

Зламан Павел Николаевич – НКБ «МИУС», Южный федеральный университет; e-mail: otdel24d@mail.ru; г. Таганрог, Россия; ведущий инженер-конструктор.

Andrianov Artur Valer'evich – JSC "TNIIS"; e-mail: artur_andrianov_1990@mail.ru; Taganrog, Russia.

Gubarev Dmitriy Egorovich – Southern Federal University; e-mail: dgubarev@sfnedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79614132918; the department of A&RPU; postgraduate student.

Zikiy Anatoliy Nikolaevich – e-mail: zikiy50@mail.ru; phone: +79185822295; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Zlaman Pavel Nikolaevich – НКБ "МИУС", Southern Federal University; e-mail: otdel24d@mail.ru; Taganrog, Russia; leading design engineer.

УДК 004.047

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-270-280

С.А. Паньчев, А.И. Паньчев, А.В. Максимов**РЕАЛИЗАЦИЯ В БАЗИСЕ ПЛИС РЕЛЯТОРНЫХ КОНТРОЛИРУЮЩИХ
ОПРОСНЫХ УСТРОЙСТВ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ**

Сформулированы требования к современным средствам технического контроля и функциональной диагностики оборудования для ответственных применений, одним из которых является обработка диагностической информации в темпе реального времени. Отмечено, что для работы с цифровыми диагностическими сигналами перспективными являются реляторные контролирующие опросные устройства, основанные на аппарате порядковой логики, дающей существенный временной выигрыш перед традиционной двоичной логикой. Аппаратная реализация порядково-логической опросной устройств в базисе ПЛИС наряду с очевидными преимуществами этапа разработки позволит осуществлять оперативную реконфигурацию внутренней структуры для адаптации к изменяющимся условиям функционирования объекта контроля. Рассмотрена аппаратная реализация двух известных устройств. Устройство переменного приоритета использовано для выявления зафиксировавшего отказ или сбой датчика с возможностью установки номера датчика, с которого начнется опрос, и направления обхода датчиков. Устройство централизованного контроля группы объектов применено для поиска экстремального (максимального или минимального) цифрового диагностического сигнала с одновременным определением номера соответствующего датчика за один такт работы системы контроля и диагностики. Разработка комбинационных схем данных контролирующих опросных устройств выполнена средствами ISE Design Suite 14.7. Представлены положительные результаты тестирования алгоритмов работы созданных моделей, сведенные в таблицы состояний входов и выходов схем и иллюстрируемые временными диаграммами двоичных сигналов на выводах схем. Дана оценка требуемых затрат ресурсов ПЛИС, выраженная в количестве логических элементов и пользовательских контактов. Также на примере приборов низкой интеграции и наиболее ресурсоемких образцов даны верхняя и нижняя оценки количество ПЛИС различных типов семейства Xilinx Spartan-6, Xilinx Virtex-4 и отечественной серии 5576/5578 АО «КТЦ «Электроника». Установлено, что при количестве диагностических датчиков до 200 в зависимости от семейства ПЛИС для реализации одного контролирующего опросного устройства требуется до 17 микросхем низкой интеграции и до 7 ресурсоемких микросхем.

Техническая функциональная диагностика; порядковая логика; переменный приоритет; ПЛИС.

S.A. Panychev, A.I. Panychev, A.V. Maksimov**IMPLEMENTATION OF RELATIONAL DEVICES OF DIGITAL SIGNALS
MONITORING AND POLLING IN THE FPGA BASIS**

The requirements for modern means of technical control and functional diagnostics of equipment for critical applications are formulated, one of which is the processing of diagnostic information at a real-time pace. It is noted that for working with digital diagnostic signals, rela-

tional monitoring polling devices based on the apparatus of ordinal logic, which gives a significant time gain over traditional binary logic, are promising. The hardware implementation of ordinal-logical polling devices in the FPGA basis, along with the obvious advantages of the development stage, will allow for operational reconfiguration of the internal structure to adapt to the changing operating conditions of the control object. The hardware implementation of two known devices is considered. A variable priority device is used to identify the sensor that has detected a failure or malfunction, with the possibility of setting the sensor number from which the survey will begin, and the direction of traversing the sensor tuple. The device of centralized control of a group of objects is used to search for an extreme (maximum or minimum) digital diagnostic signal with simultaneous determination of the number of the corresponding sensor in one clock cycle of the monitoring and diagnostic system. The development of combinational data schemes of monitoring survey devices was carried out by means of ISE Design Suite 14.7. The positive results of testing the algorithms of the created models are presented, summarized in tables of the states of the inputs and outputs of the circuits and illustrated by time diagrams of binary signals at the terminals of the circuits. An estimate of the required FPGA resource costs is given, expressed in the number of logical elements and user contacts. Also, using the example of low integration devices and the most resource-intensive samples, the upper and lower estimates of the number of FPGAs of various types of the Xilinx Spartan-6, Xilinx Virtex-4 families and the domestic 5576/5578 series of JSC KTC Electronics are given. It is established that with the number of diagnostic sensors up to 200, depending on the FPGA family, up to 17 low integration chips and up to 7 resource-intensive chips are required to implement one monitoring polling device.

