

## Измерение термодинамической температуры высокотемпературных реперных точек

Б. Б. ХЛЕВНОЙ, В. Р. ГАВРИЛОВ, Д. А. ОТРЯСКИН, И. А. ГРИГОРЬЕВА,  
М. В. СОЛОДИЛОВ, М. Л. САМОЙЛОВ, В. И. САПРИЦКИЙ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,  
Москва, Россия, e-mail: gavrilov@vniiofi.ru

Проведены измерения термодинамической температуры высокотемпературных реперных точек на основе металлоуглеродных эвтектик кобальт — углерод, платина — углерод и рений — углерод с использованием радиационного термометра в режиме яркости. Калибровка данного термометра выполнена при помощи высокотемпературной модели черного тела и фильтрового радиометра с известной спектральной чувствительностью в режиме освещенности.

**Ключевые слова:** радиационная термометрия, высокотемпературная реперная точка, термодинамическая температура, спектральная чувствительность.

*The measurements of thermodynamic temperature of high-temperature fixed points based on the metal-carbon eutectics of Co-C, Pt-C and Re-C by means of radiation thermometer in radiance mode were carried out. The instrument was calibrated by means of a high-temperature blackbody model and a filter radiometer with known spectral sensitivity in illuminance mode.*

**Key words:** radiation thermometry, high-temperature fixed point, thermodynamic temperature, spectral sensitivity.

Реперные точки широко используются для построения температурных шкал и практической работы в области термометрии и радиометрии. В последние годы активно развивается новое поколение высокотемпературных реперных точек (ВТРТ) на фазовых переходах плавления металлоуглеродных эвтектических и перитектических соединений [1]. Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ) принимает активное участие в создании ВТРТ на основе следующих эвтектических соединений: кобальт — углерод Co-C (1598 К), платина — углерод Pt-C (2011 К), рений — углерод Re-C (2748 К), карбид титана — углерод TiC-C (3033 К), карбид циркония — углерод ZrC-C (3155 К), карбид гафния — углерод HfC-C (3459 К); перитектического соединения карбид вольфрама — углерод WC-C (3021 К) [2—4]. Измерения термодинамической температуры точек плавления трех металлоуглеродных эвтектик Co-C, Pt-C и Re-C проводили в лабораториях ряда национальных метрологических институтов, в том числе во ВНИИОФИ, в рамках международного проекта по исследованию ВТРТ, инициированного Консультативным комитетом по термометрии МБМВ [5]. Данная статья посвящена процедуре и результатам измерений, выполненных во ВНИИОФИ.

**Метод измерения.** Термодинамическую температуру ВТРТ измеряли при помощи радиационного термометра (РТ) в режиме яркости [6]. Его калибровку по температуре проводили с использованием высокотемпературной модели черного тела (МЧТ) [7] в качестве планковского излучателя и фильтрового радиометра (ФР) с известной спектральной чувствительностью в режиме освещенности для измерений температуры излучения МЧТ. Полностью схема измерений изображена на рис. 1 и состоит из следующих этапов:

измерение спектральной чувствительности трап-детектора (ТД) по потоку при помощи абсолютного криогенного радиометра;

оснащение ТД прецизионной апертурной диафрагмой с измеренной площадью; пересчет его спектральной чувствительности по потоку в спектральную чувствительность к освещенности;

