

## К РАСЧЕТУ ДОСТОВЕРНОСТИ МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2017 О.В. Теряева, В.М. Гречишников

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 31.08.2017

В статье разрабатывается методика расчета достоверности мультисенсорных преобразователей информации. Приводятся математические выражения для расчета погрешностей цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразователей, исходя из обеспечения максимальной достоверности преобразования мультисенсорных преобразователей информации.

*Ключевые слова:* достоверность преобразования, погрешность, бинарные оптические сигналы.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из доминирующих трендов развития элементной базы систем управления является все более широкое использование волоконно-оптических датчиков (ВОД), которые, благодаря высокой помехозащищенности, электрической нейтральности, низкой химической активности и информационной безопасности, все более успешно конкурируют с датчиками на традиционных физических эффектах.

Одним из перспективных направлений развития ВОД является разработка мультисенсорных преобразователей информации (МСПИ), предназначенных для многоточечного контроля конечных положений объектов управления в 2D и 3D пространствах. Входными сигналами таких МСПИ являются бинарные оптические сигналы, формируемые оптическими переключателями при механическом контакте с реперными точками рабочего пространства. Примерами таких объектов являются исполнительные механизмы робототехнических комплексов, работающих «по упорам», автоматы для дуговой сварки и лазерной резки металлов, станки с ЧПУ, системы механизации крыла ЛА, задвижки нефте- и газопроводов, конвейеры и др.

Ряд новых возможностей улучшения технико-экономических показателей МСПИ открывает использование в их составе электрически нейтральных волоконно-оптических цифро-аналоговых преобразователей (ВОЦАП) с параллельной структурой, в которых в качестве первичных преобразователей используются микромеханические формирователи оптических логических сигналов.

Однако в известных работах [1, 2, 3] рассмотрены, в основном, вопросы построения МСПИ

*Теряева Ольга Викторовна, аспирант кафедры электротехники. E-mail: arefeva\_olga@inbox.ru*

*Гречишников Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники. E-mail: gv@ssau.ru*

на основе гибридных ВОЦАП, использующих в своем составе элементы различной физической природы. При этом вопросы создания МСПИ на платформе электрически пассивных ВОЦАП, несмотря на их конструктивную простоту, низкую удельную стоимость сенсорного канала и технологичность, не получили должного отражения в известных публикациях. При этом одним из основных проблем при создании МСПИ указанного класса является отсутствие методик оценки погрешностей МСПИ и их влияния на достоверность преобразования.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обобщенная функциональная схема МСПИ с использованием параллельного ВОЦАП представлена на рисунке 1. Оптический сигнал от источника излучения ИИ поступает на вход формирователя оптических логических сигналов (ФОЛС), состоящего из оптического разветвителя  $Y1$  ( $1 \times n$ ), осуществляющего равномерное деление оптической мощности излучателя между  $n$  выходными полюсами, и оптических ключей  $OK1...OKn$ . На управляющие входы ключей подаются бинарные входные сигналы в виде механических воздействий  $x_0...x_n$ . Конструктивно оптические ключи представляют собой подпружиненный шток, который при скачкообразном силовом воздействии на него изменяет светопропускание в зазоре между передающим и приемным световодами от 0 до 1.

Прошедшие через ключи бинарные оптические сигналы поступают на элементы назначения веса  $ЭНВ1...ЭНВn$ , коэффициенты передачи которых изменяются в соответствии с числовым рядом  $\{2^{-i}\}$ . Далее «взвешенные» оптические сигналы суммируются в обратном включенном разветвителе  $Y2$  ( $n \times 1$ ). Суммарный оптический сигнал с выхода  $Y2$  преобразуется с помощью фотоприемника ФП и усилителя УС в электрический сигнал, который оцифровывает-