Technical functional diagnostics; ordinal logic; variable priority; FPGA.

Введение. Средства контроля и диагностики (СКД) функционального состояния технического объекта являются неотъемлемой частью оборудования для ответственных применений, в частности, бортового радиоэлектронного оборудования летательных и космических аппаратов [1–8]. К современным встроенным иерархическим системам диагностирования и самодиагностирования сложного электронного оборудования предъявляются требования [9, 10]:

- ◆ быстродействие, обеспечивающее работу в темпе реального времени;
- ◆ непрерывный сбор и распределение данных от аналоговых и цифровых измерительных датчиков функциональных контрольных точек (ФКТ), встроенных в диагностируемое оборудование для отображения его текущего состояния;
- ◆ обнаружение и локализация отказов оборудования;
- ◆ парирование сбоев и отказов за счет использования процедур динамического перераспределения выполняемых задач на имеющиеся работоспособные ресурсы.

Традиционное решение проблемы предполагает введение избыточности того или иного вида, которая обеспечивается комплексом аппаратно-программных методов контроля работоспособности, диагностики состояния и локализации отказавшего элемента [11].

СКД относятся к классу устройств с высокой приоритетностью обслуживания в общем комплексе оборудования, что накладывает жесткие требования по минимизации показателей времени ожидания, обслуживания и восстановления СКД [12, 13]. В этой связи для контроля цифровых диагностических сигналов перспективными являются реляторные контролирующие опросные устройства (КОУ), основанные на аппарате порядковой логики, дающей существенный временной выигрыш перед традиционной двоичной логикой при решении задач ранжирования числовых массивов, выбора экстремального элемента в массиве, определения его номера и т.п. [14–16].

Проводится много исследований относительно новых подходов к реализации отказоустойчивых систем в базисе ПЛИС, которые благодаря своей гибкой структуре позволяют не только выполнять сложные проекты на одном кристалле и проводить многоуровневую верификацию на всех этапах разработки, но и осуществлять оперативную реконфигурацию внутренней структуры в процессе их функционирования [17, 18].

Постановка задачи. Целью работы является реализация в базе ПЛИС контролируемых опросных устройств, входящих в состав СКД реального времени и основанных на выполнении операций порядковой логики, и оценка требуемых для этого аппаратных ресурсов.

Анализ проблемы. К настоящему времени разработано несколько типов порядково-логических устройств, которые можно использовать в роли КОУ в составе СКД реального времени.

Так, устройство переменного приоритета [19] способно выявить зафиксированную отказ ФКТ, при этом в начале поиска задается номер ФКТ с высшим приоритетом, с которой будет начат опрос, и имеется возможность изменения направления опроса в сторону следующей по приоритету ФКТ. Устройство данного типа обозначим КОУ1. Второе устройство, реализующее способ централизованного контроля группы объектов [20], способно производить поиск экстремального (максимального или минимального) двоичного сигнала, являющегося оцифрованным значением диагностируемого параметра, с одновременным определением номера выработавшей этот сигнал ФКТ. Устройство данного типа обозначим КОУ2.

Основными преимуществами ПЛИС с точки зрения их использования для реализации релейных КОУ в составе СКД являются возможность программирования или изменения конфигурации непосредственно в диагностической системе, наличие средств автоматизированного проектирования для моделирования устройств в базе ПЛИС, относительная простота комплексирования с диагностируемым оборудованием [21].

Для разработки и симуляции работы релейных КОУ цифровых сигналов используем прикладной программный пакет ISE Design Suite 14.7.

Реализация и тестирование КОУ в базе ПЛИС. На рис. 1 представлены символ верхнего уровня и комбинационная схема КОУ1 с управляемыми приоритетом и направлением поиска, предназначенного для обслуживания четырех ФКТ с целью определения номера зафиксированной отказ ФКТ.

На входы КОУ1 x_1, x_2, x_3, x_4 подаются однобитовые двоичные значения сигналов ФКТ, отказ индицируется единичным состоянием. Приоритетность поиска задается двоичным вектором U на входах u_1, u_2, u_3, u_4 , содержащим код адреса ФКТ, с которой будет начат опрос. Направление обхода ФКТ (прямое или обратное) задается двоичным вектором S на входах s_1, s_2 . Выходы y_1, y_2, y_3, y_4 определяют побитовый адрес зафиксированной отказ ФКТ. В случае отсутствия отказов на всех выходах устанавливаются нулевые состояния. Управление приоритетами и порядком поиска осуществляет программа, регулирующая работу СКД. После обслуживания запроса производится операция сброса ячейки регистра, в которой этот запрос хранился до обслуживания

