

## ИСПРАВЛЕНИЕ ОДИНОЧНЫХ ОШИБОК В ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ УГЛА НА ОСНОВЕ РЕКУРСИВНЫХ КОДОВЫХ ШКАЛ

А. А. ОЖИГАНОВ<sup>1</sup>, П. А. ПРИБЫТКИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: aaozhiganov@itmo.ru

<sup>2</sup>ОАО „Авангард“, 195271, Санкт-Петербург, Россия

Предложена структурная схема цифрового преобразователя угла с возможностью исправления одиночных ошибок, реализация которой достигается путем применения в них рекурсивных кодовых шкал с одной информационной кодовой дорожкой. Такие шкалы только за счет введения добавочных считывающих элементов (без использования дополнительных контрольных кодовых дорожек) позволяют формировать считываемые с них корректирующие коды с минимальным кодовым расстоянием  $d_{\min}=3$ .

**Ключевые слова:** цифровой преобразователь угла, рекурсивная кодовая шкала, псевдослучайная кодовая шкала, композиционная кодовая шкала, считывающие элементы, исправление одиночных ошибок

**Введение.** Учитывая постоянно растущую сложность приборов и систем, осуществляющих контроль параметров перемещений, а также высокие качественные характеристики современной цифровой управляющей аппаратуры, можно сделать вывод о перспективности цифровых преобразователей угла (ЦПУ), выполненных на основе пространственных мер, при условии решения ряда проблем упрощения структуры кодовой шкалы (КШ), уменьшения габаритных размеров и массы кодирующих элементов и повышения надежности [1, 2]. Основные преимущества таких ЦПУ сводятся к их высокой разрешающей способности и быстродействию. При этом конкретные характеристики преобразователя (фотоэлектрические, электромагнитные, пневмоакустические, электромеханические и т.д.) во многом определяются физическим методом исполнения пространственной меры перемещения [3—5].

**Классификация ошибок считывания в цифровых преобразователях угла.** В процессе функционирования ЦПУ возможно появление ошибок считывания, которые могут быть классифицированы согласно следующим признакам [6—11]:

— *по характеру проявления* — случайные и детерминированные ошибки; примером детерминированной ошибки, применительно к ЦПУ, может служить неоднозначность считывания, возникающая в процессе смены кодовых комбинаций; к разряду случайных относятся в основном ошибки, обусловленные внешними по отношению к ЦПУ факторами;

— *по длительности воздействия* — ошибки с конечным временем проявления, бесконечным временем проявления (необратимый выход из строя отдельных считывающих элементов (СЭ)) и периодические ошибки; к первым могут быть отнесены ошибки, обусловленные ложным срабатыванием дискриминирующих звеньев; пример периодической ошибки — дефект изготовления кодовой маски шкалы;

— *по виду искажения* — асимметричные и групповые ошибки; отказы отдельных СЭ относятся к асимметричным ошибкам, поскольку в некоторые моменты времени значения кодовых символов, формируемых вышедшими из строя СЭ, будут корректны; ошибки, вызванные дефектами изготовления маски КШ, обычно приводят к одновременному искажению сразу нескольких кодовых участков и могут рассматриваться как групповые.

Методы функционального контроля ошибок считывания в кодовых ЦПУ базируются на использовании либо временной, либо структурной (кодовой) избыточности. Наиболее эффективные методы повышения отказоустойчивости ЦПУ основаны на применении в них корректирующих кодов.

**Применение корректирующих кодов в рекурсивных кодовых шкалах.** Анализ особенностей построения ЦПУ с многодорожечными регулярными и нерегулярными КШ показывает, что корректирующие коды не могут быть эффективно в них реализованы, поскольку это требует значительного усложнения структуры КШ и приводит к увеличению габаритных размеров и массы подобных устройств.

Для формирования корректирующих кодов могут быть использованы рекурсивные кодовые шкалы (РКШ), имеющие единственную кодовую дорожку (КД). Последовательности, лежащие в основе построения данных типов КШ, обладают хорошими корректирующими возможностями, что позволяет определить проверочные соотношения между различными группами кодовых символов, образующими информационные совокупности выбранного пространственного кода.

Для практического применения в ЦПУ корректирующих кодов необходимо, чтобы функциональные зависимости между символами последовательности, образующей КШ, имели линейный характер. При выполнении этого условия возможно построение ЦПУ, формирующих известные типы корректирующих кодов, для которых существуют эффективные методы обнаружения и исправления ошибок.