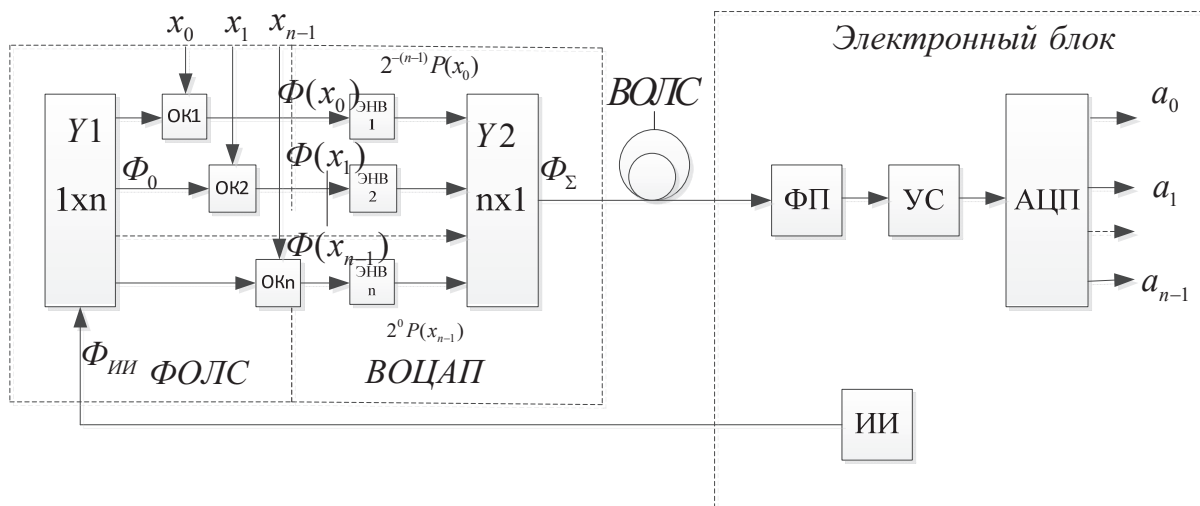


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема МСПИ

ся в АЦП. Совокупность ФП и УС будем называть в дальнейшем фотоусилителем (ФУ). При этом значения разрядных цифр выходного кода АЦП должны однозначно соответствовать значениям входных бинарных сигналов.

Обобщенную модель МСПИ можно представить в виде зависимости выходного кода АЦП от совокупности входных сигналов  $\{x_j\}$  и комплекса их конструктивных параметров МСПИ

$$N_{\text{АЦП}} = \sum_{i=0}^{n-1} a_i(\Phi_{\text{ИИ}}, K_{Y1}, K_{Y2}, S_{\text{ФП}}, K_{\text{УС}}, \vartheta_i, P_{\Sigma}^*) \cdot 2^i, \quad (1)$$

где  $a_i$  – значение разрядной цифры выходного кода АЦП, представляющее собой логическую функцию действительных переменных, заключенных в круглые скобки:  $P_{\text{ИИ}}$  – мощность источника излучения,  $K_{Y1}, K_{Y2}$  – коэффициенты деления и суммирования мощности излучателя в разветвителях  $Y1$  и  $Y2$ ,  $S_{\text{ФП}}$  – чувствительность фотоприемника,  $K_{\text{УС}}$  – коэффициент преобразования фототока в напряжение,  $\vartheta$  – коэффициент, учитывающий энергетические потери в оптической схеме МСПИ,  $\Phi_{\Sigma}^*$  – нормированная функция преобразования ВОЦАП, учитывающая пассивный характер оптической схемы [4]:

$$\Phi_{\Sigma}^* = \sum_{i=1}^{j=n} x_j 2^{-(n-i)}, \quad j = n - i. \quad (2)$$

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МСПИ

МСПИ относятся к классу цифровых преобразователей, преобразующих входной двоичный код, заданный в виде бинарных механических сигналов в эквивалентный электрический код. Электромеханическим аналогом МСПИ могут служить, например, многоканальные переключатели электрических сигналов типа П2К. В этих устройствах происходит прямое преоб-

разование положений кнопочных переключателей в выходные электрические сигналы, что обеспечивает однозначное соответствие входных механических и выходных электрических сигналов.

