

УДК 621.382.8

## ПРИМЕНЕНИЕ КОЛЬЦЕВОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ СХЕМ

*Г.В. Таярская, Ю.К. Ситников, М.Н. Сафонов*

### Аннотация

Рассматривается целесообразность применения кольцевого тестирования с различными периодами для комбинационных схем на основе оценки достоверности. Особое внимание уделено исследованию зависимости достоверности от периода. Получены формулы для оценки достоверности укороченного и произвольного периодов. Полученные теоретические результаты для некоторых комбинационных схем проверены с использованием системы автоматизированного проектирования MAX+plusII.

В связи с созданием сложных интегральных цифровых схем в последнее время большое внимание уделяется разработке новых методов тестирования. Одним из таких методов является компактное тестирование, при котором генерирование тестов и анализ ответов осуществляются компактными алгоритмами.

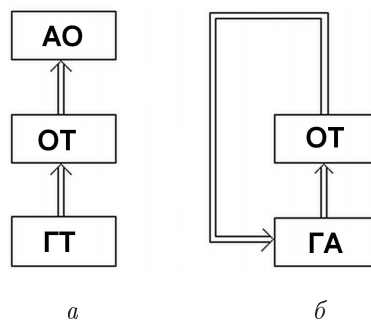


Рис. 1. Системы компактного тестирования

Наиболее изученным классом компактных систем тестирования являются разомкнутые системы (рис. 1, *a*), в которых генератор тестов (ГТ), объект тестирования (ОТ), анализатор ответов (АО) соединены последовательно. При тестировании сложных схем из-за большой аппаратурной сложности и малой достоверности проведённых тестов становится нецелесообразным применение разомкнутых систем. Отсюда возникает необходимость исследования новых методов. Снижение аппаратурной сложности достигается в классе замкнутых систем (рис. 1, *б*), где ОТ и ГА образуют замкнутый контур. Это так называемая система кольцевого тестирования (КТ). Метод КТ позволяет упростить алгоритм тестирования и совместить функции ГТ и АО.

Основными задачами при построении системы КТ являются синтез корректирующего устройства и оценка достоверности.

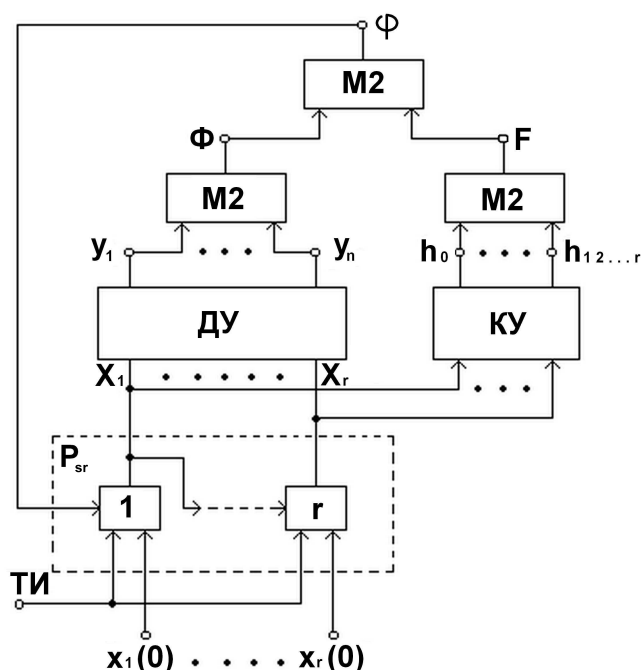


Рис. 2. Общая схема кольцевого тестирования

При оценке достоверности КТ различают достоверность максимального периода и достоверность укороченного периода. Первая достоверность достаточно хорошо исследована. При использовании КТ с укороченным периодом, позволяющим во многих случаях снизить аппаратные затраты и время тестирования, оценка достоверности затруднена. Поэтому возникла необходимость исследования целесообразности применения КТ для различных комбинационных схем на основе оценки достоверности КТ с произвольными периодами.