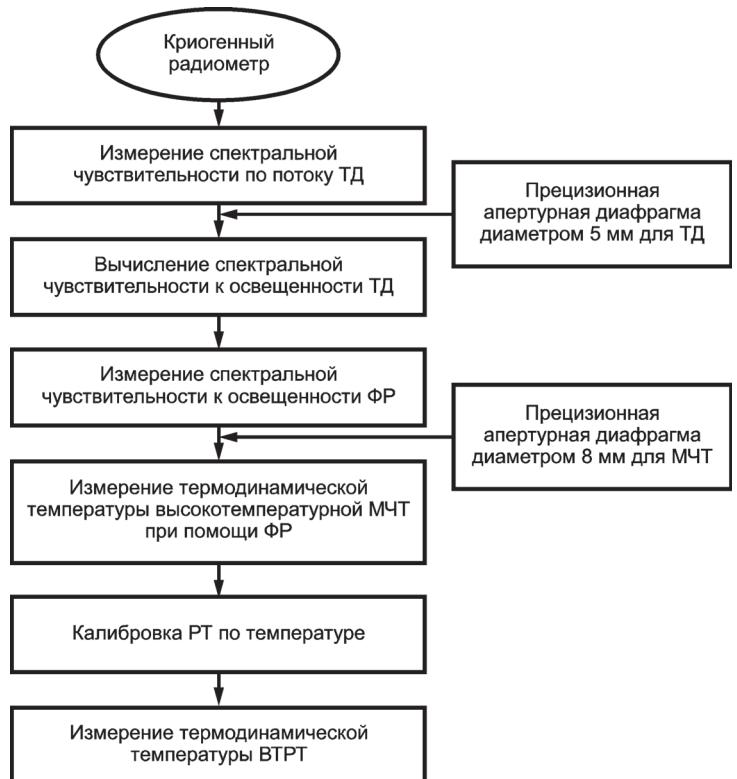


Рис. 1. Схема измерений термодинамической температуры высокотемпературной реперной точки (ВТРТ):

ТД — трап-детектор; ФР — фильтровый радиометр; МЧТ — модель черного тела; РТ — радиационный термометр

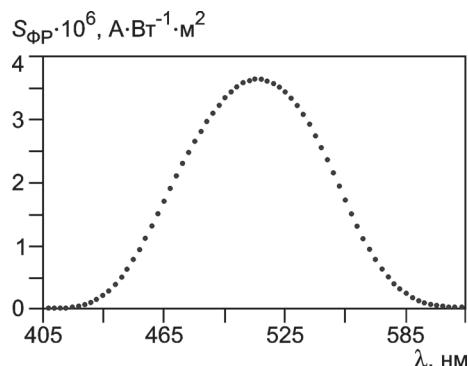


Рис. 2. Спектральная чувствительность фильтрового радиометра

измерение спектральной чувствительности к освещенности ФР путем сравнения его сигналов и сигналов ТД на специальной установке — спектральном компараторе, основой которого является прецизионный двойной дифракционный монохроматор;

измерение температуры высокотемпературной МЧТ, снабженной прецизионной апертурной диафрагмой, с использованием ФР;

калибровка РТ по температуре;

наблюдения плато плавления ВТРТ при помощи РТ и определение термодинамической температуры ВТРТ как точки перегиба (смены направления выпуклости графика зависимости температуры от времени) плато плавления.

**Измерительное оборудование.** Трап-детектор представляет собой приемник излучения, состоящий из трех включенных последовательно кремниевых фотодиодов Hamamatsu S1337—1010. Спектральная чувствительность ТД по потоку измерена на шести длинах волн лазерного излучения (406,7; 413,1; 482,5; 530,9; 568,2; 647,1 нм) с относительной расширенной неопределенностью 0,02 %. Диаметр коллимированного лазерного луча при этом составлял

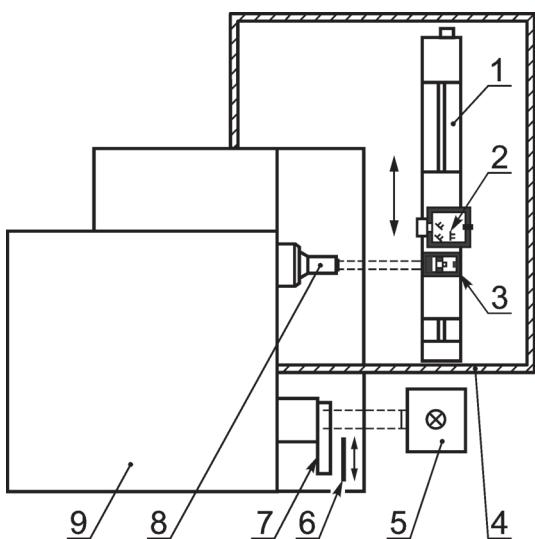


Рис. 3. Схема спектрального компаратора:

1 — подвижная платформа; 2 — трап-детектор; 3 — фильтровый радиометр; 4 — светозащитный кожух; 5 — галогенная лампа; 6 — заслонка входной щели монохроматора; 7 — фильтровое колесо; 8 — объектив выходной щели монохроматора; 9 — двойной дифракционный монохроматор

приблизительно 4 мм. Измерения проводили при комнатной температуре  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ . В дальнейшем применяли водяное охлаждение ТД, и его температура стабилизировалась на уровне  $(20,0 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ . Для проведения последующих измерений ТД оснащали прецизионной апертурной диафрагмой из золоченой бронзы диаметром 5,1212 мм (стандартная неопределенность измерения 0,02 %).

**Фильтровый радиометр.** В проведенных измерениях были использованы три одинаковых ФР, каждый из которых собран на основе кремниевого фотодиода Hamamatsu S1227BQ, двух стеклянных фильтров С3С22 и С3С8 [8] и металлической апертурной диафрагмы диаметром 5 мм и толщиной 0,1 мм. Фильтровый радиометр устанавливали в водоохлаждаемый радиатор, температуру которого поддерживали на уровне  $(20,0 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ . Характерный вид кривой спектральной чувствительности ФР приведен на рис. 2.

**Спектральный компаратор.** Спектральную чувствительность ФР измеряли методом компарирования с ТД при помощи спектрального компаратора (рис. 3). На подвижной платформе 1 на расстоянии около 1 м от выходной щели прецизионного двойного дифракционного монохроматора 9 установлены ФР 3 и ТД 2. Используемый монохроматор характеризуется низким уровнем рассеянного света ( $10^{-14}$ ) и высокой воспроизводимостью длины волны ( $\leq 0,01$  нм). Его входная щель, перед которой установлены фильтровое колесо 7 и заслонка 6, освещается галогенной лампой 5 с использованием фокусирующей линзы. Выходная щель монохроматора оснащена объективом 8, образующим параллельный пучок излучения, перекрывающий апертуры ФР и ТД. Спектральный компаратор имеет светозащитный кожух 4.

**Радиационный термометр.** В измерениях применяли два РТ типа TSP (Transfer Standard Pyrometer), изготовленных в лаборатории ВНИИОФИ и имеющих сходное устройство. Они собраны на основе кремниевого фотодиода Hamamatsu S1337—1010BQ и интерференционного фильтра с центральной длиной волны 650 нм и полосой пропускания около 20 нм. В рабочем положении РТ находился на расстоянии около 750 мм от объекта наблюдения, при этом размеры наблюдаемого пятна составили  $1,0 \times 1,5$  мм. Такой термометр характеризуется слабой, но непрненебрежимой, зависимостью выходного сигнала от расстояния до наблюдаемого объекта, поэтому фокусировка его линз оставалась неизменной в течение всей процедуры.

**Установка для измерений термодинамической температуры высокотемпературной МЧТ и калибровки радиационных термометров.** Схема установки и ее основные элементы приведены на рис. 4. В ее состав также входят микрометр для измерения расстояния между диафрагмой и ФР, цифровой вольтметр, усилитель и контроллер управления подвижной платформой.