В отличие от указанных устройств, МСПИ содержит в своем составе аналоговые, цифро-аналоговые и аналого-цифровые функциональные элементы, выполненные на различных физических принципах. Погрешности изготовления указанных элементов могут приводить к несоответствию входного и выходного кодов [5]. Для оценки степени соответствия входного и выходного кодов МСПИ введем понятие достоверности преобразования, под которой будем понимать вероятность поразрядного совпадения компонент входного и выходного кодовых векторов МСПИ

$$P_{\text{дос}} = P \left( \begin{array}{c|c} x_0 & a_0 \\ x_1 & a_1 \\ \dots & \dots \\ x_{n-1} & a_{n-1} \end{array} \right). \quad (3)$$

Полагая события  $(x_i = a_i)$  независимыми случайными величинами, количественную оценку достоверности по результатам эксперимента можно вычислить по выражению

$$P_{\text{дос}}^* = \prod_{i=1}^n P_i^*(x_i = a_i), \quad (4)$$

где  $P_i^*(x_i = a_i)$  – оценка вероятности правильного формирования  $i$  того разряда выходного кода:

$$P_i^*(x_i = a_i) = \frac{m_i|_{x_i=a_i}}{k}. \quad (5)$$

где  $m$  – число циклов, в которых формируется истинный код,  $n$  – общее число разрядов МСПИ,  $k$  – число циклов испытаний.

Тогда

$$P_{\text{дов}}^* = \frac{\prod_{i=1}^n m_i |_{x_i=a_i}}{k^n}, \quad (6)$$

Условия формирования достоверного кода на выходе МСПИ рассмотрим с помощью диаграммы, представленной на рис. 2.

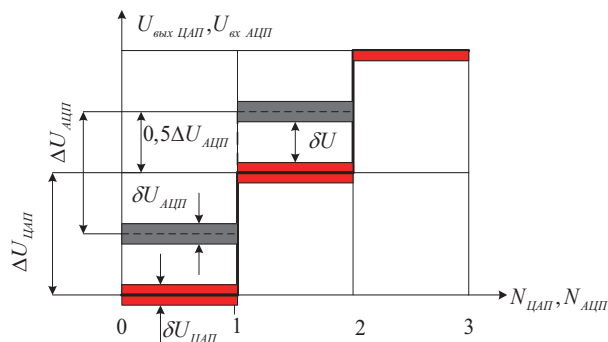


Рис. 2. Условия однозначного преобразования входного кода ВОЦАП в выходной код АЦП

Как следует из рис. 2, необходимыми и достаточными условиями обеспечения  $P_{\delta} = 1$  с учетом статических и динамических погрешностей, вызванных переходными процессами в элементах преобразователя, являются:

$$\left. \begin{aligned} & \left| \frac{\Phi_z^*(t)}{\partial t} \right| S_{\text{ФП}} \cdot R_{\text{ОС}} \cdot k \cdot z < \frac{\Delta_{\text{АЦП}}}{n 2^n} \\ & \Delta_{\text{кв АЦП}} = \Delta_{\text{кв ФУ}} \\ & \Delta_{\text{кв ФУ}} - \delta_{\text{АЦП}} - \delta_{\text{ФУ}} = \delta U > 0 \\ & z = 1 \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент передачи аналогового ключа,  $\Delta_{\text{кв АЦП}}$  и  $\Delta_{\text{кв ФУ}}$  – интервалы квантования АЦП и ФУ,  $\delta U_{\text{АЦП}}$  и  $\delta U_{\text{ФУ}}$  – интервалы неопределенности, вносимые погрешностями АЦП и ФУ, причем  $\Delta_{\text{кв ФУ}} - \delta U_{\text{АЦП}} - \delta U_{\text{ФУ}} = \delta U > 0$ , где  $\delta U$  – интервал «безопасности» между уровнями квантования АЦП и сигнала фотоусилителя.