В настоящей статье рассматриваются ЦПУ на основе реверсивных кодовых шкал — псевдослучайных или композиционных. Используемые РКШ выполнены в соответствии с принципами построения, подробно рассмотренными в [12]. Размещение информационных считывающих элементов  $CЭ_1...CЭ_N$  на РКШ осуществлено в соответствии с методами, приведенными в [13], а размещение на шкале корректирующих считывающих элементов  $CЭ_{N+1}...CЭ_{N+k}$  — с использованием методики, приведенной в [14], и алгоритма, рассмотренного в [15].

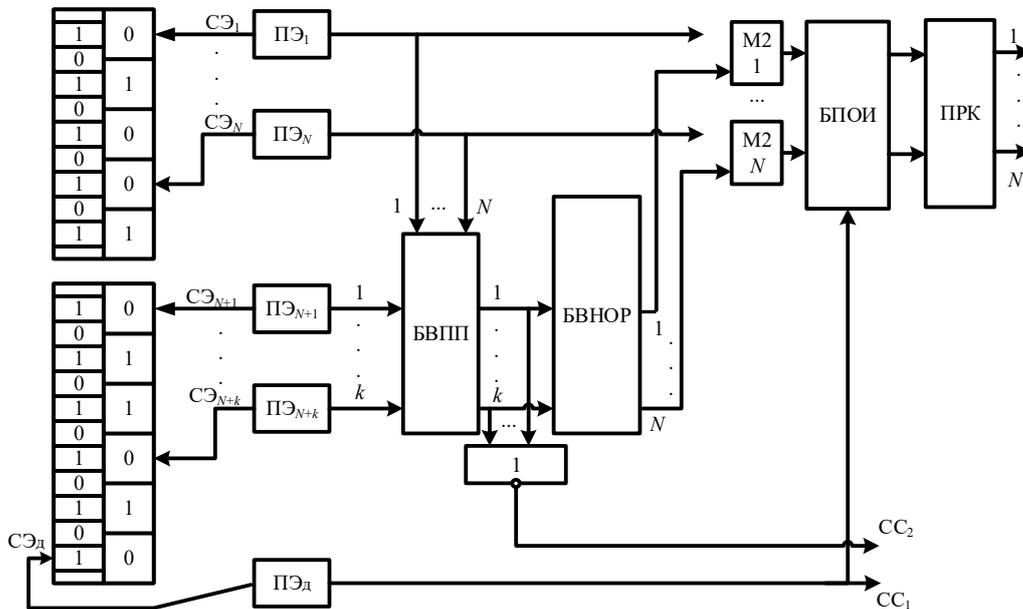
Принципиально ЦПУ любой разрядности может быть построен на основе РКШ с одной информационной КД. Однако считывание информации с такой шкалы может происходить с ошибками, обусловленными появлением ложной информации, формируемой на границах выходных кодовых комбинаций вследствие неточностей взаимного положения кодовых границ и СЭ преобразователя. Для устранения ошибок неоднозначности считывания может быть применен любой из методов, рассмотренных в [16]. В данной статье при разрешении этой проблемы использован метод принудительного считывания (дискретизация отсчетов), т.е. применена РКШ с двумя КД.

Вторая кодовая дорожка РКШ предназначена для реализации метода принудительного считывания, заключающегося во введении специальных зон, перекрывающих границы смены кодовых комбинаций, в пределах которых запрещается считывание информации элементами  $CЭ_1...CЭ_{N+k}$ . Соответствующий электрический сигнал, разрешающий или запрещающий считывание информации со шкалы, снимается со второй дорожки посредством дополнительного считывающего элемента  $CЭ_d$ .

**Структура цифрового преобразователя угла с возможностью исправления одиночных ошибок.** На рисунке приведена структурная схема  $N$ -разрядного ЦПУ на основе РКШ с возможностью исправления одиночных ошибок.

В дальнейшем предполагается, что электрические сигналы, снимаемые СЭ с активных участков РКШ (на рисунке отмечены символом „1“), соответствуют напряжению высокого уровня (логические единицы), а сигналы, снимаемые с пассивных участков (отмечены символом „0“), — напряжению низкого уровня (логические нули). Сигналы со всех СЭ поступают

на соответствующие пороговые элементы (ПЭ), где они преобразуются в импульсы прямоугольной формы.