В качестве излучателя использована высокотемпературная МЧТ типа ВВ3500М с цилиндрической полостью из пиролитического графита, диаметр которой 38 мм, глубина 200 мм, диаметр выходного отверстия 24 мм. Согласно проведенному исследованию эффективная излучательная способность данной МЧТ имеет значение 0,9995 со стандартной неопределенностью 0,03 %. Указанная высокотемпературная МЧТ оснащена системой обратной связи контроля температуры, обеспечивающей высокий уровень стабильности. Стабильность МЧТ контролировали путем измерений

сигналов ФР до и после измерения сигнала РТ, при этом нестабильность температуры на уровне точки плавления Re-C не превышала 0,02 К. Прецизионная апертурная диафрагма МЧТ изготовлена из позолоченной бронзы. Диаметр диафрагмы измерен со стандартной неопределенностью 0,001 мм и составляет около 8 мм. При проведении измерений температуру диафрагмы поддерживали на уровне  $(20,0 \pm 0,2)$  °C.

Сигнал ФР измеряли усилителем фототока и мультиметром Keithley 2000. Стандартная неопределенность результатов измерений составила 0,007 % на уровне реперной точки Re-C (при фототоке 4 мкА); 0,009 % на уровне реперной точки Pt-C (при фототоке 0,1 мкА); 0,011 % на уровне реперной точки Co-C (при фототоке 0,003 мкА).

Установка для измерения BTPT состоит из следующих основных элементов: высокотемпературной МЧТ типа BB3200pg с установленной внутри ее полости ячейкой BTPT; радиационных термометров типа TSP и передвижной платформы для их позиционирования. При этом расстояние между каждым РТ и ячейкой сохранялось таким же, как и расстояние между прецизионной апертурной диафрагмой МЧТ типа BB3500M и РТ при его калибровке по температуре.

Предварительно полученное пространственное распределение спектральной плотности энергетической яркости (на длине волны 650 нм) МЧТ типа BB3200pg на уровнях температур реперных точек Re-C, Pt-C и Co-C использовали для оценки эффективного размера источника при последующих измерениях BTPT.

**Процедура измерения.** Определение спектральной чувствительности ФР. Спектральную чувствительность к освещенности вычисляли как

$$S_{\text{ФР}}(\lambda) = R_{\text{ФР/ТД}}(\lambda) S_{\text{ТД}}(\lambda) \pi d^2/4,$$

где  $S_{\text{ТД}}(\lambda)$  — спектральная чувствительность к освещенности ТД;  $d$  — диаметр прецизионной апертурной диафрагмы ТД;  $R_{\text{ФР/ТД}}(\lambda)$  — отношение измеренных сигналов ФР и ТД,

$$R_{\text{ФР/ТД}}(\lambda) = \frac{\left( i_{1\text{ФР}}(\lambda) - i_{1\text{ФР}}^T \right) + \left( i_{2\text{ФР}}(\lambda) - i_{2\text{ФР}}^T \right)}{\left( i_{1\text{ТД}}(\lambda) - i_{1\text{ТД}}^T \right) + \left( i_{2\text{ТД}}(\lambda) - i_{2\text{ТД}}^T \right)}. \quad (1)$$

Указанные в (1) сигналы измеряли при помощи спектрального компаратора (см. рис. 3). Сначала в спектральном интервале 400—620 нм с шагом 3 нм были определены сигналы ТД  $i_{1\text{ТД}}(\lambda)$  и его темнового тока  $i_{1\text{ТД}}^T$ , потом аналогичным образом сигналы ФР  $i_{1\text{ФР}}(\lambda)$  и его темновой ток  $i_{1\text{ФР}}^T$ . Далее был проведен второй цикл, только сначала для ФР, а затем для ТД, и получены соответствующие значения  $i_{2\text{ФР}}(\lambda)$ ,  $i_{2\text{ФР}}^T$  и  $i_{2\text{ТД}}(\lambda)$ ,  $i_{2\text{ТД}}^T$ .