Единичное значение параметра  $z$  наблюдается при равенстве нулю производной в (7), что соответствует окончанию переходного процесса на выходе ФУ

$$z = \begin{cases} 1 & \text{при } \left| \frac{\partial \Phi_z^*(t)}{\partial t} \right| S_{\text{ФП}} \cdot R_{\text{ОС}} \cdot k = 0 \\ 0 & \text{при } \left| \frac{\partial \Phi_z^*(t)}{\partial t} \right| S_{\text{ФП}} \cdot R_{\text{ОС}} \cdot k \geq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Если инструментальные погрешности АЦП и ФУ подчинены нормальным законам распределения с разными дисперсиями (рис. 3), то их доверительные интервалы связаны с доверительными вероятностями известными соотношениями [6]

$$\begin{aligned} P_{\delta} &= 0,67, \delta_{\delta} = \pm \sigma \\ P_{\delta} &= 0,95, \delta_{\delta} = \pm 2\sigma \\ P_{\delta} &= 0,997, \delta_{\delta} = \pm 3\sigma, \end{aligned} \quad (9)$$

Считая инструментальные погрешности ФУ и АЦП независимыми случайными величинами, вероятность истинного воспроизведения входного кода на выходе МСПИ будет равна произведению вероятностей нахождения инструментальных погрешностей в пределах доверительных интервалов погрешностей АЦП и ФУ. Например, при

$$\begin{aligned} P_{\delta_{\text{ФУ}}} &= 0,997, \delta_{\delta_{\text{ФУ}}} = \pm 3\sigma_{\text{ФУ}} < \frac{\Delta_{\text{ФУ}}}{2} \text{ и} \\ P_{\delta_{\text{АЦП}}} &= 0,997, \delta_{\delta_{\text{АЦП}}} = \pm 3\sigma_{\text{АЦП}} < \frac{\Delta_{\text{АЦП}}}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

достоверность преобразования будет равна  $P_{\delta} = P_{\delta_{\text{ФУ}}} \cdot P_{\delta_{\text{АЦП}}} = 0,994$ . Отсюда следует, что обеспечение максимальной достоверности, равной  $P_{\delta} = 0,994$ , возможно лишь в случае, когда с.к.о. погрешностей АЦП и ФУ не превышают следующих значений

$$\sigma_{\text{ФУ}} < \frac{\Delta_{\text{ФУ}}}{6}, \sigma_{\text{АЦП}} < \frac{\Delta_{\text{АЦП}}}{6}. \quad (11)$$

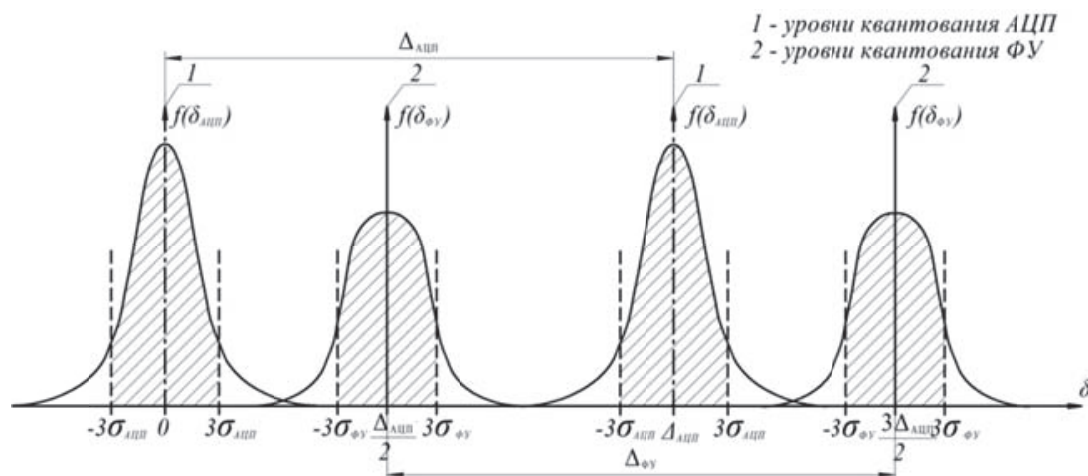


Рис. 3. Расчетная схема для определения достоверности преобразования

**РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МСПИ, ИСХОДЯ  
ИЗ ЗАДАННОЙ ДОСТОВЕРНОСТИ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

