



УДК 519.71

DOI:10.18413/2411-3808-2018-45-1-118-128

**МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ  
ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ ТЕСТОВ****METHOD OF ANALYTICAL STRUCTURES DESIGN OF THE RESTRUCTURED  
TESTS FORMER****В.Г. Рубанов, О.В. Луценко, Е.М. Паращук  
V.G. Rubanov, O.V. Lutsenko, E.M. Parashchuk**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov,  
46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia

E-mail: vgrubanov@gmail.com, lucenko 67@mail.ru, kara1205@mail.ru

**Аннотация**

Предложен метод аналитического конструирования цифровых устройств, формирующих тесты произвольной конфигурации для контроля технического состояния бортовых контроллеров и периферийных дискретных устройств системы управления мобильных роботов. Доказана возможность и единственность реализации заданного теста на основе предложенного метода синтеза, использующего полный функциональный набор периодических последовательностей импульсов. Представлена методика синтеза заданного диагностического теста в форме последовательности выполняемых действий с учетом сформулированного и доказанного утверждения и следствий, определяющих особенности формируемой диагностической посылки. Показана иллюстрация применения предложенного метода синтеза на конкретном примере для наиболее общего случая, при этом отмечена возможность автоматизированного построения тестов с помощью контроллера с одновременным выпуском технической документации.

**Abstract**

Authors offer the method of analytical construction of the digital devices forming tests of arbitrary configuration for monitoring the technical condition of onboard controllers and peripheral discrete devices of the control system for mobile robots. Opportunity and uniqueness of implementation of the given test are proved on the basis of the offered method of the synthesis using a complete functional set of periodic pulse sequences. The synthesis method of a given diagnostic test is presented in the form of performed actions sequence in accordance with formulated and proven statement and consequences that determine the specific features of generated diagnostic package. In article is shown the application illustration of the offered synthesis method on a specific example for the most general case. At the same time here is noted the possibility of automated tests construction with the help of controller with the simultaneous issuance of technical documentation.

**Ключевые слова:** работоспособность, диагностика, тест, формирователь, неисправность, живучесть, реконфигурация, адаптация, базис, индукция, триггер, логические элементы, операция конъюнкции.

**Keywords:** working capacity, diagnostics, test, shaper, malfunction, survivability, reconfiguration, adaptation, basis, induction, trigger, logical elements, the operation of conjunction.

---

**Введение**

Проектирование систем автоматического управления мобильными устройствами, обладающими свойством живучести, должно предусматривать введение в структуру бортовой системы встроенной подсистемы контроля работоспособности, диагностики, реконфигурации структуры и программного обеспечения с целью выбора нового уровня функционирования с прежними или сниженными показателями качества. Сложность



такой задачи состоит в том, что при проектировании указанных систем накладывается ограничение на избыточность, причем функционирование встроенных подсистем должно только минимально снижать быстродействие основной системы [Додонов, 1990], хотя в условиях отказов число функций системы существенно возрастает. Кроме функции управления, являющейся основной, необходимо предусмотреть: контроль за состояниями аппаратных и программных средств; диагностику отказов [Sauer, 1971; Wang, Wu, 2006]; механизм локализации отказавшего аппаратного или программного модуля и его изоляции; реконфигурацию ресурсов и их перераспределение с целью возобновления функционирования. Как видно, процедура проектирования бортовой системы управления, обладающей свойством живучести, должна рассматриваться как глобальная системная проблема, поэтому в соответствии с предложенной в [Рубанов, 2011] моделью дезагрегации и коммутативной диаграммой целесообразно расчленение общей задачи на ряд процедур проектирования, относящихся к разным подсистемам по уровню обобщенности их модели функционирования, характеру аппаратной реализации блоков, который естественно определяет способы и подходы к контролю работоспособности и диагностике подсистем и механизмы их восстановления [Yogi, 2009; Kim, Agrawal, 2001]. Наиболее рациональным является выделение следующих трех процедур, определяющих характер функционирования модулей:

- процедуры контроля, диагностики и восстановления аппаратных блоков системы аналогового типа детерминированного или стохастического классов [Жиравок, 2017; Шумский, 2009; Бритов, 2000; Рубанов, 1990];

- процедуры контроля и восстановления контроллеров, входящих в структуру динамических управляющих систем [Чжен, 1972; Горовой, 1990; Романкевич, 2017; Yu, Amyeen, 2003; Yu, Wu, 2000; Zhang, Agrawal, 2010; Kim, Agrawal, 2005];

- процедуры реконфигурации и восстановления программных средств при возникновении сбоев и ошибок в программном обеспечении [Бессонов, 1986; Бухонов, 2017].

### Постановка задачи

Разработать аналитический метод синтеза структуры перестраиваемого формирователя тестов, обнаруживающих неисправность при реализации технологического процесса контроля технического состояния в форме

$$R_2(N_2) \cong \Omega(\ell_K) R_1(N_1) R_3(N_3) \tag{1}$$

бортового контроллера и дискретных периферийных устройств системы управления мобильного робота.