Общая схема КТ представлена на рис. 2. Здесь диагностируемое устройство (ДУ) имеет  $r$  входов и  $m$  выходов. Система КТ содержит диагностируемое устройство (ДУ), корректирующее устройство (КУ),  $r$ -разрядный сдвиговый регистр  $P_{sr}$ , схемы свертки выходов по mod 2 (M2). КУ аппаратно линейризует ДУ, в результате чего на выходе M2 формируется линейная функция обратной связи  $\varphi$ . Посредством обратной связи, реализуемой соединением выхода M2 с входом регистра  $P_{sr}$ , последний совмещает функции ГТ и АО. Факт исправности ДУ устанавливают по возникновению эффекта «покоя» регистра  $P_{sr}$ .

При проверке исправности в системе КТ из-за отсутствия потактного сравнения фактических ответов ДУ с эталонными существует риск принять неисправное ДУ за исправное. Для оценки степени этого риска применяют такой показатель, как достоверность тестирования  $Q$

$$Q(r) = 1 - P(r), \quad (1)$$

где  $P(r)$  – вероятность необнаружения неисправностей.

Теоретические выводы и формулы для определения достоверности для максимального периода приведены в [1, 2].

Недостатком определения достоверности КТ, приведённого в литературе, является невозможность определения достоверности при произвольном периоде  $T$ ,

меньшем, чем максимальный  $T_m = 2^r - 1$  для данного  $r$ . Как показала практика, снижение периода  $T$  значительно снижает время на проведение КТ, (время уменьшается в  $T_r/T$  раз), но при этом возникает вопрос о том, как изменяется достоверность КТ. Нами были получены формулы оценки достоверности для произвольного периода, где достоверность КТ  $Q(r)$  является функцией периода  $T$  [3]:  $Q = Q(r, T)$ .

Для начала определим верхнюю границу достоверности для произвольного периода, а саму достоверность определим как функцию

$$Q = Q(T).$$

Чтобы определить значение верхней границы, воспользуемся правой частью неравенства [2]

$$Q(r) < 1 - \frac{1}{2^r}. \quad (2)$$

Значение правой части этого неравенства является частным случаем для максимального периода  $T_r = 2^r - 1$ . Более того, эта формула не показывает зависимости достоверности  $Q$  от периода  $T$ . Если установить зависимость достоверности  $Q$  от максимального периода  $T_r = 2^r - 1$ , тогда это будет справедливо для произвольного периода. Найдем эту зависимость

$$Q(r) < 1 - \frac{1}{2^r} = 1 - \frac{1}{2^r - 1 + 1} = 1 - \frac{1}{T_r + 1} = \frac{T_r}{T_r + 1} \equiv \frac{T}{T + 1} > Q(T_r).$$

Тогда достоверность для произвольного периода определится как

$$Q < \frac{T}{T + 1}. \quad (3)$$

Если период  $T$  является простым числом, то можно преобразовать формулу для определения достоверности кольцевого тестирования [2] к виду

$$\begin{aligned} Q(r, T) &= 1 - \frac{2^{r^2-r} + \frac{(T-1) \prod_{i=0}^{r-1} (2^r - 2^i)}{r \cdot 2^r}}{2^{r^2}} = 1 - \frac{2^{r^2}}{T+1} + \frac{(T-1) \prod_{i=0}^{r-1} (2^r - 2^i)}{r \cdot (T+1)} = \\ &= 1 - \frac{1}{T+1} - \frac{(T-1)}{r \cdot 2^{r^2} \cdot (T+1)} \prod_{i=0}^{r-1} (2^r - 2^i). \quad (4) \end{aligned}$$

При больших значениях периода  $T$  имеем  $\frac{T-1}{T+1} \approx 1$ , тогда формула для определения достоверности произвольного (необязательно максимального  $T_r = 2^r - 1$ ) простого периода примет вид

$$Q(r, T) = 1 - \frac{1}{T+1} - \frac{1}{r \cdot 2^{r^2}} \prod_{i=0}^{r-1} (2^r - 2^i). \quad (5)$$

Верхние и нижние оценки достоверности КТ, полученные для максимального периода  $T_r = 2^r - 1$  [2], были обобщены для произвольного периода.