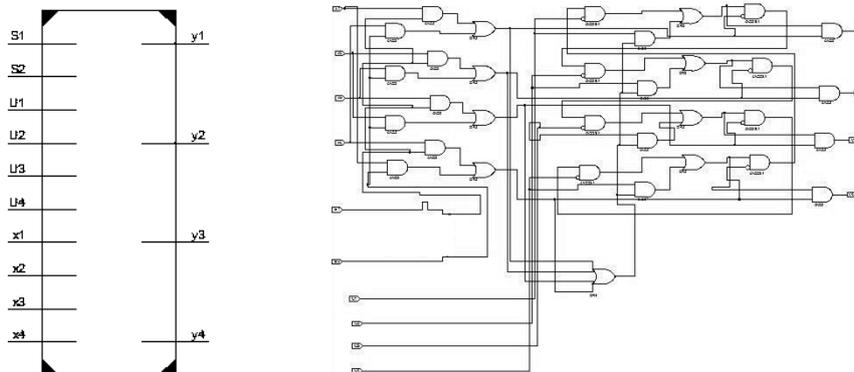


Рис. 1. Символ верхнего уровня и комбинационная схема КОУ1

Единичным состоянием входа s1 задается прямой порядок опроса ФКТ (в направлении увеличения номера), при этом на выходе двоичный код номера ФКТ с отказом формируется начиная с младшего разряда. Единичным состоянием входа s2 задается обратный порядок опроса ФКТ (в направлении уменьшения номера), при этом прямой код номера ФКТ с отказом формируется начиная со старшего разряда. Одинаковые значения на входах s1 и s2 является запрещенным состоянием.

В табл. 1 приведены состояния входов и выходов устройства на различных интервалах времени для тестового примера симуляции работы КОУ1. На рис. 2 приведены соответствующие временные диаграммы на выводах данного устройства.

Таблица 1

Результаты симуляции работы КОУ1

Интервал, нс	Входы										Выходы				
	x1	x2	x3	x4	u1	u2	u3	u4	s1	s2	y1	y2	y3	y4	
0...100	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
100...200	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
200...300	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
300...400	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
400...500	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
500...600	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1

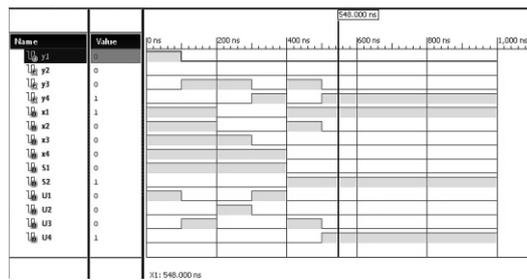


Рис. 2. Пример симуляции работы КОУ1

Анализ состояния выводов комбинационной схемы КОУ1 подтверждает правильность функционирования устройства:

- ◆ на интервале 0...100 нс на всех четырех ФКТ задан отказ (x1=1, x2=1, x3=1, x4=1); приоритетной указана первая ФКТ (u1=1); порядок проверки задан прямой (s1=1); единица сформирована на выходе y1, двоичный код номера выбранной ФКТ 1000; результат верный;
- ◆ на интервале 100...200 нс на всех четырех ФКТ задан отказ (x1=1, x2=1, x3=1, x4=1); приоритетной указана третья ФКТ (u3=1); порядок проверки задан прямой (s1=1); единица сформирована на выходе y3, двоичный код номера выбранной ФКТ 0010; результат верный;
- ◆ на интервале 200...300 нс отказ задан на третьей и четвертой ФКТ (x3=1, x4=1); приоритетной указана вторая ФКТ (u2=1), на которой отказа нет (x2=0); порядок проверки задан прямой (s1=1); единица сформирована на выходе y3, что соответствует ближайшей в прямом направлении ФКТ с отказом, двоичный код номера выбранной ФКТ 0010; результат верный;
- ◆ на интервале 300...400 нс отказ задан на четвертой ФКТ (x4=1); приоритетной указана первая ФКТ (u1=1), на которой отказа нет (x1=0); порядок проверки задан прямой (s1=1); единица сформирована на выходе y4, что соответствует ближайшей в прямом направлении ФКТ с отказом, двоичный код номера выбранной ФКТ 0001; результат верный;

◆ на интервале 400...500 нс отказ задан на первой и второй ФКТ ($x_1=1$, $x_2=1$); приоритетной указана третья ФКТ ($u_3=1$), на которой отказа нет ($x_3=0$); порядок поиска задан обратный ($s_2=1$); единица сформирована на выходе u_3 , двоичный код номера выбранной ФКТ начиная со старшего разряда 0010, код начиная с младшего разряда 0100, что соответствует ближайшей в обратном направлении обхода ФКТ с отказом; результат верный;

◆ на интервале 500...600 нс отказ задан на первой ФКТ ($x_1=1$); приоритетной выбрана четвертая ФКТ ($u_4=1$), на которой отказа нет ($x_4=0$); порядок проверки задан обратный ($s_2=1$); двоичный код номера выбранной ФКТ начиная со старшего разряда 0001, код начиная с младшего разряда 1000, что соответствует ближайшей в обратном направлении обхода ФКТ с отказом; результат верный.

Разработанная комбинационная схема КОУ1 очевидным образом масштабируется на произвольное количество n обслуживаемых ФКТ. Достоинствами КОУ1 являются:

- ◆ количество реализуемых приоритетов равно $2n!$;
- ◆ возможность динамически в темпе реального времени перестраивать приоритеты обслуживания ФКТ.