Здесь  $R_2(N_2)$  – результат контроля работоспособности;  $R_1(N_1)$  – исходные данные об объекте контроля;  $R_3(N_3)$  – данные эталонного объекта контроля;

$\Omega(\ell_K) \cong \{\Omega_1(\alpha_1, \beta_1, \dots), \Omega_2(\alpha_2, \beta_2, \dots), \dots, \Omega_m(\alpha_m, \beta_m, \dots)\}$  – логическая схема процесса контроля;  $\Omega_i(\alpha_i, \beta_i, \dots)$  – логическая схема  $i$ -того участка (дискретного устройства, блока платы и т.д.) процесса контроля;  $N$  – количество единиц информации, представляющей собой количество точек контроля, количество различаемых знаний, количество контролируемых параметров в каждой точке, конфигурацию контролирующего теста и т.п.;  $\alpha_i, \beta_i$  – параметры  $i$ -того участка, характеризующиеся такими показателями как время проведения этапа, тип неисправности, ее объем (зона), характер возможной локализации и т.п.

### Аналитическое решение

Для типовых микропроцессорных узлов разработаны тесты достаточной полноты, поэтому в качестве исходной посылки будем считать, что конфигурация тестовой последовательности известна [Бессонов, 1986]. Тогда актуальной является задача формального описания конфигурации теста и синтеза структуры технического устройства



(формирователя), формирующего тестовую посылку путем коммутации типовых логических модулей по принципу агрегатирования в перестраиваемое устройство формирования теста [Рубанов, 2011; Чжен, 1972; Горовой, 1990].

Анализ дискретных устройств и соответствующих тестовых посылок показал, что последние представляют собой различные последовательности  $F(\varepsilon, \tau, T, t)$  периодических импульсов с уровнями 0 или 1, с разной длительностью  $\tau$ , периодом следования  $T$  и различной задержкой  $\varepsilon$  относительно начала отсчета, причем в зависимости от схемного решения и сложности объекта контроля перечисленные выше параметры изменяются. Это приводит к необходимости синтеза перестраиваемого формирователя тестов, причем адаптация его к контролируемому устройству осуществляется поэтапно в соответствие с логической процедурой контроля  $\Omega(\ell_k)$  (1).

Синтез формирователя тестов с адаптивными свойствами по отношению к изменению объекта контроля требует наличия формального (аналитического) описания формируемого теста, что в свою очередь позволит применить такое описание к проектированию структуры искомого формирователя.

В качестве исходной при разработке аналитического аппарата возьмем периодическую функцию  $F$ , параметрически зависящую от аргументов  $\varepsilon, \tau, T$  и обозначим ее как (рис. 1,а)

$$F(\varepsilon, \tau, T, t) = F_{\varepsilon, \tau}^T(t) \quad (2)$$

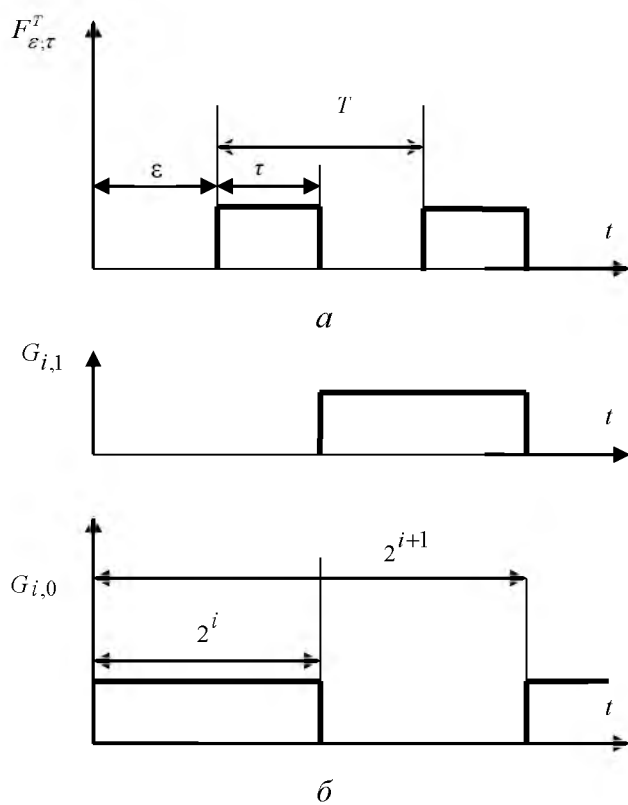


Рис. 1. Тестовая посылка и ее параметры  
Fig. 1. Test sending and options

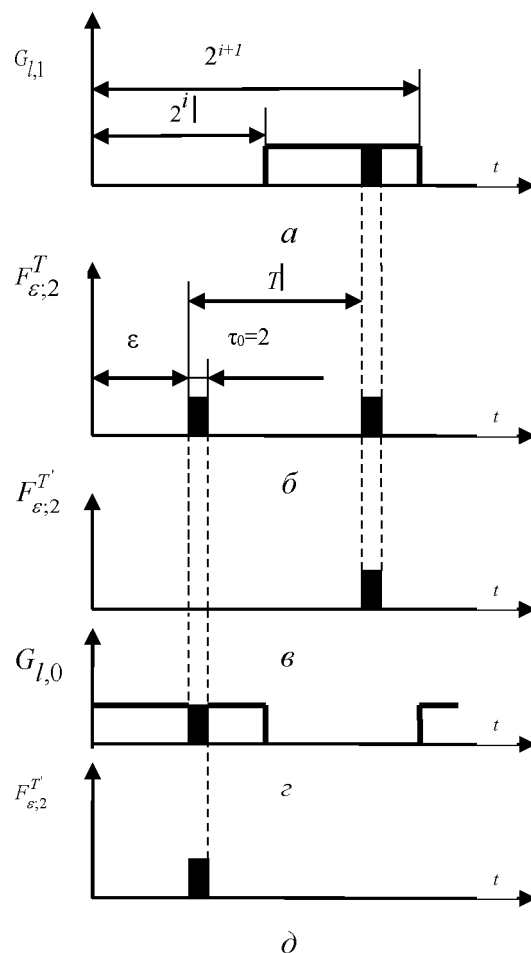


Рис. 2. Иллюстрация процедуры формирования тестовой посылки с произвольными параметрами  
Fig. 2. Illustration of the procedure of generating test packages with arbitrary parameters



Покажем, что для формирования тестовой посылки (2) с произвольными параметрами можно использовать композицию двух автоматов с памятью.