Измерение термодинамической температуры МЧТ и калибровка РТ. Температуру  $T$  высокотемпературной МЧТ типа BB3500M определяли как результат численного решения уравнения

$$i_{\text{ФР}} = (\pi D^2 / (4l^2)) \varepsilon_{\text{э}} \int_{\lambda} F(\lambda) L_{\text{МЧТ}}(\lambda, T) S_{\text{ФР}}(\lambda) d\lambda,$$

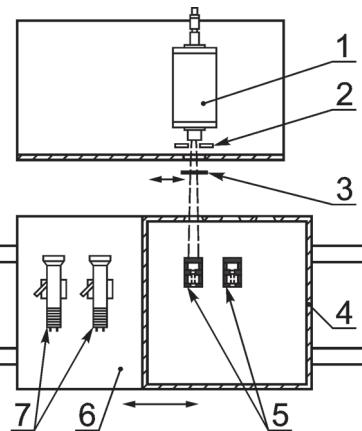


Рис. 4. Схема установки для измерений температуры высокотемпературной МЧТ и калибровки РТ:

1 — высокотемпературная МЧТ типа BB3500M с перестраиваемой температурой; 2 — прецизионная апертурная диафрагма; 3 — застопонка; 4 — светозащитный кожух; 5 — фильтровые радиометры; 6 — подвижная платформа; 7 — радиационные термометры

где  $D$  — диаметр апертурной диафрагмы МЧТ;  $l$  — расстояние между ФР и апертурной диафрагмой МЧТ;  $\varepsilon_{\text{э}}$  — излучательная способность МЧТ;  $F(\lambda)$  — поправка на дифракцию.

Спектральная плотность энергетической яркости МЧТ определяется законом Планка

$$L_{\text{МЧТ}}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi \lambda^5 n^2} \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T n}\right) - 1 \right]^{-1},$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $T$  — термодинамическая температура МЧТ;  $n$  — показатель преломления воздуха;  $c_1$ ,  $c_2$  — первая и вторая радиационные постоянные.

В процессе измерений температуры МЧТ фильтровым радиометром на прецизионной апертурной диафрагме происходит дифракция, которая приводит к потере части потока излучения, вычисляемого в соответствии с представлениями геометрической оптики. Учет дифракционных потерь в линейном по длине волны приближении обуславливает возникновение поправочного множителя

$$F(\lambda) = 1 - \frac{d_{\text{ФР}}}{4\pi^2 r_a r_d} \ln \left[ \frac{(r_i/d_i + r_{\text{ФР}}/d_{\text{ФР}})^2 - (r_a/d_i + r_a/d_{\text{ФР}})^2}{(r_i/d_i - r_{\text{ФР}}/d_{\text{ФР}})^2 - (r_a/d_i + r_a/d_{\text{ФР}})^2} \right] \lambda.$$

Здесь  $r_i$ ,  $r_a$ ,  $r_{\text{ФР}}$  — радиусы выходного отверстия и апертурной диафрагмы МЧТ, диафрагмы ФР, соответственно,  $r_i = 7,25$  мм,  $r_a = 4$  мм,  $r_{\text{ФР}} = 2,5$  мм;  $d_i$  — расстояние между выходным отверстием и апертурной диафрагмой МЧТ,  $d_i = 148$  мм;  $d_{\text{ФР}}$  — расстояние между апертурными диафрагмами МЧТ и ФР,  $d_{\text{ФР}} = 711$  мм.

Измерения проводили на нескольких уровнях температуры вблизи температур реперных точек Co-C, Pt-C и Re-C. На каждом уровне сразу же вслед за измерением при помощи ФР фиксировали сигнал РТ и таким образом его калибровали. Калибровку РТ повторяли несколько раз в течение нескольких дней.

