

УДК 681.518.5

ДИАГНОСТИКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАНАЛОВ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛА

© 2018 В.М. Гречишников, А. Д. Бутько

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 20.06.2018

В работе рассмотрен оптоэлектронный цифровой преобразователь угла с возможностью диагностики различных по физической природе входящих в него функциональных элементов. Разработанные схемотехнические приемы позволяют повысить достоверность формируемой информации и надежность устройств подобного типа.

Ключевые слова: оптоэлектронные цифровые преобразователи угловых перемещений, инверсный код Грея, фотоэлектрическое преобразование, самодиагностика.

ВВЕДЕНИЕ

Оптоэлектронные цифровые преобразователи угловых перемещений (ОЦПУ) [1] широко используются в современных системах управления и контроля, что обусловлено такими их достоинствами, как высокая точность, быстродействие и технологичность. Однако при решении целого ряда прикладных задач, особенно в области аэрокосмической техники, наряду с указанными, выдвигаются требования высокой надежности функционирования [2]. Несмотря на значительное число научных публикаций и практических разработок в области ОЦПУ [1,2,3,4,5], вопросы повышения эксплуатационной надежности, которая закладывается на этапах их проектирования и производства, не получили должного развития.

Решение данной задачи требует разработки схемотехнических и программных средств самодиагностики ОЦПУ в процессе изготовления, обслуживания и эксплуатации. Реализация нового подхода к диагностике ОЦПУ возможна как на уровне отдельных измерительных каналов, так и на уровне отдельных функциональных элементов.

ОЦПУ С САМОДИАГНОСТИКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Структурная схема оптоэлектронного преобразователя угла, реализующая поканальную самодиагностику, показана на рисунке 1.

Преобразователь угла содержит группу излучателей 3, которые оптически связаны с фотоприемниками 7 через закрепленный на измерительном валу 4 кодовый диск 5 и неподвижную диафрагму 6.

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

Бутько Алексей Дмитриевич, аспирант кафедры электротехники. E-mail: butkortf@ssau.ru

Выходы фотоприемников подключены к соответствующим входам фотоусилителей 8, которые присоединены к входам 9 встроенного АЦП микроконтроллера (МК) 11. Устройство содержит также аналоговый ключ 2 и переключатель режимов «Диагностика»/«Работа» 17. Микроконтроллер 11 через ячейку вывода цифрового сигнала 10, к которой присоединён аналоговый ключ 2, управляет подачей питания на излучатели 3. Переключатель режимов «Диагностика» и «Работа» 17 подключен к ячейкам ввода/вывода 14, 15 микроконтроллера, а блок индикации 16 подключен к ячейкам ввода/вывода 12, 13.

Преобразователь работает следующим образом.

На первом этапе измерительный вал 4 устанавливается в нулевое положение, соответствующее единичным сигналам на всех выходах считывающего диска 6 инверсного кода Грея. В отличие от масок с обычным кодом Грея, в котором логическим единицам соответствуют прозрачные участки кодовых дорожек, в инверсном коде логическим единицам соответствуют непрозрачные участки. Такая конструкция маски позволяет получить геометрически замкнутый рисунок и уменьшить габариты кодового диска за счет исключения межрядных перемычек [6].

Примем следующие допущения - источник питания и оптико - механический блок заведомо исправен и проверяется до и после сборки устройства.

Для проверки работоспособности преобразователя вначале с помощью переключателя режимов 17 механическим или программным путем замыкаются выводы 14 и 15 между собой, переводя тем самым преобразователь в режим «Диагностика». Затем цифровой сигнал с ячейки 10 замыкает ключ 2, в результате чего напряжение от источника 1 подается на группу излучателей 3. При этом на всех их выходах одновременно формируются оптические сигналы