Пусть первый автомат, на основе множества входных сигналов  $X = F_{1,1}^2(t), \overline{F}_{1,1}^2(t)$ , получаемых от генератора тактовой частоты, в соответствии с функциями переходов автомата  $g(x(t), v(t-1))$  и его выходов  $f(x(t), v(t-1))$ , формирует два набора периодических функций, представляющие собой выходные сигналы  $G_{i,1}(t)$  и  $G_{i,0}(t)$

$$F(t) = \{F_{2^i, 2^i}^{2^{i+1}}(t)\}_{i=1}^n = G_{i,0}(t), \tag{3}$$

$$\overline{F}(t) = \{\overline{F}_{2^i, 2^i}^{2^{i+1}}(t)\}_{i=1}^n = G_{i,1}(t), \tag{4}$$

обладающие следующим свойством (рис. 1, б):

$$G_{i,1}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 2^i, \\ 1 & \text{при } 2^i \leq t \leq 2^{i+1}; \end{cases} \tag{5}$$

$$G_{i,0}(t) = 1 - G_{i,1}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } 2^i \leq t \leq 2^{i+1}, \\ 1 & \text{при } 0 \leq t < 2^i; \end{cases}$$

при этом их период равен  $2^{i+1}$ .

Сравнение элементов множества  $F(t)$  (3) и  $\overline{F}(t)$  (4) обладающих свойствами (5) позволяет заметить, что в результате перехода из  $v_i$  в  $v_j$  реализуются операции логического отрицания и последовательного деления частоты на два. Таким образом, первый автомат, воспроизводящий наборы периодических функций (3) и (4), является простейшей линейкой триггеров с двумя выходами.

Выходные сигналы рассмотренного выше первого автомата, представляющие собой объединение совокупностей (3) и (4)

$$F_n(t) = F(t) \cup \overline{F}(t), \tag{6}$$

служат входными сигналами для второго автомата. Причем объединение совокупностей (6), содержащее все выходные сигналы первого автомата (линейки триггеров), является полным, т.е. достаточным для синтеза контрольно-диагностических тестов  $F_{\varepsilon, \tau}^T(t)$ . Действительно, поскольку члены рядов (3) и (4) являются периодическими функциями времени с одним и тем же начальным моментом формирования сигналов (см. рис. 1, б), то любой выходной последовательности искомой функции  $F_{\varepsilon, \tau}^T(t)$  второго автомата однозначно соответствует некоторый набор входных сигналов  $G_{i,1}(t), G_{i,0}(t)$  в заданный момент времени  $t$ .

Таким образом, второй автомат, как будет показано ниже, формирует искомый тест, имеющий заданные параметры  $\varepsilon, \tau$  и  $T$ , с помощью коммутации отдельных выходов первого автомата (линейки триггеров) с двумя многовыходовыми логическими элементами, реализующими операции конъюнкции, выходные сигналы которых подаются на отдельные входы триггера. При этом на выходах триггеров образуется множество выходных сигналов второго автомата, представляющих собой набор искомого контрольно-диагностических тестов. При этом появляется возможность аналитического синтеза второго автомата, базирующегося на операции разложения десятичных чисел по степеням числа два, соответствующим в свою очередь определенным функциям из функционального набора (6), что позволяет отказаться от применяемых сложных эмпирических и графических построений.



Таким образом, формирователь состоит из двух автоматов с памятью, первый из которых содержит линейку триггеров, а второй – разбитые попарно многовходовые схемы  $I$  и триггеры с отдельными входами. Входы элементов  $I$ , составляющие пару, подключены к отдельным входам соответствующего триггера.

Выходные сигналы первого элемента коммутируются на одни или другие входы многовходовых элементов, а правило коммутации определяется конфигурацией искомого теста, т.е. его параметрами. Однако, прежде чем изложить правило коммутации, необходимо убедиться в возможности и единственности способа получения требуемого диагностического теста  $F_{\varepsilon;\tau}^T(t)$  из полного функционального набора  $F_n(t)$  (6).

В случае справедливости этого утверждения появляется возможность формализовать процедуру формирования требуемого теста  $F_{\varepsilon;\tau}^T(t)$  по заданным параметрам  $\varepsilon$ ,  $\tau$  и  $T$  из полного функционального набора  $F_n(t)$ . Для доказательства поставленной цели сформулируем утверждение, из которого вытекает как возможность, так и единственность способа формирования теста.