Нижняя и верхняя оценки определяются как:

$$\begin{aligned} Q(r, T) &> 1 - \frac{1}{2^r} - \frac{1}{r} = 1 - \frac{1}{2^r - 1 + 1} - \frac{1}{r} = \\ &= 1 - \frac{1}{T_r + 1} - \frac{1}{r} = \frac{T_r}{T_r + 1} - \frac{1}{r} = \frac{T}{T + 1} - \frac{1}{r}, \quad (6) \end{aligned}$$

Табл. 1

$r$	$T$	Формула 4	Формула 5	Формула 8
4	15	0.9375	0.870	0.6875 0.9219
	5	0.8333	0.780	0.5833 0.7917
5	31	0.9688	0.913	0.7688 0.9609
6	63	0.9844	0.937	0.8177 0.9805
	9	0.9000	0.861	0.7889 0.8750
7	127	0.9922	0.951	0.8493 0.9980
8	255	0.9961	0.960	0.8711 0.9951
	85	0.9884	0.953	0.8634 0.9855
9	511	0.9980	0.966	0.8869 0.9976
	73	0.9865	0.955	0.8754 0.9831

$$Q(r, T) < 1 - \frac{5}{42^r} = 1 - \frac{5}{4(2^r - 1 + 1)} = 1 - \frac{5}{4(T_r + 1)} \equiv 1 - \frac{5}{4(T + 1)}. \quad (7)$$

Итак, для произвольного, не обязательно максимального, периода получаем оценку достоверности КТ

$$\frac{T}{T + 1} - \frac{1}{r} < Q(r, T) < 1 - \frac{5}{4(T + 1)}. \quad (8)$$

С понижением периода  $T$  достоверность кольцевого тестирования уменьшается. Было доказано, что формулы из [1, 2] являются частным случаем полученных формул (2)–(4), когда значение периода соответствует максимальному  $T_m = 2^r - 1$ . Для некоторых значений  $r$  и  $T$  результаты, получаемые по формулам (4), (5), (8), приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что формулы (4), (5), (8) дают примерно одни и те же результаты. Для сравнения достоверностей максимального и укороченного периодов при фиксированном значении  $r$  с помощью формулы (8) можно воспользоваться зависимостью  $Q = Q(r, T)$ , представленной на рис. 3.

Из анализа этой зависимости можно сделать следующие выводы:

1. Если число входов ДУ  $r$  есть простое число, то укороченного периода вообще не существует, исключение составляет лишь  $r = 11$ ;

2. При уменьшении числа входов  $r$  ДУ (а следовательно, и периода  $T$ ) снижается и достоверность тестирования  $Q(r, T)$  таким образом, что использование метода КТ для микросхем с числом входов  $r < 4$  становится нецелесообразным.

3. При использовании укороченного периода достоверность тестирования уступает достоверности при максимальном периоде при фиксированном значении  $r$ , но при стремлении  $r \rightarrow \infty$  достоверность тестирования при укороченном периоде стремится к достоверности тестирования при максимальном периоде. Из графика видно, что применение укороченного периода для микросхем с числом входов  $r < 8$  нецелесообразно.

