5] Горностаев А. И. Блок управления нагревателями аппаратуры космического аппарата. Пат. № 2660098, Российская Федерация, 2018, бюл. № 19.
- [6] Чеботарев В. Е., Деревянко В. А., Макуха А. В., Бакиров М. Т. Космический эксперимент по прецизионной термостабилизации квантовых стандартов частоты навигационных спутников // Космические аппараты и технологии. 2018. Т. 2. № 4. С. 187–191.
- [7] ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральной последовательной системы электронных модулей. Общие требования. М. : Изд-во стандартов, 2003.
- [8] ГОСТ 6651-2009. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытания.
- [9] Международный стандарт МЭК 60751 (2008-07). Промышленные чувствительные элементы термопреобразователей сопротивления из платины (Industrial platinum resistance thermometers and platinum sensors).
- [10] Термопреобразователи сопротивления. Виды, устройство, монтаж, подключение термопреобразователей сопротивления [Электронный ресурс]. URL: http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_1517.html (дата обращения: 15.04.2019).

PROBLEMS OF UNIFICATION OF MULTI-CHANNEL INTERFACE TEMPERATURE CONTROL MODULE FOR MEASURING INSTRUMENTS OF SPACECRAFT

A. I. Gornostaev

*JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation*

An important stage in the development of a unified multichannel interface module for temperature control, which is part of the measuring instruments and that monitors the temperature on the structural elements

of the spacecraft, is the analysis of technical requirements for measuring instruments and their operating conditions that can affect the structure of the module.

The article is devoted to the analysis of general requirements for measuring instruments of spacecraft, built on the basis of the main-modular principle based on the central instrument module and containing an interface module for temperature control, as well as the analysis of the technical characteristics of primary converters connected to measuring instruments of various types.

It is shown that the interface modules for temperature control, which have control channels with different measuring ranges, have different requirements for accuracy and stability of temperature measurement, and thermal transducers of resistance with copper and platinum sensors with nominal resistances 100 Ohm and 500 Ohm of are most often used as primary transducers for temperature control. With low requirements for accuracy and stability of temperature measurement 100-Ohm thermal converters are used, with increased requirements for accuracy and stability of temperature measurement resort to the use of 500-Ohm thermal converters. If a high speed temperature measurement is not required, then resistance thermal converters with copper sensors are used. If you need high performance and increased measurement stability, then use thermal converters of resistance with platinum sensitive elements.

Keywords: spacecraft, temperature control, measurement accuracy and stability, measuring instrument, primary converter, thermal resistance converter.

References

- [1] Gornostaev A. I., Kapustin A. N., Zubavichus V. A., Kolesnikov S. M. *Primeneniye magistral'no-modul'nogo printsipa pri postroyenii bortovoy apparatury bortovogo kompleksa upravleniya kosmicheskikh apparatov* [The use of the trunk-modular principle in the construction of the onboard equipment of the onboard complex control spacecraft]. *Materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Reshetnevskie chteniya»*. Sib. gos. aerokosmicheskiy un-t. Krasnoyarsk, 2009, part 1, pp. 20–22. (In Russian)
- [2] Gornostaev A. I. *Unifikatsiya interfeysnykh moduley sopryazheniya blokov bortovogo kompleksa upravleniya* [Unification of interface modules for interfacing the onboard control complex unit]. Proceedings of the universities. Instrument making, 2011, no. 4. pp. 13–18. (In Russian)
- [3] Oshchepkova D. G., Dolganov E. S., Gornostaev A. I. *Proyektirovaniye unifitsirovannykh moduley priborov bortovogo kompleksa upravleniya kosmicheskikh apparatov s primeneniyyem mikrokontrollerov* [The design of the standardized modules of the devices of the onboard control complex of spacecrafts with the use of microcontrollers]. *Materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Reshetnevskie chteniya»*. Sib. gos. aerokosmicheskiy un-t. Krasnoyarsk, 2014, part 1, pp. 238–240. (In Russian)
- [4] Gornostaev A. I., Tul'skiy, I. N., Oshchepkova D. G. *Eksperimental'nyy blok kommutatsii nagrevateley modulya sistemy pretsizionnoy termostabilizatsii* [Experimental switching unit of the heaters of the module of the system of precision thermal stabilization]. *Materialy XVII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Reshetnevskie chteniya»*. Sib. gos. aerokosmicheskiy un-t. Krasnoyarsk, 2013, part 1, pp. 9–12. (In Russian)
- [5] Gornostaev A. I. *Blok upravleniya nagrevatelyami apparatury kosmicheskogo apparata* [Control unit for space vehicle equipment heaters]. Patent RU 2660098, 2018, bulletin no. 19. (In Russian)
- [6] Chebotarev V. E., Derevyanko V. A., Makukha A. V., Bakirov M. T. Space experiment for precision thermal stabilization of quantum frequency standards for navigation satellites // *Spacecraft and technologies*, 2018, vol. 2, no. 4, pp. 187–191. doi: 10.26732/2618-7957-2018-4-187-191
- [7] GOST R 52070-2003. *Interfeys magistral'nyy posledovatel'nyy sistemy elektronnykh moduley. Obshchiye trebovaniya* [Interface main serial system of electronic modules. General requirements]. Moscow, Publication of standards, 2003. (In Russian)
- [8] GOST 6651-2009. *Termopreobrazovateli soprotivleniya iz platiny, medi i nikelya. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya i metody ispytaniya* [Thermal converters resistance from platinum, copper and nickel. General technical requirements and test methods]. (In Russian)
- [9] International standard IEC 60751 (2008-07). Industrial sensitive elements of the thermocouples of resistance made of platinum (Industrial platinum resistance thermometers and platinum sensors).
- [10] Thermal resistance transducers. Types, structure, installation, connection of resistance thermometers. Available at: http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_1517.html (accessed: 15.04.2019).