*Утверждение.* Любая тестовая посылка  $F_{\varepsilon;\tau}^T(t)$  с заданным периодом  $T$  следования импульсов «стандартной» длительности ( $\tau_0 = 2$ ) и требуемой задержкой  $\varepsilon$  является пересечением конечного множества исходных посылок  $G_{i,1}$  и  $G_{i,0}$  из полного функционального набора  $F_n(t)$ , т.е.

$$F_{\varepsilon,2}^T = \bigcap_{i=1}^{l-1} G_{i,\alpha_i}, \quad (7)$$

где  $\alpha_i$  – значение  $i$ -го двоичного разряда числа  $\varepsilon$  ( $\alpha_i=1$  или  $0$ );  $G_{i,1}(t)=F_{2^i;2^i}^{2^{i+1}}(t)$  а

$G_{i,0}(t)=1-G_{i,1}(t)$ ;  $l \geq 2$  и находится из соотношения  $T=2^l$ , откуда  $l=\log_2 T$ .

*Доказательство.* Воспользуемся методом математической индукции. На первом шаге проверим утверждение (7) в базисе индукции для малых значений  $l$ . Пусть  $l=2$ , что соответствует  $T=2^l=4$ .

Тогда задача состоит в получении тестовой посылки вида  $F_{0,2}^4(t)$  или  $F_{2,2}^4$ .

Если  $\varepsilon=0$ , то, следуя формуле разложения числа по степеням 2,

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{l-1} \alpha_i 2^i, \quad (8)$$

получаем  $\varepsilon=\alpha_i 2^i=0$ . Значит  $\alpha_i=0$ , что соответствует исходной посылке  $G_{l,0}$ .

Если  $\varepsilon=2$ , то согласно выражению (8)  $\varepsilon=\alpha_i 2^i=2$ . Значит  $\alpha_i=1$ , а это соответствует исходной посылке  $G_{l,1}$ .

Искомые тестовые посылки, по утверждению, образуются пересечением элементов из множества исходных посылок, причем количество элементов, участвующих в пересечении, равно  $m=l-1$ , т.е.  $m=2-1=1$ . Следовательно, искомая тестовая посылка есть сама исходная посылка  $F_{2,2}^4(t)=G_{l,1}$  или  $F_{0,2}^4(t)=G_{l,0}$ .

Таким образом, базис индукции обоснован.

Рассмотрим теперь произвольный шаг индукции. Предположим, что утверждение (7) справедливо для некоторого значения  $l > 2$ ,  $T=2^l$ , и докажем, что выражение (7) будет верно и для значения  $l+1$ , где  $\varepsilon'=\varepsilon+\alpha_l 2^l$ , или с учетом соотношения (8)

$$\varepsilon' = \sum_{i=1}^l \alpha_i 2^i. \quad (9)$$

Согласно утверждению выражение (7) можно записать



$$F_{\varepsilon;2}^T = \prod_{i=1}^l G_i \alpha_i = \left\{ \prod_{i=1}^{l-1} G_i \alpha_i \right\} G_{l;\alpha_l} \tag{10}$$

Выражение (10) представимо в форме:

$$F_{\varepsilon;2}^T = F_{\varepsilon;2}^T \& G_{l;\alpha_l} \tag{11}$$

Как уже отмечалось,  $\alpha_l$  может принимать значение 0 или 1. Рассмотрим каждый из возможных вариантов. Пусть  $\alpha_l=1$ . Тогда посылка  $G_{l;1}$  соответствует периодической последовательности импульсов длительностью  $\tau_l=2^l$  с задержкой  $\varepsilon=\tau_l$  относительно начала отсчета (рис. 2, а), а тестовая посылка  $F_{\varepsilon;2}^T$  предыдущего шага  $\tau_l = 2^l$  индукции представляет собой последовательность импульсов длительностью  $\tau_0=2$  с задержкой  $\varepsilon$  и периодом  $T$  (см. рис. 2, б).

Функция  $F_{\varepsilon;2}^T$ , получаемая из выражения (11), удовлетворяет всем требованиям  $(l+1)$ -го шага индукции (см. рис. 2, в).

При  $\alpha_l=0$  задержка  $\varepsilon'=\varepsilon+0 \cdot 2^l=\varepsilon$  и второй элемент конъюнкции в формуле (11) будет  $G_{l;0}$  (см. рис. 2, г), а тестовая посылка на  $(l+1)$ -м шаге соответствует требуемым параметрам  $T'=2T=2^{l+1}$ ,  $\varepsilon'=\varepsilon$  (см. рис. 2, д). Так как  $l$  может принимать любое целое число, начиная с базисного ( $l=2$ ), видим, что сформулированное выше утверждение для указанных условий справедливо. Значит, имеется единственный способ получения заданного теста из полного функционального набора  $F_n(t)$ .

На основании доказанного утверждения и разработанного аналитического аппарата (3) и (4) можно предложить аналитический метод синтеза искомого теста.

Задавая параметры требуемой тестовой посылки, получаем искомую последовательность импульсов путем коммутации соответствующих выходов линейки триггеров, на которых формируются исходные посылки, с входами логического многоходового элемента совпадения, реализующего условие (7) утверждения.

Если длительность импульсов  $\tau \neq 2$ , т.е. импульсы не являются «стандартными», то диагностический тест весьма просто найти с помощью двух промежуточных тестовых посылок с импульсами «стандартной» длительности  $F_{\varepsilon;2}^T$ . Располагая двумя последовательностями импульсов с различными параметрами  $F_{\varepsilon;2}^T$  и  $F_{\varepsilon';2}^T$ , можно получить диагностическую тестовую посылку с помощью триггера с раздельными входами. Для этого достаточно подать на каждый из входов триггера сигналы  $F_{\varepsilon;2}^T$  и  $F_{\varepsilon';2}^T$  с выходов логических многоходовых элементов совпадения, тогда выходной сигнал триггера будет представлять собой искомый диагностический тест.