Основные недостатки КОУ1:

- ◆ рост аппаратных затрат пропорционален увеличению числа ФКТ;
- ◆ при увеличении числа ФКТ $n > 20 \dots 25$ велика вероятность возникновения эффекта «гонки сигналов»;
- ◆ ограниченное число уровней приоритетов, равное $2C_n^1$.

На рис. 3 приведена оценка требуемых ресурсов для реализации КОУ1 в базе ПЛИС. Рассмотрены ПЛИС, представляющие семейства Xilinx Spartan-6, Xilinx Virtex-4 [22] и отечественные серии 5576/5578 АО «КТЦ «Электроника» [23]. Выбрано по два представителя каждого семейства – приборы низкой интеграции и наиболее ресурсоемкие изделия.

Из рис. 3,а видно, что количество требуемых логических элементов N_{LC} и пользовательских контактов $N_{I/O}$ ПЛИС определяются только числом обслуживаемых ФКТ n и растут линейно. Требование по количеству пользовательских контактов является более жестким, поскольку их количество примерно вчетверо больше числа логических элементов.

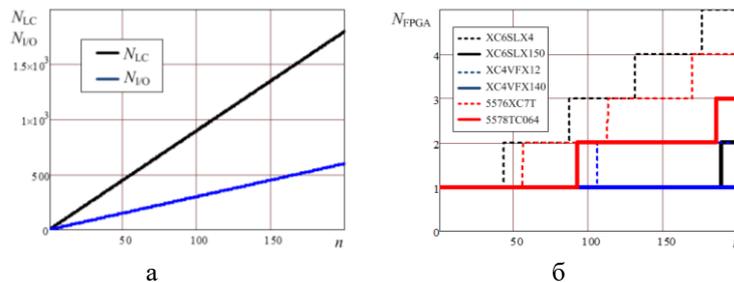


Рис. 3. Оценка требуемых ресурсов для реализации КОУ1 в базе ПЛИС: а – количество логических элементов и пользовательских контактов; б – количество ПЛИС различных типов

График на рис. 3,б демонстрирует изменение требуемого количества ПЛИС N_{FPGA} для реализации КОУ1 при увеличении числа обслуживаемых ФКТ. Для реализации КОУ1 с обслуживанием до 200 ФКТ требуется от 1 до 3 ресурсоемких ПЛИС (сплошные линии) и от 2 до 5 ПЛИС низкой интеграции (пунктирные линии) в зависимости от семейства.

На рис. 4 представлены символ верхнего уровня и комбинационная схема КОУ2 для выбора экстремального цифрового диагностического сигнала и одно-временного определения номера соответствующей ФКТ из трех обслуживаемых.

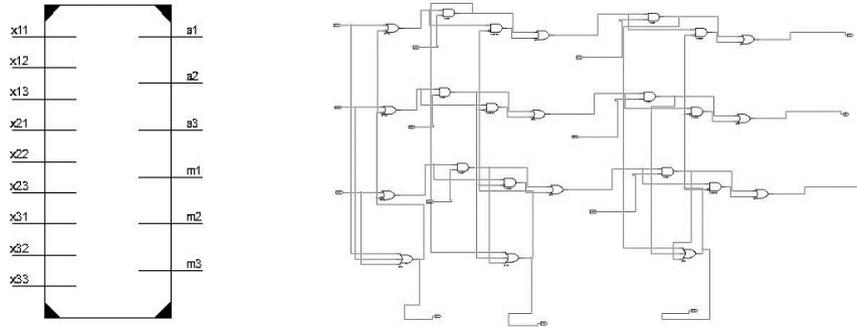


Рис. 4. Символ верхнего уровня и комбинационная схема КОУ для определения экстремального диагностического сигнала и номера соответствующей ФКТ

На входы КОУ2 подаются цифровые диагностические сигналы, считываемые из регистров, содержащих слова состояния каждой ФКТ, биты поступают отдельно на входы x11, x12, x13, x21, x22, x23, x31, x32, x33. Слово состояния каждой ФКТ (ее номер соответствует первому индексу в обозначении входа) состоит из трех бит (второй индекс в обозначении входа). На выходах a1, a2, a3 формируется прямой код номера ФКТ с экстремальным значением диагностического сигнала; на выходах m1, m2, m3 формируется прямой код этого экстремального значения. Опрос производится с абсолютным приоритетом в порядке возрастания номеров ФКТ. Для выбора максимального сигнала в регистрах ФКТ слова состояния записываются в прямом коде, для выбора минимального значения – в обратном коде.

Считывание регистров состояния ФКТ, выработка величины экстремума и номера ФКТ производятся по запросу из СКД, обновление регистров – по команде сброса из СКД.

В табл. 2 приведены результаты тестирования работы КОУ2 для двух наборов сигналов ФКТ. На рис. 5 представлены соответствующие временные диаграммы на выводах данного устройства.

