

**АВТОКОРРЕКЦИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ
МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ**

© 2017 В.М. Гречишников, О.В. Теряева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 31.08.2017

В статье разработаны принципы построения многофункциональной поверочной установки, предложена методика автокоррекции статической погрешности преобразования мультисенсорных преобразователей информации. Показано, что практическая реализация новых аппаратно-программных средств позволяет скорректировать статическую погрешность мультисенсорных преобразователей информации до допустимого значения и тем самым повысить достоверность преобразования.

Ключевые слова: достоверность преобразования, погрешность, автокоррекция.

ВВЕДЕНИЕ

Как показано в [1] основной проблемой при создании и обеспечении высокой достоверности преобразования многоходовых мультисенсорных преобразователей (МСПИ) на основе параллельных волоконно-оптических ЦАП (ВОЦАП) является сложность точной установки весовых коэффициентов из-за больших погрешностей деления и суммирования «взвешенных» оптических сигналов на основе многополюсных-разветвителей. Погрешности серийных образцов оптических разветвителей могут достигать 5-10% [2], в то время как погрешности весовых коэффициентов даже у 4-х разрядного ВОЦАП не должны превышать 1,5%. Указанное обстоятельство ограничивает информационную емкость таких МСПИ на уровне 2-3 бит, а следовательно, и возможности их практического использования. Кроме того, промышленные конструкции регулируемых элементов назначения веса (ЭНВ) обеспечивают погрешность весовых коэффициентов на уровне $\pm 0,5$ дБ (12%), что не соответствует требованиям к точности ЭНВ многоходовых МСПИ [3, 4]. Кроме статических погрешностей МСПИ при разработке МСПИ необходимо учитывать и динамические погрешности, вызванные конечным временем срабатывания оптических переключателей, а также инерционностью применяемой элементной базы. Поэтому реализация потенциальных преимуществ рассматриваемого класса перед существующими аналогами выдвигает задачу разработки аппаратно-программных средств автокоррекции инструментальных погрешностей МСПИ как в статическом, так и динамическом режимах.

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

Теряева Ольга Викторовна, аспирант кафедры электротехники. E-mail: arefeva_olga@inbox.ru

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Разрабатываемая методика автокоррекции статических погрешностей должна корректировать погрешности, вызываемые нестабильностью мощности излучателя, неравномерностью деления и суммирования оптических сигналов, погрешностями ЭНВ.

В динамическом режиме схема автокоррекции должна обеспечивать достоверность преобразования за счет блокировки подачи сигнала фотоусилителя на вход АЦП до окончания переходных процессов в оптических, фотоэлектрических и электронных компонентах МСПИ. В этом случае формирование выходных цифровых сигналов будет осуществляться путем обработки аналогового сигнала, статическая погрешность которого не превышает допустимого значения. Совокупное использование методик автокоррекции статических и динамических погрешностей должно обеспечивать выполнение необходимых и достаточных условий [1] обеспечения максимальной достоверности преобразования МСПИ. Таким образом, решение поставленной задачи должно включать в себя разработку методик коррекции погрешностей как в статическом, так и динамическом режимах функционирования МСПИ.

**МЕТОДИКА АВТОКОРРЕКЦИИ
СТАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ МСПИ**

Предлагаемая методика базируется на результатах поверочных испытаний МСПИ с помощью многофункциональной поверочной установки. Прототипом данной методики можно считать методику упреждающей коррекции инструментальной погрешности волоконно-оптического преобразователя угла [5]. На рис. 1 представлена поверочная установка и ее информационные связи с поверяемым МСПИ [6].

ся оптический логический сигнал «0». При поступлении не нулевых сигналов на входы электромагнита шток под действием пружины 12 возвращается в крайнее верхнее положение, восстанавливая прямую оптическую связь между световодами 1. Таким образом, инверсный двоичный код с выходов МК1 преобразуется в прямой оптический код на входах ВОЦАП

Электрический сигнал с выхода фотоусилителя подается на АЦП МК 2, число разрядов которого больше разрядности МСПИ на величину δn . Число дополнительных разрядов выбирается таким образом, чтобы шаг квантования по напряжению младшего разряда не превышал допустимого значения $\Delta = 1/n2^n$ [1]. Инверсный двоичный код с выходов $d11\dots d1n$ МК1 параллельно подается на входы $d21\dots d2n$ микроконтроллера МК2, котором преобразуется в прямой n – разрядный двоичный код, выполняющий роль эталонного входного сигнала МСПИ. По сигналу синхронизации (синхр.) формируемому на выходе $d26$ МК1 значение эталонного кода вычитается из текущего кода АЦП МК2, а полученные при этом разности ΔN_i , представляющие собой коды погрешностей МСПИ записываются

в память МК2. При этом в качестве кода адреса используется выходной сигнал АЦП МК2. Таким образом в результате выполнения операций сравнения кодовых комбинаций эталонного кода МК1 АЦП МК2 в памяти последнего формируется числовой массив инструментальных погрешностей $\{\Delta N_i\}$, характеризующих степень отклонения реального выходного сигнала МСПИ от эталонного кода, подаваемого на его входы с МК1.