*Следствие 1.* Формирование диагностической тестовой посылки  $F$  с произвольными параметрами  $T$ ,  $\varepsilon$  и длительностью  $\tau$  импульсов, отличной от «стандартной», но определяемой степенной зависимостью от нее ( $\tau=2^m$ ) можно проводить без использования триггера с помощью одного логического многоходового элемента совпадения путем подачи на его входы множества исходных посылок  $G_{i;\alpha_i}$  из полного набора  $F_n(t)$ , исключая исходные посылки, длительность импульсов которых меньше длительности импульса в искомом диагностическом тесте, т.е.

$$F = F_{\varepsilon;2^m}^T = \prod_{i=m}^{l-1} G_{i;\alpha_i} \tag{12}$$

где  $m$  – любое целое положительное число, не равное нулю.

*Следствие 2.* Формирование диагностической тестовой посылки  $F$  с произвольными параметрами  $T$ ,  $\varepsilon$  и длительностью  $\tau$  можно осуществить на базе двух промежуточных тестовых посылок  $F_{\varepsilon;2}^T$  (7), получаемых с помощью многоходовых логических элементов совпадения, каждая из которых представляет собой



последовательность импульсов «стандартной» длительности ( $\tau=2$ ), с одинаковым периодом их следования, но различными сдвигами ( $\varepsilon$  и  $\varepsilon+\tau$ ), соответственно подаваемых на отдельные входы триггера.

### Методика синтеза заданного диагностического теста

Располагая приведенными утверждением и следствиями, предлагаем следующую методику построения второго автомата, формирующего требуемый диагностический тест:

1. Анализ исходных параметров  $T$ ,  $\varepsilon$  и  $\tau$  искомого диагностического теста, в результате которого устанавливается принадлежность теста к одному из возможных вариантов: а) искомая посылка является исходной  $G_{i,\alpha_i}$ ; б)  $\tau = 2$ ; в)  $\tau = \tau^m$ ; г)  $\tau = \tau_0^m$ .

2. Выбор способа формирования выходных тестов по результатам анализа заданных параметров  $T$ ,  $\varepsilon$  и  $\tau$  теста. В первом случае построение тривиально, поскольку искомый тест является одним из выходных сигналов первого автомата (некоторого звена линейки триггеров), во втором случае основой построения автомата будет утверждение (7), в третьем – следствие 1 и, наконец, в четвертом, последнем случае такой базой будет условие (7) утверждения и следствие 2. Последний случай является наиболее общим, поэтому дальнейшую методику будем излагать применительно к этому случаю.

3. Определение параметров промежуточных тестовых посылок  $F_1$  и  $F_2$ , предусмотренных следствием 2, по параметрам искомого диагностического теста  $F = F_{\varepsilon,\tau}^T$

$$F_1 = F_{\varepsilon,2}^T, \quad F_2 = F_{\varepsilon_1,2}^T, \quad (13)$$

где  $\varepsilon_1 = \varepsilon + \tau$ .

4. Формирование промежуточных тестовых посылок  $F_1$  и  $F_2$ , имеющих импульсы «стандартной» длительности ( $\tau=2$ ) согласно условию (7) утверждения (случай б). Этот этап выполняется в следующем порядке:

а) определяется число  $l$ , равное количеству триггеров первого автомата, характеризующее количество исходных посылок  $G_{i,\alpha_i}$  в выражении (7):

$$l = \log_2 T; \quad (14)$$

б) разлагаются по степеням два значения задержек  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_1$  (8), (9), в результате чего находятся коэффициенты  $\alpha_i$ , являющиеся признаком для выбора исходных посылок

$$G_{i,\alpha_i} \in F_n(t);$$

в) формируются тестовые посылки  $F_1$  и  $F_2$  на основании выбранных исходных посылок  $G_{i,\alpha_i}$  в соответствии с выражением (7).

5. Формирование искомого контрольно-диагностического теста  $F$  путем подачи промежуточных тестовых посылок  $F_1$  и  $F_2$  на отдельные входы триггеров.

Проиллюстрируем на практике процесс синтеза структуры формирователя по заданной конфигурации теста предложенным аналитическим методом.

### Синтез структуры формирователя по заданной конфигурации теста

Пусть необходимо сформировать контрольно-диагностический тест  $F = F_{20,6}^{32}$  с параметрами  $T=32$ ,  $\varepsilon=20$ ,  $\tau=6$ . Воспользуемся предложенным выше методом. В соответствии с п.1 метода имеем случай г)  $\tau \neq 2^m$ , так как длительность импульса  $\tau=6$ , т.е. рассматривается общий случай. В соответствии с п.2 метода воспользуемся утверждением и следствием 2. Следовательно, по п.3 метода необходимо формировать промежуточные тестовые посылки (13)

$$F_1 = F_{20;6}^{32} \quad \text{и} \quad F_2 = F_{(20+6);2}^{32};$$

а) в соответствии с п.4 метода находим параметр  $l$  (14), т.е. определяем количество триггеров в первом автомате

$$l = \log_2 T = \log_2 32 = 5.$$

Находим коэффициент  $\alpha_i$  по формуле (8)

$$\varepsilon = 20 = \sum_{i=1}^{5-1} \alpha_i 2^i = \alpha_4 2^4 + \alpha_3 2^3 + \alpha_2 2^2 + \alpha_1 2^1 = 1 \cdot 16 + 0 \cdot 8 + 1 \cdot 4 + 0 \cdot 2,$$