Таблица 2

Результаты тестирования работы КОУ2

Тест	Входы									Выходы					
	x11	x12	x13	x21	x22	x23	x31	x32	x33	a1	a2	a3	m1	m2	m3
1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1
2	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1

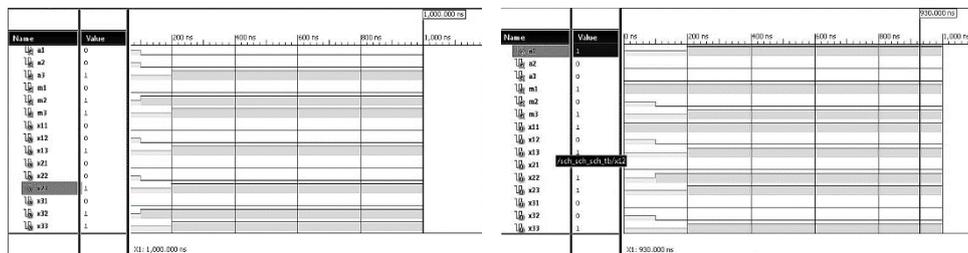


Рис. 5. Пример симуляции работы КОУ2

Как следует из табл. 2 и рис. 5, комбинационная схема КОУ2 работает корректно:

- ◆ Тест 1: максимальным является сигнал третьей ФКТ; сформированы код номера ФКТ 001 на выходах a_1, a_2, a_3 и код максимального сигнала 011 на выходах m_1, m_2, m_3 ; результат верный;

- ◆ Тест 2: максимальным является сигнал первой ФКТ; сформированы код номера ФКТ 100 на выходах a_1, a_2, a_3 и код максимального сигнала 101 на выходах m_1, m_2, m_3 ; результат верный.

Разработанная комбинационная схема КОУ2 очевидным образом масштабируется на произвольное количество n опрашиваемых ФКТ и произвольную разрядность слова состояния ФКТ. Достоинства КОУ2:

- ◆ значение экстремального сигнала и номер соответствующей ФКТ вырабатываются за один такт работы СКД;
- ◆ возможность выбора максимального или минимального сигнала;
- ◆ возможность упорядочивания массива значений сигналов ФКТ за один цикл, если на каждом такте выбранный экстремальный сигнал и номер ФКТ сохранять в памяти и исключать из дальнейшего анализа.

На рис. 6 приведена оценка требуемых ресурсов для реализации КОУ2 в базе ПЛИС при различных значениях разрядности $m_{\text{АЦП}}$ слова состояния ФКТ. Из рис. 6,а видно, что количество требуемых логических элементов N_{LC} и пользовательских контактов $N_{\text{I/O}}$ ПЛИС определяются числом обслуживаемых ФКТ n и разрядностью цифровых диагностических сигналов $m_{\text{АЦП}}$, при этом рост N_{LC} и $N_{\text{I/O}}$ имеет линейный характер. Увеличение разрядности АЦП с 4 до 14 приводит к росту N_{LC} и $N_{\text{I/O}}$ примерно втрое.

График на рис. 6,б демонстрирует изменение требуемого количества N_{FPGA} ПЛИС указанных ранее типов для реализации КОУ2 при увеличении числа обслуживаемых ФКТ с учетом разрядности слова состояния ФКТ $m_{\text{АЦП}}=14$. Для реализации КОУ2 с обслуживанием до 200 ФКТ требуется от 3 до 7 ресурсоемких ПЛИС и от 6 до 14 ПЛИС низкой интеграции в зависимости от семейства.

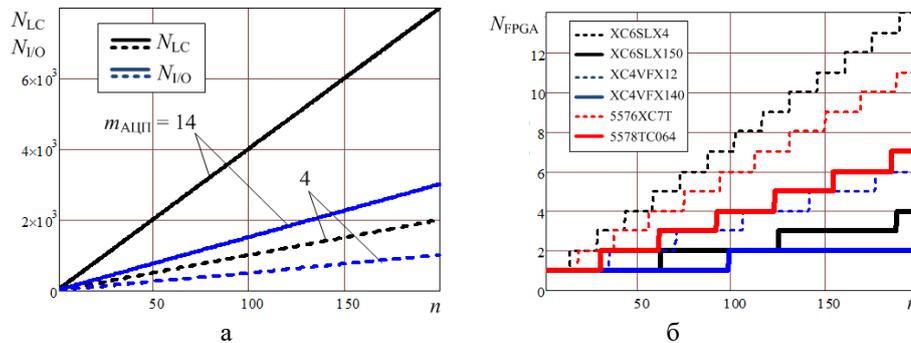


Рис. 6. Оценка требуемых ресурсов для реализации КОУ2 в базе ПЛИС:
 а – количество логических элементов и пользовательских контактов;
 б – количество ПЛИС различных типов

В табл. 3 сведены основные параметры и требуемое число ПЛИС различных типов для реализации рассматриваемых КОУ при количестве опрашиваемых ФКТ $n=200$ и разрядности диагностических сигналов $m_{\text{АЦП}}=14$.