Выходы пороговых элементов  $ПЭ_1 \dots ПЭ_N$  соединены со входами  $N$  сумматоров по модулю два ( $M2$ ) и входами блока вычисления проверочной последовательности (БВПП) по Хеммингу [17], другие входы которого имеют связь через пороговые элементы  $ПЭ_{N+1} \dots ПЭ_{N+k}$  с выходами корректирующих считывающих элементов  $СЭ_{N+1} \dots СЭ_{N+k}$ . Выходы БВПП соединены со входами логического элемента „ИЛИ—НЕ“ и входами блока вычисления номера ошибочного разряда (БВНОР),  $N$  выходов которого имеют связь со вторыми входами соответствующих сумматоров по модулю два. В свою очередь, выходы сумматоров по модулю два соединены со входами блока предварительной обработки информации (БПОИ), выходы которого имеют связь с соответствующими входами преобразователя рекурсивных кодов (ПРК). Управляющий вход БПОИ соединен через соответствующий пороговый элемент со считывающим элементом  $СЭ_д$ . Служебные сигналы  $СС_1$  и  $СС_2$  снимаются соответственно с выхода порогового элемента  $ПЭ_д$  и выхода логического элемента „ИЛИ—НЕ“.

БВПП представляет собой совокупность из  $k$  сумматоров по модулю два, каждый из которых предназначен для реализации одного из проверочных уравнений Хемминга для кода, исправляющего одиночную ошибку. Число входов таких сумматоров зависит от разрядности ЦПУ. Выходной информацией БВПП является  $k$ -разрядная кодовая комбинация, которая в обыкновенном двоичном коде указывает номер ошибочной позиции в  $(N+k)$ -разрядном коде, снимаемом со шкалы считывающими элементами  $СЭ_1 \dots СЭ_{N+k}$ .

БВНОР имеет  $k$  входов,  $N$  выходов и представляет собой дешифратор обыкновенного двоичного кода в унитарный. Наличие уровня логической единицы на одном из  $N$  выходов блока свидетельствует об ошибочной информации, считанной соответствующим  $СЭ$ , а отсутствие единиц на всех выходах — о правильно считанной информации всеми  $СЭ$ . Управление БПОИ осуществляется сигналом со считывающего элемента  $СЭ_д$  через пороговый элемент  $ПЭ_д$ .

**Принцип работы цифрового преобразователя угла.** Работа ЦПУ осуществляется следующим образом. При определенном положении РКШ, когда информационные и корректирующие  $СЭ$  находятся вне зон запрещения считывания информации, с информационной дорожки шкалы через пороговые элементы  $ПЭ_1 \dots ПЭ_{N+k}$  посредством считывающих элементов  $СЭ_1 \dots СЭ_{N+k}$  снимается соответствующий цифровой код. При этом  $N$ -разрядный код, сформир-

роваемый элементами  $CЭ_1...CЭ_N$ , подается на входы БВП и на первые входы соответствующих двухвходовых сумматоров по модулю два, а  $k$ -разрядный код, сформированный элементами  $CЭ_{N+1}...CЭ_{N+k}$ , — на другие входы БВП.

При отсутствии одиночной ошибки в считанной со шкалы  $(N+k)$ -разрядной кодовой комбинации на всех  $k$  выходах БВП будут сформированы уровни логического нуля. На выходах БВНОР также фиксируется нулевая  $N$ -разрядная кодовая комбинация, означающая отсутствие ошибок считывания во всех разрядах, включая корректирующие. Если на управляющий вход БПОИ подан сигнал логической единицы, свидетельствующий о нахождении СЭ вне зон запрещения считывания информации со шкалы, а на вторые входы всех сумматоров по модулю два подан сигнал логического нуля, свидетельствующий об отсутствии ошибок считывания, то цифровой рекурсивный код, сформированный считывающими элементами  $CЭ_1...CЭ_N$ , будет без изменения передан через сумматоры по модулю два и БПОИ на вход ПРК. Этот рекурсивный код преобразуется ПРК в требуемый код, например обыкновенный двоичный. Преобразователь рекурсивных кодов может быть выполнен по схеме, приведенной в работе [18]. Рассмотренный выше случай характеризуется значениями служебных сигналов  $CC_1=CC_2=1$ .