откуда  $\alpha_1=0, \alpha_2=1, \alpha_3=0, \alpha_4=1$ . Для задержки  $\varepsilon_l$  имеем по формуле (9)

$$\varepsilon_1 = 26 = 1 \cdot 16 + 1 \cdot 8 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 2,$$

следовательно,  $\alpha_1=1, \alpha_2=0, \alpha_3=1, \alpha_4=1$ .

Выбираем исходные посылки для формирования  $F_1$  и  $F_2$ . В соответствие с формулой (7) получаем

$$F_1 = G_{1;\alpha_1} \& G_{2;\alpha_2} G_{3;\alpha_3} G_{4;\alpha_4} = G_{1;0} \& G_{2;0} \& G_{3;0} \& G_{4;0}.$$

Аналогично

$$F_2 = G_{1;1} \& G_{2;0} \& G_{3;1} \& G_{4;1}.$$

Операция конъюнкции реализуется с помощью многовходового элемента «И» (рис. 3).

В соответствие с п.5 метода формируем искомый диагностический тест  $F$  путем подачи вспомогательных тестов  $F_1$  и  $F_2$  на отдельные входы триггера (см. рис. 3).

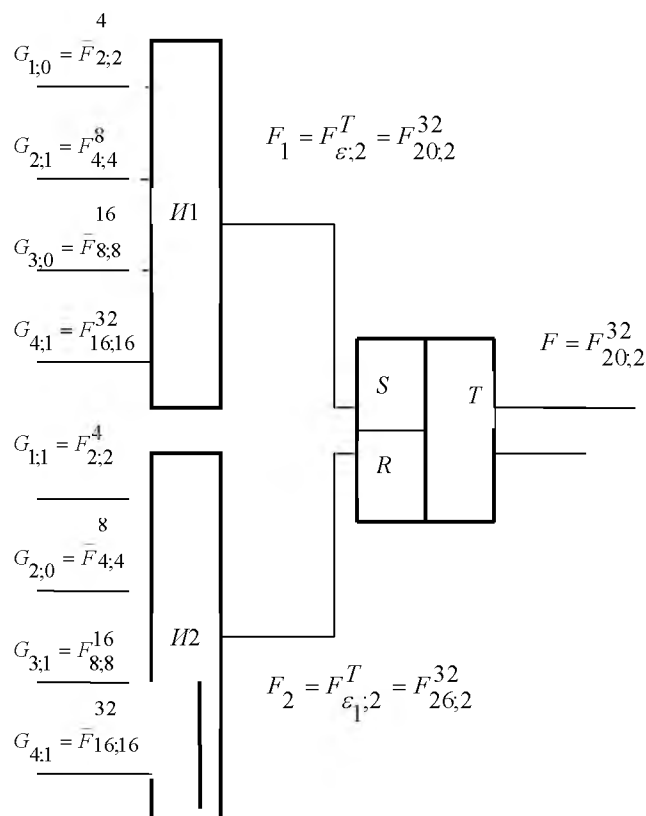


Рис. 3. Аппаратурная реализация теста  $F_{20;6}^{32}$  при помощи промежуточных функций  $F_{20;2}^{32}$  и  $F_{26;2}^{32}$

Fig. 3. Hardware implementation of test  $F_{20;6}^{32}$  by means of the intermediate functions  $F_{20;2}^{32}$  and  $F_{26;2}^{32}$

Для иллюстрации полного совпадения диагностических тестов, полученных предложенным аналитическим способом и применяемым графическим, приведены эпюры тестов (рис. 4), участвующих в формировании искомого диагностического теста  $F$ . Видно, что тест, получаемый на выходе триггера с отдельными входами, удовлетворяет заданным параметрам, причем создание автомата, генерирующего диагностический тест, осуществлено аналитическим способом без громоздких графических или эмпирических построений, сложность которых возрастает с увеличением значений параметров  $\varepsilon$  и  $\tau$ .