Таблица 3

Основные характеристики и требуемое число ПЛИС для реализации КОУ

ПЛИС	Xilinx				АО «КТЦ «Электроника»	
	Spartan-6		Virtex-4			
	XC6SLX4	XC6SLX150	XC4VFX12	XC4VFX140	5576XC7T	5578TC064
Размеры корпуса, мм	8 x 8	31 x 31	27 x 27	40 x 40	37 x 37	49 x 49
N_{LC}	3 840	147 443	12 312	142 128	1 728	55 856
$N_{I/O}$	132	576	320	896	170	279
N_{FPGA} КОУ1	5	2	2	1	4	3
N_{FPGA} КОУ2	14	4	6	3	11	7

Следует отметить, что ресурсоемкие ПЛИС имеют существенные размеры корпуса, что необходимо учитывать при проектировании конструкции СКД.

Заключение. Таким образом, в базе ПЛИС реализованы релейные контролируемые опросные устройства цифровых диагностических сигналов, базирующиеся на принципах порядковой логики и способные с минимальными временными затратами действовать в условиях динамически изменяющейся обстановки. Исследованные КОУ выявляют номер датчика, зафиксировавшего отказ или сбой оборудования, при этом устанавливается приоритет опроса датчиков и направление их обхода, или выделяют экстремальный диагностический сигнал и номер зафиксировавшего его датчика за один такт работы системы функционального допускового контроля и диагностики.

Установлено, что при обслуживании до 200 функциональных контрольных точек диагностических датчиков для создания приоритетного КОУ в зависимости от семейства ПЛИС требуется от 1 до 3 корпусов ресурсоемких ПЛИС и от 2 до 5 ПЛИС низкой интеграции. Создание КОУ, определяющего значение 14-разрядного экстремального сигнала и номер соответствующего датчика, потребует от 3 до 7 ресурсоемких ПЛИС и от 6 до 14 ПЛИС низкой интеграции в зависимости от семейства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щербаков Н.С., Самхарадзе Т.Г., Рыбин В.М. Построение универсальной встроенной иерархической системы диагностирования сложных радиоэлектронных комплексов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – № 4. – С. 46-50.
2. Федосеев Е.П. Основные технологии создания высоконадежных бортовых вычислительных систем // Тр. ГосНИИАС. Вопросы авионики. – 2015. – Вып. 3. – С. 3-15.
3. Hahn M., Elsner G. Advanced Integrated Control and Data Systems for Constellation Satellites // MAPLD International Conference. NASA Office of Logic Design, Washington, USA. – 2002. – Pp. 217-225.
4. Hayden S., Christa S., Shulman S. Advanced Diagnostic System on Earth Observing One // American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2005.
5. Mirko Jakovlievic, Complexity Design Considerations for Integrated Modular Avionics. – Civil Avionics International Forum, China. – April, 2014.
6. Shelton C., Koopman P., Nace W. A Framework for Scalable Analysis and Design of System-Wide Graceful Degradation in Distributed Embedded Systems // Eighth IEEE International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems (WORDS 2003): Guadelajare (Mexico), Jan. 2003. – Guadelajare. – 2003. – P. 8.
7. Eveleens Rene L.C. Open Systems Integrated Modular Avionics – The Real Thing Mission Systems Engineering //– Educational Notes RTO-EN-SCI-176. – 2006. – Neuilly-sur-Seine, November, France. – RTO, Paper 2. – Pp. 2-1-2-22.
8. Fedosov E.A. IMA Russian Program – Overall presentation // European and Russian Joint Avionics Forum, Moscow. – 2009. – 15 p.

9. Кофанов Ю.Н., Сотникова С.Ю. Виртуальное моделирование физических процессов в космической аппаратуре при построении кибернетических систем // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2018. – № 4. – С. 36-44.
10. Wah B.W. *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, Vol. 1. – Wiley-interscience, 2008.
11. Захаров Н.А., Клетиков В.И., Подхватилин Д.С. Управление избыточностью сетевых распределенных систем необслуживаемой авионики // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2018. – № 3. – С. 3-12.
12. Вагин В.Н., Оськин П.В. Многоагентная моделирующая подсистема комплексов диагностики на основе моделей устройств // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2006. – № 6. – С. 131-144.
13. Бакулин В.Н., Малков С.Ю., Гончаров В.В. Ковалев В.И. Управление обеспечением стойкости сложных технических систем. – М.: Физматлит, 2006.
14. Sergey Panychev, Vyacheslav Guzik, Anatoly Samoilenko, Andrey Panychev, The prerequisites of forming a risk management system in the design of facilities space application // *MATEC Web of Conferences* 102, 01030 (2017) V International Forum for Young Scientists «Space Engineering». – DOI: 10.1051/mateconf/201710201030/.
15. Samoilenko A.P., Panychev A.I., Panychev S.A. Statistical Diagnostics of Irreversible Avionics As a Controlled Random Process // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Moscow: National Research University "Higher School of Economics", Russia, Moscow, May 12–14, 2016. – DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491722.
16. Самойленко А.П., Панычев А.И., Панычев С.А. Синтез контроллера внешних прерываний с динамически изменяемым приоритетом // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем*. 2016: Сб. трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. – М.: ИППМ РАН, 2016. – Ч. III. – С. 212-219.
17. Кон Е.Л., Фрейман В.И. Подходы к тестовому диагностированию цифровых устройств // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*. – 2012. – № 6. – С. 231-241.
18. Киселев В.В., Суворов Н.А. Метод диагностики цифровых схем с программируемыми ПЛИС на этапе изготовления // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*. – 2015. – № 14. – С. 97-107.
19. Самойленко А.П., Самойленко И.А., Яцко Ф.Г. Устройство переменного приоритета. SU № 1383353. А1. – А.С. СССР. GO6F 9/46. Бюллетень № 11. 1988.
20. Самойленко А.П., Усенко О.А. Способ централизованного контроля N объектов. – Патент № 2198418 RU. 7G 05 B2 3/02. Бюллетень № 4. 2003.
21. Телец В., Цыбин С., Быстрицкий А., Подъяпольский С. ПЛИС для космических применений. Архитектурные и схемотехнические особенности // *Электроника: наука, технология, бизнес*. – 2005. – № 6 (64). – С. 44-49.
22. URL: <https://www.xilinx.com/> (дата обращения: 20.06.2022).
23. URL: <https://www.edc-electronics.ru/> (дата обращения: 20.06.2022).