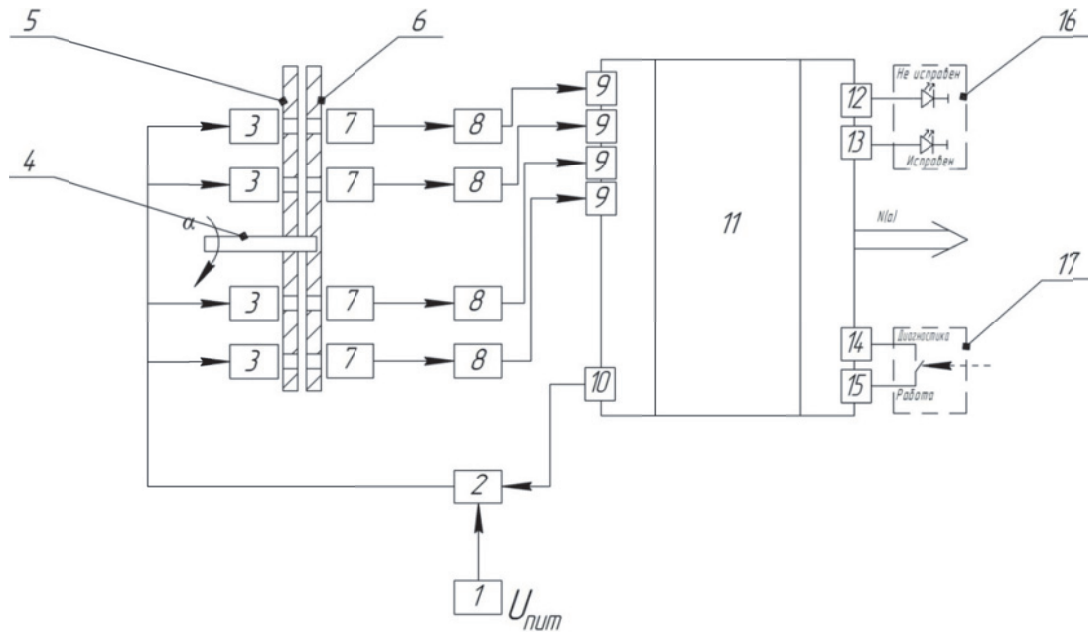


Рис. 1. Структурная схема ОЦПУ с поканальной самодиагностикой

$$P_i = I_{Hi} S_{иИi}, \quad (1)$$

где I_{Hi} – ток накачки i -го излучателя, $S_{иИi}$ – крутизна его ватт-амперной характеристики

Ток накачки определяется величиной опорного напряжения $U_{оп}$ и токоограничивающим резистором R :

$$I_{Hi} = \frac{U_{оп}}{nR}, \quad (2)$$

где n – число измерительных каналов (разрядов) ОЦПУ.

Сформированные таким образом оптические сигналы подаются на кодовую маску 6, на выходе которой они масштабируются по амплитуде за счет диафрагмирования исходных световых потоков в отверстиях считывающей диафрагмы 6. При этом формируется набор оптических сигналов

$$P_i^* = k_i P_i, \quad (3)$$

где k_i – коэффициент пропускания считывающего элемента диафрагмы 6.

В результате фотоэлектрического преобразования оптических сигналов в фотоприемниках 7 генерируются электрические сигналы фототока

$$i_{\phi i} = P_i^* S_{\phi Иi}, \quad (4)$$

где $S_{\phi Иi}$ – чувствительности фотоприемников.

Полученные сигналы подаются на входы соответствующих фотоусилителей 8, представляющие собой преобразователи тока в напряжение. На выходе фотоусилителей формируются электрические сигналы

$$U_{\phi \psi i} = I_{\phi \psi i} R_{OCi}, \quad (5)$$

где R_{OCi} – резистор обратной связи преобразова-

теля ток-напряжение, численно равный коэффициенту усиления фотоусилителя [4].

В соответствии с программой, записанной в ПЗУ микроконтроллера 11 принятые сигналы фотоусилителей $U_{\phi \psi i}$ 8 оцифровываются в АЦП, в результате чего формируются набор из n пропорциональных цифровых сигналов $\{N(U_{\phi \psi i})\}$, $i = \overline{0, (n-1)}$. Полученные коды в микроконтроллере 11 сравниваются с пороговым значением кода $N(0,5U_{\phi \psi \max})$. В результате сравнения формируются значения разрядных цифр выходного кода ОЦПУ в соответствии с уравнением

$$a_{\Pi i} = \begin{cases} 1 & \text{при } N(U_{\phi \psi i}) \geq N(0,5U_{\phi \psi \max}) \\ 0 & \text{при } N(U_{\phi \psi i}) < N(0,5U_{\phi \psi \max}), \end{cases} \quad (6)$$

где $i = \overline{0, n}$.