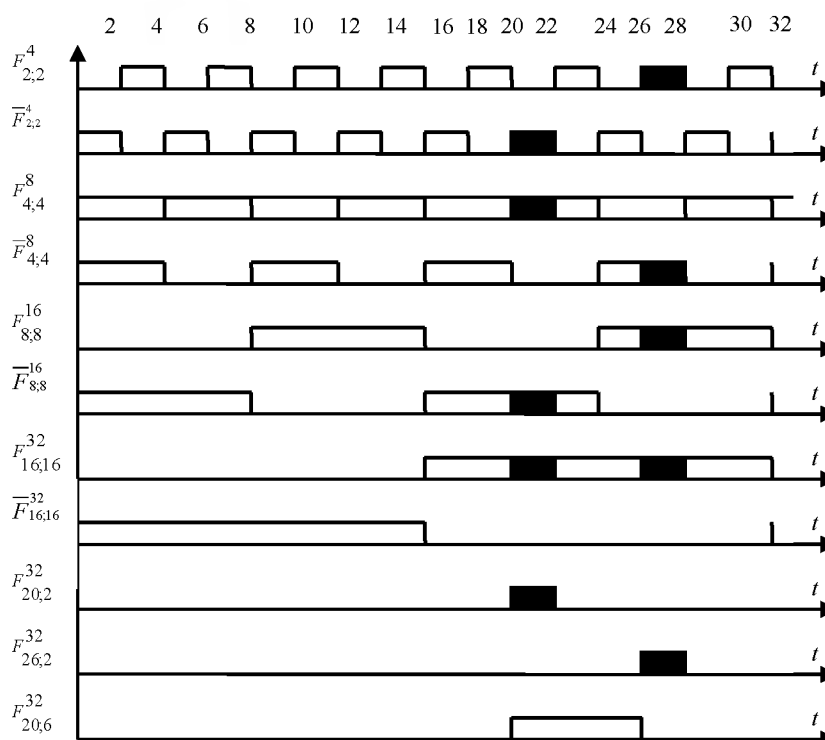


Рис. 4. Диаграмма формирования промежуточных функций  $F_{20,2}^{32}$ ,  $F_{26,2}^{32}$  и теста  $F_{20,6}^{32}$

Fig. 4. Diagram of formation of the intermediate functions  $F_{20,2}^{32}$ ,  $F_{26,2}^{32}$  and test  $F_{20,6}^{32}$

Таким образом, суть аналитического метода синтеза заданного контрольно-диагностического теста  $F = F_{\varepsilon;\tau}^T$  и его аппаратной реализации заключается в том, что если  $l$ -разрядной линейкой триггеров формируется два набора прямых  $F(t)$  (3) и инверсных  $\bar{F}(t)$  (4) функций с одним и тем же начальным моментом времени, то каждому произвольному моменту времени  $t$  соответствует некоторое сечение определенных функций, взятых из этих двух наборов. Это сечение периодических функций описывается вполне определенной цифровой последовательностью в двоичном коде.

В связи с этим имеется возможность формирования заданного контрольно-диагностического теста  $F_{\varepsilon;\tau}^T$  путем коммутации отдельных выходов первого автомата (линейки триггеров) со входами двух многовходных логических элементов, выполняющих операцию конъюнкции, второго автомата, выходные сигналы которых подаются на отдельные входы триггеров. Правило коммутации основывается на выполнении логической операции (7) доказанного выше утверждения. Практическая реализация метода состоит в том, что десятичные числа  $\varepsilon$  и  $\varepsilon+\tau$ , характеризующие параметры теста, в соответствие с выражениями (8) и (9) представляются в виде сумм различных степеней числа два с коэффициентами, равными нулю или единице. Причем суммы числа два с различными степенями соответствуют определенным комбинациям функций из набора  $F_n(t)$  (6), которые необходимо подавать на входы многовходных элементов совпадения, а коэффициенты  $\alpha_i$  указывают, какими должны быть функции (прямыми или инверсными).

### Заклучение

Применение предложенного метода дает следующие преимущества:

- возможность аналитического формирования заданных контрольно-диагностических тестов и синтеза структуры одного из основных узлов системы контроля – формирователя тестов;



- возможность автоматизированного построения тестов, автоматической перестройки структуры формирователя и автоматизированного выпуска технической документации, способствующего уменьшению сроков ее разработки и экономических затрат;

- приводит к снижению объема и стоимости аппаратных затрат за счет аппаратной реализации тестов с применением типового узла (ячейки) формирования тестов;

- создает условия программного формирования тестов на базе микроконтроллеров.

Итак, предложенный аналитический метод синтеза формирователя контрольно-диагностических тестов, заданной конфигурации, позволяет проектировать формирователи тестов, представляющие собой основной узел подсистемы контроля работоспособности микропроцессорных устройств систем автоматизации, допускающие перестройку структуры (адаптации к контролируемой аппаратуре) путем коммутации поля триггерных ячеек и логических устройств в соответствие с алгоритмом, автоматически синтезируемым микроконтроллером, входящими в структуру подсистемы контроля, по программе, реализующей разработанную инженерную методику проектирования.

*Работа выполнена при поддержке гранта: Госзадание №2.1396.2017/4.6.*

*The work is executed at support of the grant: the Public contract project 2.1396.2017/4.6*