REFERENCES

1. Shcherbakov N.S., Samharadze T.G., Rybin V.M. Postroenie universal'noy vstroennoy ierarkhicheskoy sistemy diagnostirovaniya slozhnykh radioelektronnykh kompleksov [Construction of a universal integrated hierarchical system for diagnosing complex radioelectronic complexes], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2012, No. 4, pp. 46-50.
2. Fedoseev E.P. Osnovnye tekhnologii sozdaniya vysokonadezhnykh bortovykh vychislitel'nykh system [Basic technologies for creating highly reliable onboard computing systems], *Trudy GosNIAS. Voprosy avioniki* [Proceedings of GosNIAS. Avionics issues], 2015, Issue 3, pp. 3-15.
3. Hahn M., Elsner G. Advanced Integrated Control and Data Systems for Constellation Satellites, *MAPLD International Conference. NASA Office of Logic Design, Washington, USA. 2002*, pp. 217-225.
4. Hayden S., Christa S., Shulman S. Advanced Diagnostic System on Earth Observing One, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2005.
5. Mirko Jakovlievic, Complexity Design Considerations for Integrated Modular Avionics. Civil Avionics International Forum, China. April, 2014.

6. Shelton C., Koopman P., Nace W. A Framework for Scalable Analysis and Design of System-Wide Graceful Degradation in Distributed Embedded Systems, *Eighth IEEE International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems (WORDS 2003): Guadelajare (Mexico), Jan. 2003*. Guadelajare, 2003, pp. 8.
7. Eveleens Rene L.C. Open Systems Integrated Modular Avionics – The Real Thing Mission Systems Engineering, *Educational Notes RTO-EN-SCI-176*, 2006. Neuilly-sur-Seine, November, France? RTO, Paper 2, pp. 2-1-2-22.
8. Fedosov E.A. IMA Russian Program – Overall presentation, *European and Russian Joint Avionics Forum, Moscow, 2009*, 15 p.
9. Kofanov Yu.N., Sotnikova S.Yu. Virtual'noe modelirovanie fizicheskikh protsessov v kosmicheskoy apparature pri postroenii kiberneticheskikh sistem [Virtual modeling of physical processes in space equipment in the construction of cybernetic systems], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2018, No. 4, pp. 36-44.
10. Wah B.W. Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering, Vol. 1. Wiley-interscience, 2008.
11. Zakharov N.A., Klepikov V.I., Podkhvilin D.S. Upravlenie izbytochnost'yu setevykh raspredelennykh sistem neobsluzhivaemoy avioniki [Redundancy management of network distributed systems of unattended avionics], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2018, No. 3, pp. 3-12.
12. Vagin V.N., Os'kin P.V. Mnogoagentnaya modeliruyushchaya podsystema kompleksov diagnostiki na osnove modeley ustroystv [Multi-agent modeling subsystem of diagnostic complexes based on device models], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAS. Theory and control systems], 2006, No. 6, pp. 131-144.
13. Bakulin V.N., Malkov S.Yu., Goncharov V.V. Kovalev V.I. Upravlenie obespecheniem stoykosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Stability assurance management of complex technical systems]. Moscow: Fizmatlit, 2006.
14. Sergey Panychev, Vyacheslav Guzik, Anatoly Samoilenko, Andrey Panychev, The prerequisites of forming a risk management system in the design of facilities space application, *MATEC Web of Conferences 102, 01030 (2017) V International Forum for Young Scientists «Space Engineering»*. DOI: 10.1051/mateconf/201710201030/.
15. Samoilenko A.P., Panychev A.I., Panychev S.A. Statistical Diagnostics of Irreversible Avionics As a Controlled Random Process, *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Proceedings. Moscow: National Research University "Higher School of Economics", Russia, Moscow, May 12–14, 2016. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491722.
16. Samoilenko A.P., Panychev A.I., Panychev S.A. Sintez kontrollera vneshnikh preryvaniy s dinamicheski izmenyaemym prioritetom [Synthesis of an external interrupt controller with a dynamically variable priority], *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem. 2016: Sb. trudov* [Problems of developing promising micro- and nanoelectronic systems. 2016. Collection of works], pod obshch. red. akademika RAN A.L. Stempkovskogo. – Moscow: IPPM RAS, 2016. Part II, pp. 212-219.
17. Kon E.L., Freiman V.I. Podkhody k testovomu diagnostirovaniyu tsifrovyykh ustroystv [Approaches to test diagnostics of digital devices], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University], 2012, No. 6, pp. 231-241.
18. Kiselev V.V., Suvorov N.A. Metod diagnostiki tsifrovyykh skhem s programmiruemyimi PLIS na etape izgotovleniya [Diagnostic method of digital circuits with programmable FPGAs at the manufacturing stage], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University], 2015, No. 14, pp. 97-107.
19. Samoilenko A.P., Samoilenko I.A., Yatsko F.G. Ustroystvo peremennogo prioriteta [Device of variable priority], SU No. 1383353. A1, A.S. USSR. GO6F 9/46, Bulletin No. 11, 1988.
20. Samoilenko A.P., Usenko O.A. Sposob tsentralizovannogo kontrolya N ob"ektov [Method of centralized control of N objects], Patent No. 2198418 RU, 7G 05 B2 3/02, Bulletin No. 4, 2003.
21. Telec V., Cybin S., Bystrickij A., Pod'yapol'skij S. PLIS dlya kosmicheskikh primeneniy. Arkhitekturnye i skhemotekhnicheskije osobennosti [FPGA for space applications. Architectural and circuit design features], *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, technology, business], 2005, No. 6(64), pp. 44-49.
22. Available at: <https://www.xilinx.com/> (accessed 20 June 2022).
23. Available at: <https://www.edc-electronics.ru/> (accessed 20 June 2022).