В режиме автокоррекции разъемы $X1\dots X3$ отключаются от поверочной установки, а электромагниты отсоединяются от сенсоров МСПИ. Входы сенсоров МСПИ подключаются к объектам контроля. При поступлении рабочих бинарных сигналов на входах МСПИ на выходе АЦП МК2 формируются цифровые сигналы, которые используются в качестве кода адреса при считывании значения инструментальных погрешностей из запоминающего устройства МК2, которые в качестве поправки суммируются с кодом АЦП МК2. В результате суммирования на выходе МСПИ формируется истинное значение кода, полностью отражающее значения его бинарных входных сигналов.

Алгоритмы работы микроконтроллеров МК1 и МК2 представлены на рис. 3.

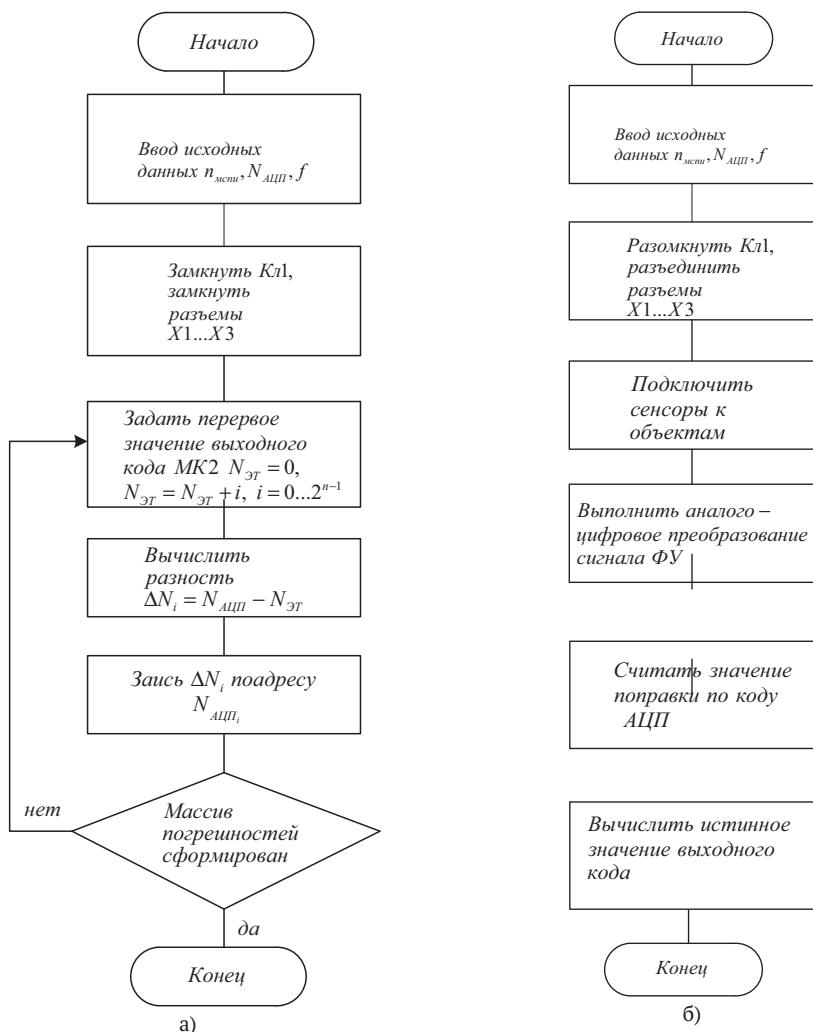


Рис. 3. Алгоритмы работы микроконтроллеров МК1 (а) и МК2 (б)

МЕТОДИКА КОРРЕКЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ МСПИ

Снижение достоверности преобразования МСПИ в динамическом режиме вызвано наличием переходных процессов переключения оптических сигналов на входе ВОЦАП и связана с конечным временем перехода сенсоров из состояния «0» в состояние «1» и наоборот. В зависимости от конструкции механических оптических ключей (ОК) и внешних спусковых устройств время срабатывания может находиться в диапазоне от 0,5 до 50 мс. Времена срабатывания компонентов электронного блока лежат в диапазоне $10^{-8} \dots 10^{-9} \text{ с}$, что при рассмотрении динамики МСПИ позволяет считать их безынерционными звеньями.