## Теплофизические измерения

**Результаты измерений BTPT.** Результаты измерений термодинамической температуры BTPT Co-C, Pt-C, Re-C и соответствующие суммарные стандартные неопределенности измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

### Результаты измерений термодинамической температуры BTPT

Термодинамическая температура BTPT, К (°C)	Co-C	Pt-C	Re-C
	1597,62 (1324,47)	2011,26 (1738,11)	2747,66 (2474,51)
Суммарная стандартная неопределенность, К	0,18	0,27	0,48

**Бюджет неопределенностей** измерений термодинамической температуры BTPT, тип соответствующей стандартной неопределенности и ее вклад в суммарную стандартную неопределенность, рассчитанную как корень квадратный из суммы квадратов всех составляющих, приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Бюджет неопределенностей измерений

Источник неопределенности	Тип	Значение составляющей неопределенности при измерениях термодинамической температуры BTPT, К		
		Co-C	Pt-C	Re-C
<b>Измерения спектральной чувствительности ФР</b>				
Спектральная чувствительность ТД (0,01 %)	B	0,01	0,02	0,03
Диаметр апертурной диафрагмы ТД (0,02 %)	B	0,04	0,06	0,12
Установка длины волны (0,02 нм)	B	0,02	0,04	0,07
Воспроизводимость спектральной чувствительности ФР	A	0,07	0,11	0,20
Неэквивалентность потоков излучения, измеренных ФР и ТД	B	0,10	0,16	0,30
<b>Измерение термодинамической температуры МЧТ ВВ3500М. Калибровка радиационного термометра</b>				
Сигнал ФР	A	0,01	0,01	0,02
Расхождение между результатами измерений, полученными с использованием разных ФР	B	0,08	0,10	0,20
Эффективная излучательная способность МЧТ (измерения ФР)	B	0,02	0,03	0,05
Диаметр апертурной диафрагмы МЧТ	B	0,02	0,04	0,07
Расстояние между апертурными диафрагмами ФР и МЧТ	B	0,02	0,04	0,06
Поправочный коэффициент на дифракцию	B	0,02	0,04	0,07

### Окончание таблицы 2

Источник неопределенности	Тип	Значение составляющей неопределенности при измерениях термодинамической температуры BTPT, К		
		Co-C	Pt-C	Re-C
Неоднородность МЧТ	B	0,03	0,05	0,10
Эффективная излучательная способность МЧТ (измерения PT)	B	0,02	0,03	0,06
Воспроизводимость калибровки PT	A	0,02	0,05	0,03
<b>Измерение BTPT</b>				
Воспроизводимость BTPT	A	0,02	0,02	0,03
Эффект размера источника	B	0,06	0,07	0,10
Определение точки перегиба плато плавления	B	0,01	0,01	0,01
Долговременная стабильность PT	B	0,01	0,02	0,05
<b>Суммарная стандартная неопределенность измерения температуры BTPT, К</b>		<b>0,18</b>	<b>0,27</b>	<b>0,48</b>

**Заключение.** Лаборатории ВНИИОФИ и национальных метрологических центров ведущих стран активно участвуют в реализации международного проекта по исследованию BTPT. В ходе проведенной работы с использованием измерительного оборудования ВНИИОФИ — уникальной установки, стенда (УСУ) — были с высокой точностью измерены BTPT на основе эвтектик Co-C, Pt-C и Re-C, которые являются кандидатами на введение в международную температурную шкалу. Создание новой температурной шкалы запланировано Консультативным комитетом по термометрии МБМВ предположительно на 2014 г.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 14.518.11.7050).

### Литература

1. Yamada Y. e. a. Proceedings of Tempmeko 1999 / Ed. J. F. Dubbeldam, M. J. de Groot. Delft: NMi Van Swinden Laboratory, 1999. P. 53—540.
2. Khlevnov B. B. e. a. // Proc. 9th Int. Symp. on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science (TEMPMEKO 2004) / Ed. L. G. Bermanec, T. Stasic, T. Veliki. Cavtat-Dubrovnik, 2004. P. 203—208.
3. Khlevnov B. B., Grigoryeva I. A., Otryaskin D. A. Development and investigation of WC-C fixed-point cells // Metrologia. 2012. V. 49. N 2. P. S59—S67.
4. Хлевной Б. Б. и др. Сравнительное исследование ампул реперной точки плавления эвтектики кобальт-углерод, созданных во ВНИИМ и ВНИИОФИ // Измерительная техника. 2013. № 1. С. 49—53.