Рассмотрим работу ЦПУ, когда в каком-то  $i$ -м информационном разряде произошла ошибка считывания. При этом все СЭ находятся вне зон запрещения считывания информации, т.е. на управляющем входе БПОИ вырабатывается сигнал, соответствующий уровню логической единицы. В этом случае на выходе БВП фиксируется  $k$ -разрядная кодовая комбинация, которая в обыкновенном двоичном коде указывает на ошибку в  $i$ -м информационном разряде. Будучи поданным на входы БВНОР, этот код дешифруется в  $N$ -разрядный унитарный код, в котором на  $i$ -й позиции формируется сигнал логической единицы. Далее этот сигнал подается на второй вход  $i$ -го сумматора по модулю два, что обеспечит исправление ошибки в данном разряде. Сигналы с остальных информационных СЭ поступят на выходы соответствующих сумматоров по модулю два без изменения. Скорректированный  $N$ -разрядный код поступает через БПОИ на вход ПРК, где он преобразуется в требуемый код. Наличие одиночной ошибки считывания характеризуется значениями служебных сигналов  $CC_1=1$  и  $CC_2=0$ . Когда СЭ находятся в зонах запрещения считывания со шкалы информации, на управляющем входе БПОИ формируется сигнал логического нуля, а на выходе БПОИ и ЦПУ в целом фиксируется предыдущий цифровой код при значении служебных сигналов  $CC_1=0$ ,  $CC_2=0$  или 1.

**Заключение.** Рассмотренная в работе структурная схема может быть положена в основу построения цифрового преобразователя угла с возможностью исправления одиночных ошибок, возникающих при считывании со шкалы информации, т.е. позволяет повысить информационную надежность устройства. Отметим, что рассмотренные ЦПУ наиболее целесообразно использовать в различных системах управления летательными аппаратами или технике специального назначения, где обеспечение надежности их работы является первостепенным требованием.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукьянов В. Д., Ожиганов А. А. Кодовые шкалы на основе рекуррентных последовательностей для преобразователей перемещений повышенной информационной надежности // Датчики и системы. 2012. № 2. С. 13—16.
2. Алсуфьев Е. А., Богатырев В. А. Выбор вариантов подключения датчиков в дублированном вычислительном комплексе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 4 (86). С. 45—49.
3. Домрачев В. Г., Мейко Б. С. Цифровые преобразователи угла: принципы построения, теория точности, методы контроля. М.: Энергоатомиздат, 1984. 328 с.

4. Ростовский К. М. Комбинаторный алгоритм расчета кодовых шкал фотоэлектрических цифровых преобразователей угла в среде MatLab // Вопр. радиоэлектроники. 2014. Т. 1, № 2. С. 209—220.
5. Асиновский Э. Н. и др. Высокоточные преобразователи угловых перемещений / Под ред. А. А. Ахметжанова. М.: Энергоатомиздат, 1986. 128 с.
6. Berger J. M. A note on error detection codes for asymmetric channels // Information and Control. 1961. Vol. 4, iss. 1. P. 68—73.
7. Согомоян Е. С. Построение самопроверяемых схем встроенного контроля для комбинационных устройств // Автоматика и телемеханика. 1974. № 2. С. 121—133.
8. Слабаков Е. В. Построение полностью самопроверяемых комбинационных устройств с использованием остаточных кодов // Автоматика и телемеханика. 1979. № 10. С. 133—141.
9. Аксенова Г. П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю 2 // Автоматика и телемеханика. 1979. № 9. С. 126—135.
10. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля // Автоматика и телемеханика. 2010. № 6. С. 155—162.
11. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 5. С. 333—343.
12. Азов А. К., Ожиганов А. А., Тарасюк М. В. Рекурсивные кодовые шкалы // Информационные технологии. 1998. № 6. С. 39—43.
13. Ожиганов А. А., Тарасюк М. В. Размещение считывающих элементов на композиционной кодовой шкале // Изв. вузов. Приборостроение, 1997. Т. 40, № 1. С. 42 — 47.
14. Ожиганов А. А. Алгоритм размещения корректирующих считывающих элементов на псевдослучайной кодовой шкале // Изв. вузов. Приборостроение. 1995. Т. 38, № 7—8. С. 33 —36.
15. Ojiganov A. Recursive code scales for moving converters // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2011. Vol. 79. P. 263—288.
16. Митрофанов С. С. Оптические и оптико-электронные измерительные приборы. Часть I. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 107 с.
17. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 576 с.
18. Ожиганов А. А., Азов А. К., Тарасюк М. В. Преобразование композиционных кодов в обыкновенный двоичный код // Информационные технологии. 2003. № 1. С. 47—51.