Для анализа динамического режима МСПИ предположим, что ОК представляют собой апериодические звенья первого порядка, а входные сигналы заданы в виде единичных скачков входных воздействий. Указанные допущения позволяют исследовать динамический режим для самого неблагоприятного случая, когда переходные процессы имеют экспоненциальный характер, которые заканчиваются при $t = \infty$. Будем понимать под временем срабатывания сенсора интервал времени между моментом начала переходного процесса и моментом его входа в полосу неопределенности, определяемой предельно допустимым значением статической погрешности $\Delta_{\text{дон}} = 1/n2^n$ [1]. Можно показать, что время срабатывания $t(i)$ зависит от номера разряда:

$$t(i) = \tau [(n - i) \ln 2 + \ln n]. \quad (1)$$

Например, при $n = 8$ и $\tau = 2$ мс значения t_i лежат в диапазоне от 15,2 мс ($i = 0$) до 5,6 мс ($i = 7$), рис. 4,а.

Выходной сигнал фотоусилителя в режиме переключения входных сигналов зададим в виде

$$U_{\phi y}(t) = \frac{\Phi_0}{n} \left(\sum_{i=n-1}^0 x_j(t) 2^{-i} \right) \vartheta S_{\phi \Pi} K_{yc}, \quad j = n - 1 - i, \quad (2)$$

где Φ_0 – мощность источника излучения, $S_{\phi \Pi}$ – чувствительность фотоприемника, K_{yc} – коэффициент преобразования фототока в напряжение, ϑ – коэффициент, учитывающий энергетические потери в оптической схеме МСПИ, $x_j(t)$ – функции изменения во времени входных сигналов МСПИ.

Выражение (2) представим в виде

$$U_{\phi y}(t) = U_0 \left(\sum_{i=n-1}^0 x_j(t) 2^{-i} \right), \quad j = n - 1 - i, \quad (3)$$

где $U_0 = \frac{\Phi_0 \vartheta S_{\phi \Pi} K_{yc}}{n}$ – амплитуда напряжения, соответствующая «1» старшего разряда (2^0).

Разделив выражение (3) на U_0 , получим нормированную функцию преобразования ВОЦАП в динамическом режиме

$$\Phi_{\Sigma}^*(t) = \sum_{i=n-1}^0 x_j(t) 2^{-i}, \quad j = n - 1 - i. \quad (4)$$

Для простоты понимания сущности предлагаемого способа автокоррекции динамической погрешности рассмотрим переходные процессы в четырех старших разрядах 8-разрядного ВОЦАП.

Нормированные переходные характеристики оптических ключей зададим в виде:

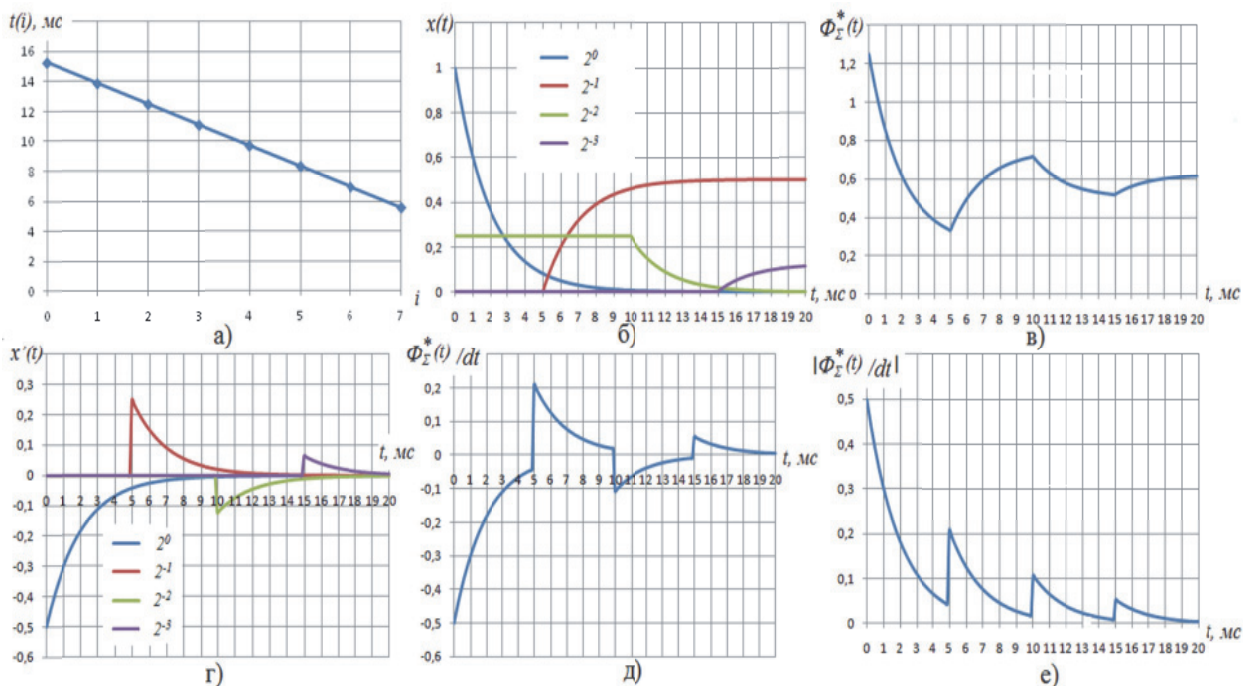


Рис. 4. График зависимости $t(i)$ - (а) и временные диаграммы формируемых сигналов (б)...(е)

$$\begin{aligned}
 x_0 &= e^{-\frac{t}{\tau}} \\
 x_1 &= 0,5(1 - e^{-\frac{t-\Delta t}{\tau}}) \\
 x_2 &= 0,25e^{-\frac{t-2\Delta t}{\tau}} \\
 x_3 &= 0,125(1 - e^{-\frac{t-3\Delta t}{\tau}})
 \end{aligned} \tag{5}$$

где Δt – начальная фаза экспоненциального процесса.

Как видно из выражения (5) функции x_0 и x_2 описывают переход входного сигнала из «1» в «0», а функции x_1 и x_3 – из «0» в «1» (рис. 4,б). В результате наложения разнонаправленных переходных процессов с разными начальными фазами на выходе фотоусилителя формируется сигнал в виде суммы экспонент, представляющий собой сложную немонотонную функцию времени, которая асимптотически приближается к установившемуся значению 0,625 (рис. 4,в). Это обстоятельство приводит к нарушению однозначности преобразования входного оптического кода в выходной электрический код, что недопустимо.

Для коррекции данной погрешности разработан способ, основанный на блокировке подачи сигнала с выхода фотоусилителя (ФУ) на вход АЦП на время, необходимое для завершения переходных процессов переключения на входе ВОЦАП. Устройство блокировки представляет собой по существу адаптивную линию задержки, в которой последовательно выполняются операции дифференцирования сигнала, усиления, выпрямления, компарирования и управления аналоговым ключом, установленным на входе АЦП.

В результате дифференцирования получим производные $x'_i(t)$, которые, как видно из рисунка 4, г, носят знакопеременный характер. Производная суммарного сигнала $\Phi'_\Sigma(t)/dt$ показана на рис. 4, д. После выпрямления производной (рис. 4, е) ее текущее значение $|\Phi'_\Sigma(t)/dt|$ сравнивается с опорным напряжением U_{on} , значение которого определяется минимально допустимой статической погрешностью $\Delta_{don} = 1/n2^n$. В результате компарирования формируется вспомогательный сигнал z :

$$z = \begin{cases} 1 \text{ при } U'_{\phi y} > U_{on} \\ 0 \text{ при } U'_{\phi y} \leq U_{on} \end{cases}, \tag{6}$$

который управляет подачей выходного сигнала ФУ на вход АЦП

$$U_{АЦП} = \begin{cases} U_{\phi y} \text{ при } z = 0 \\ 0 \text{ при } z = 1 \end{cases}. \tag{7}$$

Функциональная схема коррекции неоднозначности преобразования в динамическом режиме [7] МСПИ приведена на рис. 5.

Выходной оптический сигнал ВОЦАП Φ_Σ поступает на вход ФП, который генерирует пропорциональное значение фототока i_ϕ . Далее в ПТН фототок преобразуется в напряжение, дифференцируется в ДЦ и выпрямляется в двухполупериодном выпрямителе (В).