5. **Machin G. e. a.** Concerted International Project to Establish High-Temperature Fixed Points for Primary Thermometry // Int. J. Thermophys. 2007. V. 28. N 6. P. 1976—1982.

6. **Samoylov M. e. a.** High accuracy radiation TSP-type thermometers for radiometric scale realization in the temperature range from 600 to 3200 °C // AIP Conf. Proc. 2003. V. 684. P. 583.

7. **Khlevnov B. B. e. a.** Development of high-temperature blackbodies and furnaces for radiation thermometry // Int. J. Thermophys. 2011. V. 32. N 7—8. P. 1686—1696.

8. **ГОСТ 9411—91.** Стекло оптическое цветное. Технические условия.

Дата принятия 13.09.2012 г.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.142.681

# Шум квантования дельта-сигма аналого-цифрового преобразователя для различных законов изменения входного сигнала

В. И. ДИДЕНКО\*, А. В. ИВАНОВ\*\*, А. С. ВОРОНОВ\*\*

\* Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия,  
e-mail: didenkov@mail.ru

\*\* ОАО «Московское конструкторское бюро «Компас», Москва, Россия

Рассмотрены шумы квантования на выходах модулятора и цифрового фильтра дельта-сигма аналого-цифрового преобразователя. Аналитическое и имитационное моделирование использовано при различных законах изменения входного сигнала и для различной реализации цифрового фильтра.

**Ключевые слова:** дельта-сигма аналого-цифровой преобразователь, шум квантования.

Quantization noise is investigated at the outputs of a modulator and a digital filter for delta-sigma analog-to-digital converter (ADC). Modeling and simulation were used for different laws of input signal change and several realizations of the digital filter.

**Key words:** delta-sigma ADC, quantization noise.

Дельта-сигма аналого-цифровой преобразователь (ДСАЦП) состоит из дельта-сигма модулятора (ДСМ) и цифрового фильтра (ЦФ). Модулятор можно рассматривать как стохастический аналого-цифровой преобразователь (АЦП) [1]. Это означает, что для постоянного входного сигнала на его выходе образуется последовательность кодов, причем входной сигнал влияет на вероятность появления того или иного значения кода. Для многих модуляторов имеется только два выходных кода: 1 и -1. Для ДСМ с единичным номинальным коэффициентом передачи код 1 соответствует опорному напряжению  $V_{\text{оп}}$ , а код -1 — тому же опорному напряжению с обратным знаком. Если ДСМ имеет коэффициент передачи  $K_m$ , то код 1 соответствует напряжению, в  $K_m$  раз меньше опорного. В дальнейшем полагаем  $K_m = 1$ .

По аналогии с детерминированными АЦП [2] шум квантования ДСМ ранее предполагали распределенным по закону равномерной плотности [3, 4] вне зависимости от входно-

го сигнала  $V_X$ . Среднее квадратическое отклонение (СКО) для ДСМ принимали, как и для АЦП с детерминированной функцией преобразования:

$$\sigma_q^2 = 1/3. \quad (1)$$

Ошибочность этого, к сожалению общепринятого, подхода была показана в [1, 5—7]. Истинное значение СКО шума квантования согласно аналитическому и имитационному моделированию для ДСМ при постоянном входном сигнале  $X = V_X/V_{\text{оп}}$  находится как [1]:

$$\sigma_q^2 = 1 - X^2. \quad (2)$$

Нетрудно заметить, что при  $-1 \leq X \leq 1$  отличия между (1) и (2) могут быть весьма значительными.