Рассмотрим методику обеспечения максимальной достоверности преобразования с учетом инструментальных погрешностей преобразования МСПИ. Будем полагать, что доминирующими факторами инструментальной являются погрешности установки весовых коэффициентов в ЭНВ, фотоусиления и аналого-цифрового преобразования сигналов.

Рассмотрим два случая формирования результирующей погрешности ВОЦАП, вызванной неточностью установки весовых коэффициентов в ЭНВ. В первом случае погрешность назначения весовых коэффициентов  $\Delta$  носит аддитивный характер. Нормированную функцию преобразования (2) можно представить в виде:

$$\Phi_{\Sigma}^* = \sum_{i=n-1}^{i=0} x_j(2^{-i} + \Delta), j = n - 1 - i, \quad (12)$$

где  $n$  – число разрядов ВОЦАП.

Поскольку все каналы ВОЦАП изготавливаются по одной и той же технологии, то значения допустимой погрешности весовых коэффициентов выбираем одинаковыми для всех каналов на уровне требований к погрешности младшего разряда ВОЦАП.

$$\Delta_{n-1} < \frac{1}{n2^n}. \quad (13)$$

Это необходимо для того, чтобы суммарная погрешность полной шкалы не превышала допустимого значения

$$\Delta_{\text{III}} < \pm \frac{1}{2^n}.$$

Если погрешности  $\Delta_i$  – независимые случайные величины, значения которых не превосходят значений (13), то погрешность полной шкалы в этом случае будет определяться геометрической суммой:

$$\Delta_{\text{III}} = \pm \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{1}{n2^n}\right)^2} = \pm \frac{1}{\sqrt{n}2^n} < \pm \frac{1}{2^n}. \quad (14)$$

Из полученных выражений следует, что аддитивная погрешность реализации весовых коэффициентов в ЭНВ не должна превосходить значения, определяемого выражением (13).

Если инструментальная погрешность задана в мультипликативной форме, то нормированную функцию преобразования ВОЦАП можно представить в виде:

$$\Phi_{\Sigma}^* = \sum_{i=n-1}^{i=0} a_j(2^{-(i\pm\delta)}), j = n - 1 - i, \quad (15)$$

где  $\delta$  – погрешность показателя степени весового коэффициента.

Для определения требований к допустимому значению  $\delta$  найдем связь между аддитивной и мультипликативной погрешностями МСПИ. Для этого рассмотрим равенство

$$\Phi_{\Sigma}^* = \sum_{i=n-1}^{i=0} a_j(2^{-i} + \Delta) = \sum_{i=n-1}^{i=0} a_j 2^{-(i\pm\delta)}, j = n - 1 - i. \quad (16)$$

Полагая, что при максимальном входном коде  $\{a_j = 1\}$ , получим для наихудшего случая:

$$\sum_{i=n-1}^{i=0} 2^{-i} + \sum_{i=n-1}^{i=0} \Delta = \sum_{i=n-1}^{i=0} 2^{-i} 2^{\pm\delta} = 2^{\pm\delta} \sum_{i=n-1}^{i=0} 2^{-i}, j = n - 1 - i. \quad (17)$$

Тогда с учетом выражения (17) можно написать

$$\sum_{i=n-1}^{i=0} 2^{-i} + \Delta_{\text{I}\emptyset} = 2^{\pm\delta} \sum_{i=n-1}^{i=0} 2^{-i} \quad (18)$$

или

$$N + \Delta_{\text{III}} = 2^{\pm\delta} N, \quad (19)$$

где

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} 2^{-i} = \frac{2^{n+1} - 1}{2^n}, \quad (20)$$

где  $n$  – общее число бинарных входных сигналов ВОЦАП.