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент В.Н. Пуховский.

Панычев Сергей Андреевич – Южный федеральный университет; e-mail: panychev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; к.т.н.

Панычев Андрей Иванович – e-mail: aipanychev@sfedu.ru; тел.: 88634371634; к.т.н.; доцент.

Максимов Александр Викторович – e-mail: avmaksimov@sfedu.ru; к.т.н.; доцент.

Panychev Sergey Andreevich – Southern Federal University; e-mail: panychev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; cand. of eng. sc.

Panychev Andrey Ivanovich – e-mail: aipanychev@sfedu.ru; phone: +78634371634; cand. of eng. sc.; associate professor.

Maksimov Alexander Viktorovich – e-mail: avmaksimov@sfedu.ru; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.518.5

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-280-289

А.В. Хлуденев

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ И СОПТ

Целью исследования является разработка способа параметрического согласования устройств контроля изоляции, систем оперативного постоянного тока и дискретных входов релейной защиты. Использование для питания устройств релейной защиты и других ответственных потребителей изолированных систем оперативного постоянного тока позволяет обеспечивать при их эксплуатации высокую надежность и безопасность. Бесперебойность электроснабжения этих потребителей должна обеспечиваться даже при коротких замыканиях на землю одного из полюсов сети оперативного тока. Гарантией высокой надежности электроснабжения является мониторинг сопротивления изоляции сети и оперативное выполнение ремонтных работ при его снижении ниже критического уровня, задаваемого уставкой. В статье рассматриваются причины, приводящие к опасным уровням асимметрии напряжений полюсов сети относительно земли и ложным срабатываниям дискретных входов релейной защиты при замыкании на землю подключенных к ним сигнальных линий. Предложен основанный на методе многовариантного анализа по постоянному току способ определения согласованных значений уставок контроля изоляции, параметров сети оперативного тока и параметров дискретных входов релейной защиты, при которых устраняются условия появления таких аварий. Также рассмотрено влияние устройств контроля изоляции в системах оперативного постоянного тока на асимметрию напряжений полюсов и работу релейной защиты. Предложена модификация активного метода мониторинга сопротивления изоляции, при которой не возникает дополнительная опасная асимметрия напряжений полюсов сети и дополнительные риски ложных срабатываний релейной защиты. Применение модифицированного метода мониторинга в условиях перекоса напряжений полюсов сети приводит к сужению рабочих участков статических характеристик измерительных преобразователей напряжений полюсов и тока утечки. Получены оценки возникающего в этих режимах увеличения погрешности при измерении сопротивления изоляции.

Система оперативного постоянного тока; сопротивление изоляции; устройство контроля изоляции; релейная защита; асимметрия напряжений; ложное срабатывание; погрешность измерения.

A.V. Khludenev

PARAMETRIC MATCHING OF INSULATION MONITORING DEVICES AND DC DISTRIBUTION SYSTEMS

The aim of the study is to develop a method for parametric matching of insulation monitoring devices, unearthed DC distribution systems and discrete inputs of relay protection. The use of unearthed DC distribution systems for power supply to relay protection devices and other responsible consumers makes it possible to ensure high reliability and safety dur-