Двухполупериодный выпрямитель необходим поскольку знак производной переходного процесса может быть как положительным, так и отрицательным. До момента окончания переходного процесса на выходе ВОЦАП, т.е. пока $d\Phi^*(t)/dt \neq 0$, выходной сигнал К поддерживает АК в запертом состоянии, препятствуя прохождению сигнала с выхода ПТН на вход АЦП. По окончании переходного процесса, когда $d\Phi^*(t)/dt \leq \Delta_{don}$, выходной сигнал компаратора К открывает АК и на вход АЦП поступает сигнал, пропорциональный установившемуся значению выходного сигнала ВОЦАП. Для случая, рассмотренного на рисунке 4, установившееся значение равно $0,625 + \Delta_{don}$. Блокировка процесса аналого-цифрового преобразования на время переходного процесса позволяет исключить неоднозначность преобразования и за счет этого повысить достоверность преобразования МСПИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее существенные научные результаты статьи

1. Разработаны принципы построения многофункциональной поверочной установки, предложена методика автокоррекции статической погрешности преобразования МСПИ. Разработаны принципы конструктивной интеграции и информационного взаимодействия поверочной установки и поверяемого МСПИ. Показано, что реализация новых аппаратно-программных средств позволяет скорректировать статическую погрешность МСПИ до допустимого значения и на этой основе повысить

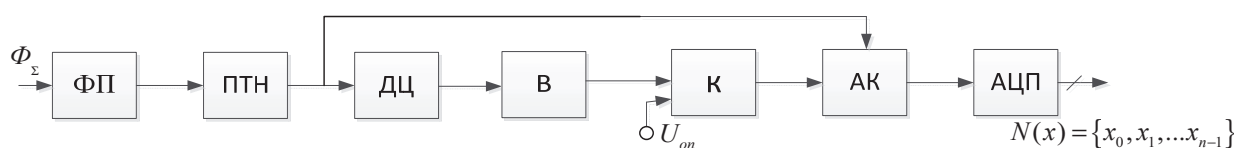


Рис. 5. Схема коррекции динамической неоднозначности преобразования МСПИ: ФП – фотоприемник, ПТН – преобразователь тока в напряжение, ДЦ – дифференцирующая цепочка, В – выпрямитель, К – компаратор, АК – аналоговый ключ

достоверность преобразования МСПИ в статическом режиме.

2. Предложена методика автокоррекции динамической погрешности, основанная на блокировке подачи сигнала с выхода ФУ на вход АЦП на время переходных процессов оптических сигналов на входах МСПИ с использованием адаптивной линии задержки. Использование предложенной методики позволяет исключить неоднозначность выходного сигнала МСПИ за счет преобразования в АЦП установившихся значений сигналов с выхода ФУ, погрешность которых не превосходит допустимого значения в статическом режиме.

3. Совокупное использование разработанных методик позволяет обеспечить выполнение необходимых и достаточных условий обеспечения максимальной достоверности работы МСПИ [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теряева О.В., Гречишников В.М. К расчету достоверности мультисенсорных преобразователей информации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т.19. №4. С. 171 – 176.
2. Материалы сайта <http://optel.ru.htm>. URL: <http://optel.ru/oborudovanie-dlja-proizvodstva-komponentov/proizvodstvo-plc-razvetvitelej/volokonno-opticheskie-razvetviteli-planarnogo-tipa--plc-razvetviteli--konfiguracii-1xn-i-2xn-900-mkm#acc-attribute206> (дата обращения 11.07.2017).
3. Патент США 4666243.
4. Материалы сайта <http://www.prointech.ru.html>. URL: <http://www.prointech.ru/catalog/passive/opticheskie-attenyuatory.html> (дата обращения 11.07.2017).
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. Заявка на изобретение 2017100935. Мультисенсорный преобразователь информации, Гречишников В.М., Теряева О.В., Арефьев В.В. Заявитель и патентообладатель Самар. нац. исслед. ун-т им. С.П. Королева. Заявл. 10.01.2017.
7. Заявка на изобретение 2017103236. Мультисенсорное волоконно-оптическое устройство сбора информации, Гречишников В.М., Теряева О.В., Арефьев В.В. Заявитель и патентообладатель Самар. нац. исслед. ун-т им. С.П. Королева. Заявл. 31.01.2017.

THE CORRECTION OF THE INSTRUMENTAL ERRORS OF MULTISENSORY INFORMATION TRANSFORMERS

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

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

In the article the principles of construction of multifunction testing equipment, the proposed method of automatically correcting static error converting multi-sensory transducers of information. It is shown that practical implementation of new hardware and software allows you to adjust the static error of the multi-sensory information devices to an acceptable value and thus increase the accuracy of the transformation.

Keywords: reliability conversion, error, correction.

Vladimir Grechishnikov, Doctor of Technics, Professor, Head at the of Electrical Engineering Department.

E-mail: gv@ssau.ru

Olga Teryaeva, Postgraduate Student at the Electrical Engineering Department. E-mail: arefeva_olga@inbox.ru