Решая уравнение (19) относительно  $\delta$  с учетом (20), получим

$$\begin{aligned} \delta &= \pm \log_2 \left(1 + \frac{\Delta_{\text{III}}}{N}\right) = \\ &= \pm \log_2 \left(1 + \frac{1}{2^n N}\right) \approx \pm \log_2 \left(1 + \frac{1}{2^{n+1}}\right). \end{aligned} \quad (21)$$

Результаты расчета по выражению (21) приведены в табл. 1.

Полученное выражение (21) позволяет вычислить предельно допустимые значения погрешности весовых коэффициентов  $\delta$ , исходя из заданных значений погрешности полной шкалы и информационной емкости МСПИ.

Уравнение преобразования выходного оптического сигнала ВОЦАП в электрический сигнал имеет вид

$$U = \frac{\Phi_0}{n} \left( \sum_{i=n-1}^0 x_j 2^{-i} \right) S_{\text{фп}} R_{\text{OC}} + U_{\text{CM}}, j = n - 1 - i, \quad (22)$$

где  $n$  – число разрядов входного кода ВОЦАП,  $S_{\text{фп}}$  – чувствительность фотоприемника,  $R_{\text{OC}}$  – сопротивление обратной связи преобразователя фототока в напряжение,  $U_{\text{CM}}$  – напряжение смещения преобразователя фототока.

Наиболее высокие требования предъявляются к точности формирования аналогового сигнала, соответствующего младшему разряду входного сигнала МСПИ. Математическую модель сигнала младшего разряда можно представить в виде

**Таблица 1.** Значения допустимой погрешности весовых коэффициентов в зависимости от числа разрядов ВОЦАП

$n$	3	4	5	6	7	8	9	10
$\pm\delta_{\text{доп}}$	0,087	0,044	0,022	0,011	0,0056	0,0028	0,0014	0,000557

$$U_{MP} = \frac{\Phi_0}{n^*} 2^{-(n-1+\delta)} S_{\Phi\Pi} R_{OC} + U_{CM}, \quad (23)$$

где  $2^{-\delta}$  – мультипликативная погрешность, вызванная неточностью реализации весового коэффициента в младшем разряде. Абсолютная погрешность формирования кванта младшего разряда при условии статистической независимости составляющих  $z_i$  будет равна

$$\Delta U_{MP} = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left( \frac{\partial U_{MP}}{\partial z_i} \Delta z_i \right)^2},$$

где  $z_i = \{\Delta\Phi_0, \Delta n, \Delta R, \Delta S_{\Phi\Pi}, \Delta U_{CM}\}$ .

С учетом выражения (22) общая погрешность будет равна

$$\begin{aligned} \Delta U_{MP} = & \pm \left[ \left( \frac{1}{n^*} 2^{-(n-1+\delta)} S_{\Phi\Pi} R_{OC} \right) \Delta\Phi_0 \right]^2 + \\ & + \left[ -\frac{\Phi_0}{(n^*)^2} 2^{-(n-1+\delta)} S_{\Phi\Pi} R_{OC} \Delta n^2 \right]^2 + \\ & + \left[ \frac{\Phi_0}{n^*} 2^{-(n-1+\delta)} R_{OC} \Delta S_{\Phi\Pi} \right]^2 + \\ & + \left[ \frac{\Phi_0}{n^*} 2^{-(n-1+\delta)} S_{\Phi\Pi} \Delta R_{OC} \right]^2 + \Delta U_{CM}^2 \Big)^{\frac{1}{2}} = \quad (24) \\ = & \left[ \left( \frac{1}{n^*} 2^{-(n-1+\delta)} \right)^2 \left[ (S_{\Phi\Pi} R_{OC}) \Delta\Phi_0 \right]^2 + \right. \\ & + (\Phi_0 S_{\Phi\Pi} R_{OC} \Delta n)^2 + (\Phi_0 R_{OC} \Delta S_{\Phi\Pi})^2 + \\ & \left. + (\Phi_0 S_{\Phi\Pi} \Delta R_{OC})^2 \right] + \Delta U_{CM}^2 \Big)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