Выявить дефектные разряды можно путем анализа промежуточных сигналов e_i , формируемых путем логического умножения значений разрядных цифр кодов Грея

$$e_i = a_{\Pi i} \wedge a_i = \begin{cases} 0 & \text{при наличии дефекта в } i\text{-том разряде} \\ 1 & \text{при отсутствии дефекта} \end{cases}, \quad (7)$$

где $a_{\Pi i}$ – реальное значение i -той разрядной цифры выходного инверсного кода преобразователя, a_i – истинное значение i -той разрядной цифры инверсного кода Грея, записанного в ОЗУ микроконтроллера. По совокупности всех разрядов условие отсутствия дефектов можно задать выражением

$$\begin{pmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_i \\ e_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где n – общее число разрядов преобразователя.

Правая часть выражения (8) отражает истинные значения кода в нулевом положении вала. Если принятый код хотя бы в одном из разрядов не соответствует нулевому коду *инверсному* Грея, записанному в памяти, то микроконтроллер 11 выдает на блок индикации 16 команду о не работоспособности одного или нескольких каналов ОЦПУ. Причинами неисправностей могут быть нештатное функционирование излучателей, фотоприемников и фотоусилителей в одном или нескольких разрядах преобразователя.

В случае успешного прохождения теста в нулевом положении вала осуществляется диагностика в положении, когда все разряды инверсного кода Грея должны быть равны 0. Для этого вал преобразователя устанавливается в положение, соответствующее углу поворота $\alpha = \Delta\alpha(2^n - 1)$, где $\Delta\alpha$ – шаг квантования по углу поворота. В этом положении световые потоки в каждом из разрядов должны полностью перекрываться непрозрачными градациями кодового диска. Сигналы с выходов фотоприёмников 7 подаются на входы соответствующих фотоусилителей 8, выходные сигналы с которых поступают на входы 9 микроконтроллера 11. Принятые сигналы оцифровываются в АЦП и сравниваются в ПЗУ микроконтроллера 11, с пороговым значением кода, при котором происходит переключение значения разрядной цифры в соответствии с условием (6). Алгоритм определения дефектных каналов можно задать следующим выражением:

$$e_i = a_{pi} \oplus a_i = \begin{cases} 1 - \text{наличие дефекта в } i\text{-том разряде} \\ 0 - \text{отсутствие дефекта} \end{cases} \quad (9)$$

Условие отсутствия дефектов можно задать выражением

$$\begin{pmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_i \\ e_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Если коды не совпадают, хотя бы в одной позиции, микроконтроллер 11 выдает на блок индикации 16 команду о неработоспособности одного или нескольких каналов ОЦПУ. Причинами неисправностей в данном случае могут быть механические повреждения кодового диска, завышенный коэффициент усиления фотоусилителя, а также дефекты программного обеспечения МК [7].

В случае полного совпадения всех принятых сигналов, т.е. выполнении условий (7) и (8), микроконтроллер 11 формирует выходную команду «Исправен» на блок индикации 16. После этого необходимо разомкнуть выводы 14 и 15 с помощью переключателя 17, запустив тем самым выполнение штатного режима преобразования «Работа».

Таким образом, описанное устройство позволяет осуществить «макродиагностику» на уровне отдельных каналов преобразования, но позволяет выявлять дефекты работоспособно-

сти и монтажа отдельных функциональных элементов [8].

ОЦПУ С САМОДИАГНОСТИКОЙ НА УРОВНЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для повышения уровня детализации диагностики разработана новая функциональная схема ОЦПУ, являющаяся развитием схемы рассмотренного выше преобразователя. Её особенность состоит в использовании метода граничного сканирования для выявления дефектов монтажа основного микроконтроллера на уровне отдельных контактов, а также в реализации диагностики измерительных каналов ОЦПУ на уровне отдельных функциональных элементов. Функциональная схема ОЦПУ с расширенными возможностями самодиагностики представлена на рис. 2.