### Список литературы

#### References

1. Бессонов А.А., Стешкович Н.Т., Турчина Е.Д., 1986. Автоматизация построения контролируемых тестов. Я., Энергия, 224.  
Bessonov A.A., Steshkovich N.T., Turchina E.D., 1986. Avtomatizaciya postroeniya kontroliruyushchih testov. YA., ENnergiya, 224. (in Russia).
2. Breuer M.A., 1971. A random and an algorithmic technique for fault detection for sequential circuits. IEEE Trans. on Comp., Nov C-20(11): 1364-1370.
3. Бритов Г.С., Мироновский Я.А., 2000. Применение сингулярных чисел матрицы измерений для технической диагностики. Вестник Северо-Западного отделения Метрологической академии России. Вып.1, Санкт-Петербург, Изд-во ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, 35-44.  
Britov G.S., Mironovskij YA.A., 2000. Primenenie singulyarnykh chisel matricy izmerenij dlya tekhnicheskoy diagnostiki. Vestnik Severo-Zapadnogo otdeleniya Metrologicheskoy akademii Rossii. Vyp.1, Sankt-Peterburg, Izd-vo VNIIM im. D.I.Mendeleeva, 35-44. (in Russia).
4. Бухонов Д.Г., Поляков В.М., Смакаев А.В., 2017. Определение состояния компьютерной сети на основе использования нейронных сетей ART. 7: 157-161.  
Buhonov D.G., Polyakov V.M., Smakaev A.V. 2017. Opredelenie sostoyaniya komp'yuternoj seti na osnove ispol'zovaniya nejronnyh setej ART. 7: 157-161.
5. Горовой А.А., Вашевский В.Ф., Доценко Б.И., Рубанов В.Г., Черняк С.П., 1990. Микропроцессорные агрегатные комплексы для диагностирования технических систем. К., Техника, 168.  
Gorovoj A.A. Vashchevskij V.F., Docenko B.I., Rubanov V.G., CHernyak S.P., 1990. Mikroprocessornye agregatnye komplekсы dlya diagnostirovaniya tekhnicheskikh system. K., Tekhnika, 168. (in Russia).
6. Додонов А.Г., Кузнецов М.Г., Горбачик Е.С., 1990. Введение в теорию живучести вычислительных систем. К., Научная думка, 180.  
Dodonov A.G., Kuznecov M.G., Gorbachik E.S., 1990. Vvedenie v teoriyu zhivuchesti vychislitel'nyh system. K., Naukovaya dumka, 180. (in Russia).
7. Жирабок А.Н., Шумский А.Е., Павлов С.В., 2017. Диагностирование линейных динамических систем непараметрическим методом. А и Т, 7: 3-21.  
ZHirabok A.N. SHumskij A.E., Pavlov S.V., 2017. Diagnostirovanie linejnyh dinamicheskikh sistem neparametricheskim metodom. A i T, 7: 3-21. (in Russia).
8. Kim Y.C., Agrawal V.D., Saluja K.K. 2001. Combinatorial test generation for acyclic sequential circuits using a balanced ATPG model. in Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. VLSI Design, Jan., 143-148.



9. Kim Y.C., Agrawal V.D., Saluja K.K., 2005. Combinatoinal Automatic test Pattern Generation for Acyclic Sequential Circuits. Iee transactions on computer aided deaign of integrated circuits and systems, June 6(24).

10. Sauer M., Kupferschmid S., Czutro A., Polian I., Reddy S., Becker B. Functional Test of Small-Delay Faults using SAT and Craig Interpolation. in Proc. Int'l

11. Рубанов В.Г., 2011. Системный подход к проектированию управляемых мобильных логических средств, обладающих свойством живучести. Научные ведомости БелГУ. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. 1(96): 176-187.

Rubanov V.G. Sistemnyj podhod k proektirovaniyu upravlyaemyh mobil'nyh logicheskikh sredstv, obladayushchih svojstvom zhivuchesti. Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya: Istoriya. Politologiya. ENkonomika. Informatika. 2011, 1(96): 176-187. (in Russia).

12. Рубанов В.Г., Колтунов Л.И., 1990. Подход к проектированию систем контроля работоспособности динамических объектов на базе цифровых фильтров. Системотехника в промышленности строительных материалов. 73-77.

Rubanov V.G., Koltunov L.I., 1990. Podhod k proektirovaniyu sistem kontrolya rabotosposobnosti dinamicheskikh ob'ektov na baze cifrovyyh fil'trov. Sistemotekhnika v promyshlennosti stroitel'nyh materialov. 73-77. (in Russia).

13. Романкевич А.М., Романкевич В.А., 2017. О диагностировании много процессорных систем при отказе более половины процессов. А и Т, 9: 84-90.

Romankevich A.M., Romankevich V.A., 2017. O diagnostirovanii mnogo processornyh sistem pri otkaze bolee poloviny processov. А і Т, 9: 84-90. (in Russia).

14. Чжен Г., Меннинг Е., Метц Г. 1972. Диагностика отказов цифровых вычислительных систем. М., Мир., 232.

CHzhen G., Menning E., Metc G., 1972. Diagnostika otkazov cifrovyyh vychislitel'nyh sistem. М., Mir, 232. (in Russia).

15. Шумский А.Е., 2009. Функциональное диагностирование нелинейных динамических систем с запаздыванием. А и Т, 2: 172-174.

SHumskij A. E, Funkcional'noe diagnostirovanie nelinejnyh dinamicheskikh sistem s zapazdyvaniem. А і Т, 2009, №2, s. 172-174. (in Russia).

16. Wang L.T., Wu C.W., Wen X., 2006. VLSI Test Principles and Architectures: Desing for Testabiliti. san Francisco, CA: Morgan Kaufmann.

17. Yogi N., 2009. Spectral Methods for Testing of digital Circuits. PhD thesis, Auburn University, ECE Department, Aug.

18. Yu X. Amyeem M.E., Venkataraman S., Guo R., Pomeranz I., 2003. Concurrent Execution of Diagnostic fault Simulation and Equivalence Identificantion daring test Generation. in Proc. 21st IEEE VLSI Test Symp. 351-356.

19. Yu X., Wu J., Rudnic E.M., 2000. Diagnostic Test Generation for sequential circuits. in Proc. International Test Conf. 226-234.

20. Zhang Y., Argwal V.D., 2010. An Algorithm for diagnoctic fault simuation. in Proc. 11th IEEE Latin-American WorKshop.