Погрешность весового коэффициента  $\delta$  можно вычислить как

$$\Delta U_{\delta} = (2^{-\delta} - 1) \frac{\Phi_0}{n^*} S_{\Phi\Pi} R_{OC} + U_{CM}. \quad (25)$$

Общая погрешность будет равна

$$\Delta U_{\Phi Y} = \sqrt{\Delta U_{MP}^2 + \Delta U_{\delta}^2}. \quad (26)$$

Пользуясь полученным выражением, можно

вычислить погрешность формирования кванта аналогового сигнала на входе АЦП с учетом отклонений параметров функции преобразования от номинальных значений. При этом необходимо учесть, что для обеспечения максимальной достоверности преобразования среднеквадратическое значение погрешности не должна превышать значения, определяемого выражением (9). Погрешность АЦП можно представить в виде геометрической суммы погрешности квантования  $\Delta U_m$  и инструментальной погрешности  $\Delta U_u$ .

$$\Delta U_{\text{АЦП}} = \sqrt{\Delta U_m^2 + \Delta U_u^2}.$$

Тогда условия получения максимальной достоверности преобразования с учетом (9) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \sigma_{\Phi Y} & < \frac{1}{6} \sqrt{\Delta U_{MP}^2 + \Delta U_{\delta}^2} \\ \sigma_{\text{АЦП}} & < \frac{1}{6} \sqrt{\Delta U_m^2 + \Delta U_u^2}. \end{aligned}$$

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В статье впервые введено понятие и предложена методика расчета достоверности мультисенсорных преобразователей бинарных оптических сигналов на основе волоконно-оптических цифро-аналоговых преобразователей.

Сформулированы необходимые и достаточные условия для обеспечения 100-% достоверности выходного кода МСПИ.

Предложена методика расчета мультипликативной погрешности, исходя из предельно допустимой погрешности полной шкалы волоконно-оптического ЦАП.

Получены формулы для расчета погрешностей цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразователей, исходя из обеспечения максимальной достоверности преобразования МСПИ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент США 3985423
2. Патент США 4666243
3. ЦНИИ ЭЛЕКТРОНИКА. ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ по зарубежной электронной технике Выпуск 50 (6587) от 24 декабря 2015 г. Еженедельный научно-технический бюллетень. Издается с 1971 г., в электронном виде – с 2003 г.
4. Grechishnikov V.M., Teryaeva O.V., Arefiev V.V. Multisensor transducer based on a parallel fiber

- optic digital-to-analog converter // MATEC Web of Conferences – 2017. Volume 102.
5. Fiber-Optic Angle Converter with Adaptive Error Correction of Non-Uniform Division of Optical Power / V.M. Grechishnikov, V.G. Domrachev, O.V. Teryaeva, A.A. Yudin // Measurement Techniques. 2015. Volume 57. Issue 11. P. 1309-1314.
6. Гречишников В.М. Метрология и радиоизмерения: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2007. 160 с.

## TO CALCULATE THE RELIABILITY OF MULTI-TOUCH INFORMATION TRANSFORMERS

© 2017 O.V. Teryaeva, V.M. Grechishnikov

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The article suggests a method of calculating the reliability of Multisensor transmitters of information. Mathematical expressions for calculation of errors in digital-to-analog and analog-to-digital converters, based on the maximum accuracy of conversion of multi-sensor information devices.

*Keywords:* accuracy of transformation error, binary optical signals.