На рис. 2: 1 – источник питания излучателей, 2 – цифровой ключ, 3 – входные ячейки цифрового ключа, 4 – управляющие ячейки цифрового ключа, 5 – измерительный вал, 6 – излучатели, 7 – кодовый диск, 8 – фотоприёмники, 9 – фотоусилители, 10 – входы АЦП, 11 – микроконтроллер, 12 – JTAG ячейки, 13 – JTAG ячейки, 14 – микроконтроллер, ячейки МК (15, 17, 19, 21, 24), 16 – индикатор, 18 – ПЗУ, 20 – персональный компьютер, 22 – вход АЦП, 23 – блок контроля тока накачки, 25 – источник питания фотоусилителей, 26 – аналоговый ключ, 27 – магазин резисторов задающих коэффициент усиления фотоусилителей

Существенными отличиями конструкции датчика, представленной на рис. 2, от первоначальной являются:

- дополнительный микроконтроллер, диагностирующий поэлементно схему ОЦПУ методом граничного сканирования;
- поканальное управление с микроконтроллера каждым источником излучения;
- возможность задания коэффициента усиления фотоусилителей в режиме диагностики;
- подключение и передачи данных на ПК;
- запись и чтение данных из ПЗУ;
- удобная индикация работоспособности или дефектов элементов ОЦПУ.

На этапе сборки устройства, после прошивки ПО, микроконтроллер 14, подключенный к персональному компьютеру 20, проходит диагностику методом граничного сканирования по методике [9].

Поканальная диагностика запускается в случае не выполнения условия (8), когда измерительный вал 5 установлен в нулевое положение.

Первый этап поканальной диагностики заключается в проверке наличия коротких замыканий и отсутствия разрывов физических выводов микроконтроллера 11 методом граничного сканирования. На этом этапе на персональном