**Сведения об авторах**

- Александр Аркадьевич Ожиганов** — д-р. техн. наук, профессор; Университет ИТМО;  
E-mail: aaozhiganov@itmo.ru
- Павел Александрович Прибыткин** — канд. техн. наук; ОАО „Авангард“; начальник научно-исследовательского сектора; E-mail: pavel.pribitkin@gmail.com

Поступила в редакцию  
19.05.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Ожиганов А. А., Прибыткин П. А. Исправление одиночных ошибок в цифровых преобразователях угла на основе рекурсивных кодовых шкал // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 7. С. 620—625.

CORRECTION OF SINGLE ERRORS IN DIGITAL ANGLE CONVERTERS  
BASED ON RECURSIVE CODE SCALESA. A. Ozhiganov<sup>1</sup>, P. A. Pribytkin<sup>2</sup><sup>1</sup>ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: aaozhiganov@itmo.ru<sup>2</sup>Avangard JSC, 195271, St. Petersburg, Russia

A block diagram of a digital angle converter with the ability to correct single errors is proposed. Implementation of the correction ability is achieved by application of recursive code scales with one information code track in them. With such scales it is possible to generate correction codes read from them with a minimum code distance  $d_{\min} = 3$  by introduction of additional reading elements only (without the use of additional control code tracks).

**Keywords:** digital angle converter, recursive code range, pseudo-random code scale, compositional range code, reading elements, single error correction

## REFERENCES

1. Luk'yanov V.D., Ojiganov A.A. *Datchiki & Systemi* (Sensors & Systems). 2012, no. 2, pp. 13–16. (in Russ.)
2. Alsu'f'yev E., Bogatyrev V. *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*, 2013, no. 4(86), pp. 45–49. (in Russ.)
3. Domrachev V.G., Meyko B.S. *Tsifrovyye preobrazovateli ugla: printsipy postroyeniya, teoriya tochnosti, metody kontrolya* (Digital Angle Converters: Construction Principles, Accuracy Theory, Control Methods), Moscow, 1984, 328 p. (in Russ.)
4. Rostovsky K.M. *Questions of Radio Electronics*, 2014, no. 2(1), pp. 209–220. (in Russ.)
5. Asinovskiy E.N. et al. *Vysokotochnyye preobrazovateli uglovykh peremeshcheniy* (High-Precision Angle Encoders), Moscow, 1986, 128 p. (in Russ.)
6. Berger J.M. *Information and Control*, 1961, no. 1(4), pp. 68–73.
7. Sogomonyan E.S. *Automation and Remote Control*, 1974, no. 2, pp. 121–133. (in Russ.)
8. Slabakov E.V. *Automation and Remote Control*, 1979, no. 10, pp. 133–141. (in Russ.)
9. Aksyonova G.P. *Automation and Remote Control*, 1979, no. 9, pp. 126–135. (in Russ.)
10. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V. *Automation and Remote Control*, 2010, no. 6, pp. 155–162. (in Russ.)
11. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Efanov D.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 5(58), pp. 333–343. (in Russ.)
12. Azov A.K., Ojiganov A.A., Tarasyuk M.V. *Information Technologies (Informacionnye Tehnologii)*, 1998, no. 6, pp. 39–43. (in Russ.)
13. Ojiganov A.A., Tarasyuk M.V. *Journal of Instrument Engineering*, 1997, no. 1(40), pp. 42–47. (in Russ.)
14. Ojiganov A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 1995, no. 7–8(38), pp. 33–36. (in Russ.)
15. Ojiganov A. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2011, vol. 79, pp. 263–288.
16. Mitrofanov S.S. *Opticheskiye i optiko-elektronnyye izmeritel'nyye pribory: Chast' I. Uchebnoye posobiye k vypolneniyu laboratornykh rabot* (Optical and Optoelectronic Measuring Instruments: Part I. Textbook for Laboratory Work), St. Petersburg, 2010, 107 p. (in Russ.)
17. Blahut R.E. *Theory and Practice of Error Control Codes*, 1984.
18. Ozhiganov A.A., Azov A.K., Tarasyuk M.V. *Information Technologies (Informacionnye Tehnologii)*, 2003, no. 1, pp. 47–51. (in Russ.)

## Data on authors

**Aleksander A. Ozhiganov**— Dr. Sci., Professor; ITMO University;  
E-mail: aaozhiganov@itmo.ru**Pavel A. Pribytkin**

— PhD; Avangard JSC; Scientific Research Sector, Head of the Sector; E-mail: pavel.pribitkin@gmail.com

**For citation:** Ozhiganov A. A., Pribytkin P. A. Correction of single errors in digital angle converters based on recursive code scales. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 7. P. 620–625 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-7-620-625