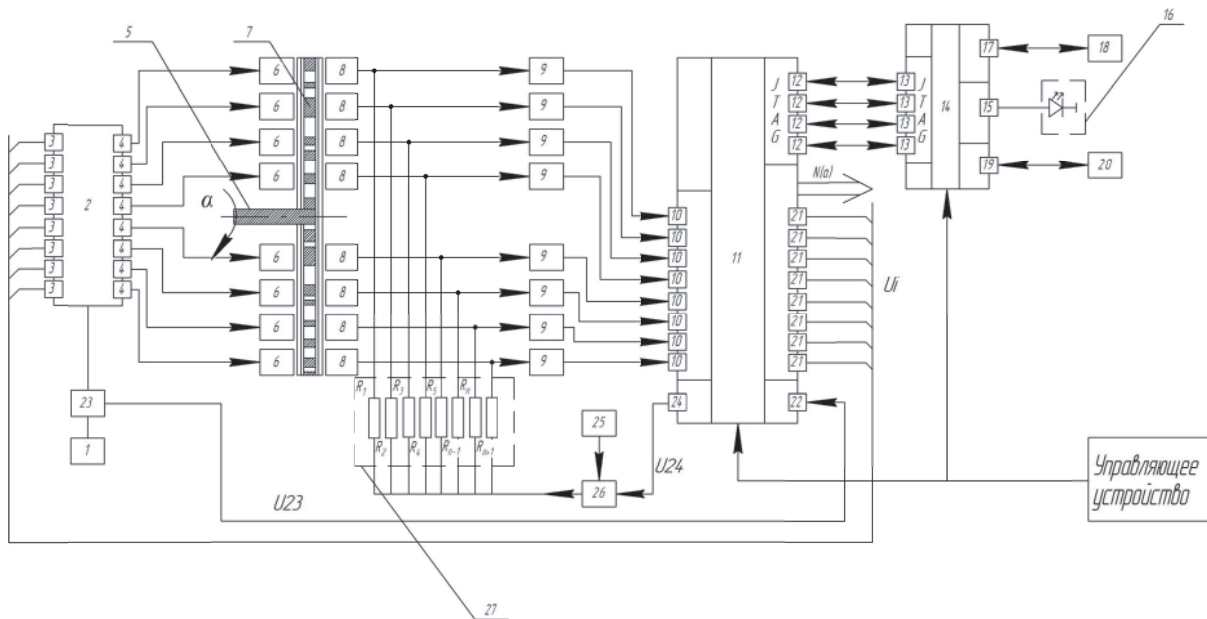


Рис. 2. Функциональная схема ОЦПУ с поэлементной самодиагностикой

компьютере 20 в программном пакете JTAG ProVision создается диагностический проект для выявления и локализации производственных дефектов пайки микроконтроллера 11 [7]. Тестовые вектора, сгенерированные на персональном компьютере 20, хранятся в ПЗУ 18. В соответствии с алгоритмом самодиагностики кодовые последовательности отправляются и принимаются микроконтроллером 14 по ячейкам JTAG. После завершения первого этапа на блок индикации 16 поступает сигнал об отсутствии дефектов и запускается следующий этап диагностики. В противном случае код дефекта записывается в ПЗУ 18 и на блок индикации 16 выдается соответствующий сигнал о неисправности микроконтроллера 11, а работа устройства останавливается до устранения дефектов. Для локализации и визуализации дефектов микроконтроллера 11 кодовая последовательность отправляется на персональный компьютер 20.

На втором этапе для определения канала с дефектом повторно проводится процедура считывания кода Грея и сравнение его с кодом, записанным в ПЗУ 18, по алгоритму описанному выше (8), (10). Если выявлено, что принятый код хотя бы в одном из разрядов не соответствует инверсному нулевому коду Грея, то запускается подпрограмма локализации дефекта в нерабочем канале.

Третий этап – поиск и локализация дефекта в нерабочем канале. Микроконтроллер 14, управляя микроконтроллером 11 по ячейкам JTAG интерфейса, отправляет из ячеек 21 сигналы на входные ячейки 3 цифрового ключа 2, отключающего все излучатели 6 от источника питания 1, кроме излучателя канала с дефектом. Для определения дефекта излучателя в выбранном канале необходимо снять сигнал с блока

контроля 23 (U_{23}) и сравнить его со значением, равному току потребления, записанным в ПЗУ 18. Критерий $D_{излi}$ наличия или отсутствия дефекта i -ого излучателя имеет вид:

$$D_{излi} = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{23} = I_{ни} R_{изл} \\ 0 & \text{при } U_{23} \neq I_{ни} R_{изл} \end{cases}, \quad (11)$$

где $I_{ни}$ – ток накачки i -ого излучателя, $R_{изл}$ – соответствующее сопротивление излучателя.

Значение $D_{излi} = 0$ соответствует наличию дефекта i -ого излучателя. Информация о найденном дефекте отображается на блоке индикации 16.

После замены дефектного излучателя осуществляется повторный запуск поканальной диагностики для проверки работоспособности управляющей ячейки 4 цифрового ключа 2. Критерием наличия дефекта в цифровом ключе 2 является отсутствие сигнала на входных ячейках АЦП 10 и 22, при поданной команде коммутации излучателей 6 с источником питания 1. Полученная информация записывается в ПЗУ 18, а на блок индикации подается сигнал, соответствующий отказу цифрового ключа. Затем выполняется подпрограмма отключения излучателей 6 от источника питания 1, а микроконтроллер 14 анализирует принятый код на ячейках АЦП 10 и 22. В случае соответствия сигнала току потребления излучателей на ячейке 22 и наличия сигнала на входах АЦП 10 локализуется дефект управляющей ячейки 4 цифрового ключа 2. Принятая информация записывается в ПЗУ 18 и на блок индикации поступает сигнал с номером управляющей ячейки 4 цифрового ключа 2.

Если ячейки 4 цифрового ключа 2 и соответствующие им излучатели находятся в рабочем состоянии, то вероятной причиной неработоспособности одного или нескольких каналов могут быть неисправности фотоприемников и/

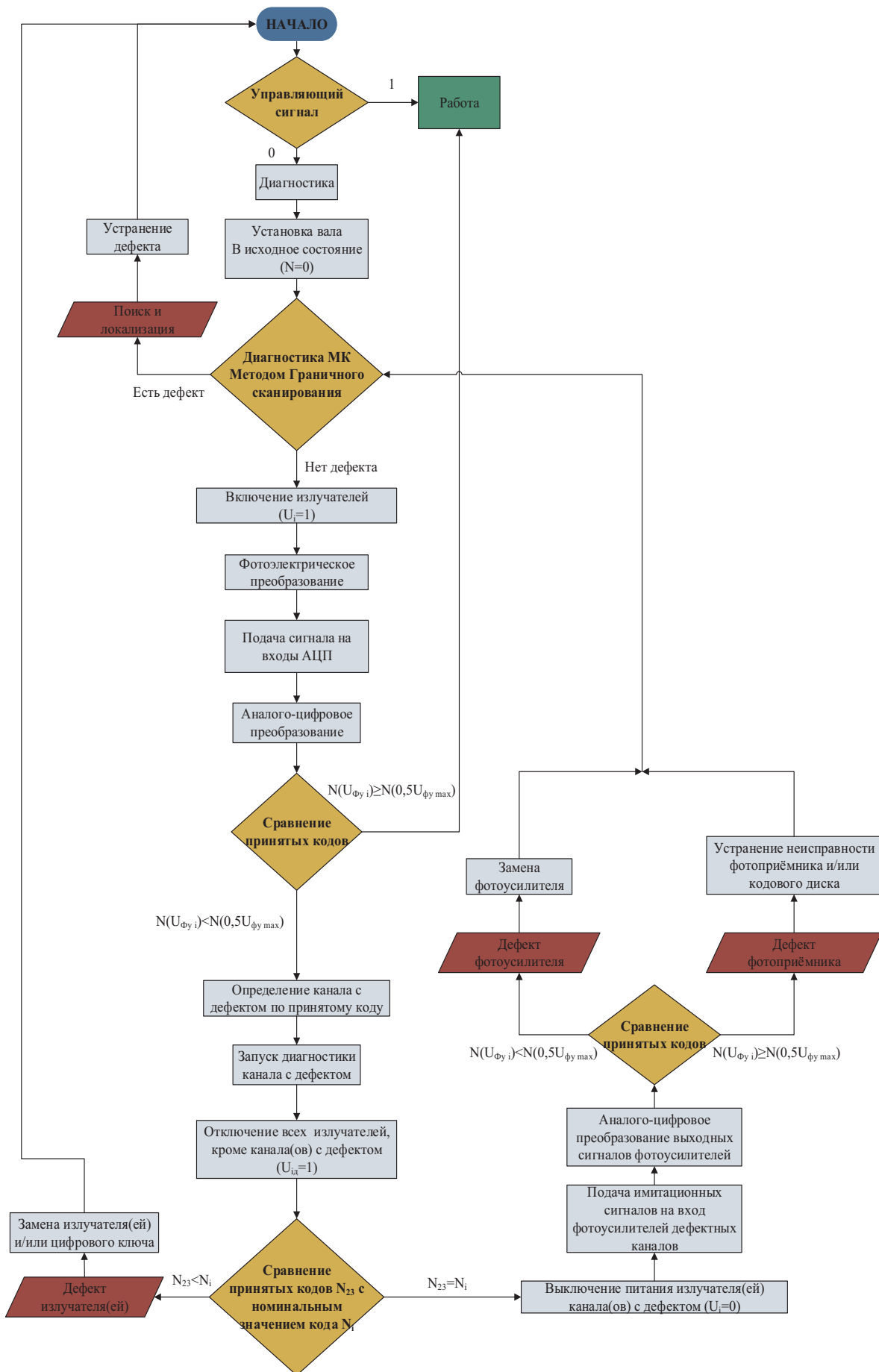


Рис. 3. Алгоритм самодиагностики ОЦПУ

или фотоусилителей. Проще проверить работоспособность фотоусилителей подавая эталонный сигнал от источника 25 на их входы через магазин резисторов задающих коэффициент усиления 27. Тогда Критерий наличия или отсутствия дефекта i -ого фотоусилителя $D_{\phi,y,i}$ - имеет вид

$$D_{\phi,y,i} = \begin{cases} 1 & \text{при } \frac{-U_{\phi,y,i} R_{ooci}}{R_{\phi,y,i}} \geq \frac{U_{\phi,y}}{2}, \text{ отсутствие дефекта} \\ 0 & \text{при } \frac{-U_{\phi,y,i} R_{ooci}}{R_{\phi,y,i}} < \frac{U_{\phi,y}}{2}, \text{ наличие дефекта} \end{cases}, (12)$$

где $-U_{\phi,y,i}$ – диагностический сигнал, $R_{\phi,y,i}$ – сопротивление задающее коэффициент усиления, R_{ooci} – сопротивление обратной связи i -ого фотоусилителя. Из формулы 6 следует, что при выполнении условия

$$\frac{-U_{\phi,y,i} R_{ooci}}{R_{\phi,y,i}} < \frac{U_{\phi,y}}{2}, (13)$$

программа самодиагностики выявляет наличие дефекта и посылает соответствующий сигнал на блок индикации 16. В обратном случае, делается заключение о неработоспособности фотоприемников. Работа устройства останавливается до устранения неисправностей.

После устранения выявленных неисправностей микроконтроллер 14 переводит устройство в режим «Работа».

Вышеописанные процедуры самодиагностики проводятся по алгоритму представленному на рис. 3.

ВЫВОДЫ

В работе показано, что введение в ОЦПУ новых схемотехнических приёмов позволило расширить его функциональные возможности

за счет реализации алгоритмов самодиагностики в сочетании с аппаратно - программными средствами граничного сканирования JTAG Technologies (Нидерланды). Результаты данной работы обеспечили более детальный уровень диагностики, позволяющий диагностировать причины неисправностей на уровне отдельных функциональных элементов ОЦПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кортаев В.В., Прокофьев А.В., Тимофеев А.Н. Оптико-электронные измерительные преобразователи линейных и угловых перемещений. СПб.: НИИ ИТМО, 2012. 116 с.
2. Толстых Г.Н., Шаров Ю.Л., Кряхтунов В.С. Оптико – электронный преобразователь угла: Пат. 611109 (СССР). 1978.
3. Домрачев В.Г., Мейко Б.С. Цифровые преобразователи угла: принципы построения, теория точности, методы контроля. М.: Энергоатомиздат, 1984. 328 с.
4. Зеленский В.А. Гречишников В. М. Бинарные волоконно-оптические преобразователи в системах управления и контроля // Самара: Изд-во СНЦ РАН. 2006.
5. Гречишников В.М., Бутько А.Д., Теряева О.В. Оптоэлектронный цифровой преобразователь угла: Пат. 2017138316 (РФ). 2017.
6. Гречишников В.М., Конюхов Н.Е. Оптоэлектронные цифровые датчики перемещений со встроенными волоконно-оптическими линиями связи. М.: Энергоатомиздат, 1992. 160 с.
7. Гречишников В.М. Схемотехника волоконно-оптических устройств. Самара: Изд-во СГАУ. 2012.
8. Положительное решение по заявке № 2017138396 от 11.04.2018.
9. Гречишников В.М., Бутько А.Д., Лавров А.Ю.. Разработка кластерного теста для электронного модуля с JTAG интерфейсом //Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 6(2), С. 361-364.

DIAGNOSTICS OF OPTICAL AND ELECTRICAL CHANNELS OPTOELECTRONIC TRANSDUCER ANGLE

© 2018 V.M. Grechishnikov, A.D. Butko

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

The paper considers an optoelectronic digital angle Converter with the possibility of diagnostics of functional elements of different physical nature. The developed circuit techniques allow to increase the reliability of the information generated and the reliability of this type of devices.

Keywords: optoelectronic digital converters of angular displacements, inverse gray code, photoelectric transformation, self-diagnostics.

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

E-mail: gv@ssau.ru

Alexey Butko, Graduate Student at the Electrical Engineering Department. E-mail: butkortf@ssau.ru