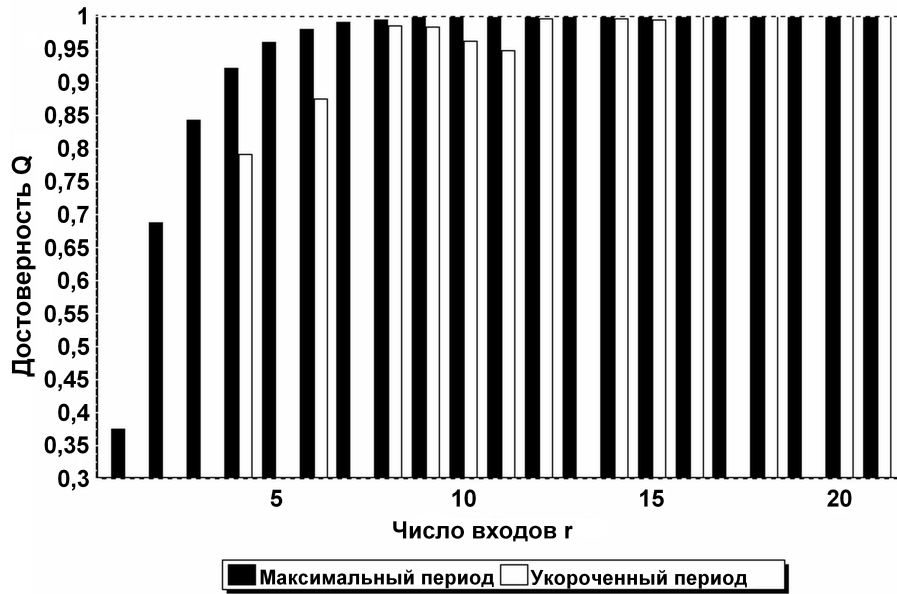


Рис. 3. Общая схема кольцевого тестирования

Для подтверждения теоретических результатов была проведена реализация КТ для некоторых комбинационных схем [4] с использованием системы автоматизированного проектирования MAX+plusII фирмы Altera. На кристалле ПЛИС была построена схема КТ для максимального и укороченного периодов для различных схем [3]. При проведении экспериментальных исследований были получены временные диаграммы КТ и на их основе определена достоверность, которая попала в границы наших теоретических оценок. Диаграммы приведены на рис. 4 и 5. На рис. 6 приведена типичная диаграмма КТ для неисправной микросхемы (нет эффекта генерации), которая доказывает высокую эффективность работы КТ.

Из временных диаграмм на рис. 4 и 5 видно, что при использовании КТ с укороченным периодом резко сокращается время на проведение теста. Реальное значение достоверности лежит между значениями, рассчитанными по формулам (4), (5), (8). Итогом работы стала разработка теории КТ для произвольного периода и общие рекомендации по применению КТ на основе анализа полученных практических результатов.

Основным параметром, оценивающим целесообразность применения КТ, должно стать отношение «достоверность КТ / сложность КУ». Исходя из этого отношения, можно получить некоторые рекомендации по применению метода КТ:

1. При числе входов диагностируемого устройства, меньшем четырех ( $r < 4$ ), применение КТ нецелесообразно вообще, так как получаем невысокую достоверность тестирования.

2. При числе входов  $r < 8$  не рекомендуется применять укороченный период, так как при этом резко снижается достоверность КТ по сравнению с максимальным для данного  $r$  периодом  $T_{\max} = 2^r - 1$ .

3. При  $r \geq 8$  желательно использовать укороченный период, потому что, во-первых, резко снижается время на проведение теста, (время уменьшается в  $T_{\max}/T = (2^r - 1)/T$  раз, где  $T$  – укороченный период); во-вторых, при боль-

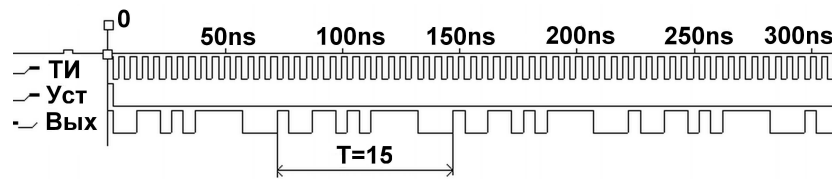


Рис. 4. Временные диаграммы КТ микросхемы К155ИД3 для максимального периода

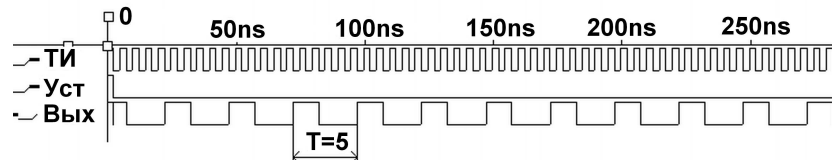


Рис. 5. Временные диаграммы КТ микросхемы К155ИД3 для укороченного периода

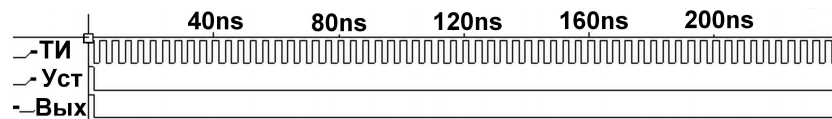


Рис. 6. Типичные временные диаграммы КТ неисправной микросхемы

ших  $r$  применение укороченного периода практически не ухудшает достоверность КТ.

4. Наиболее целесообразно применение метода КТ для линейных комбинационных схем, таких, как дешифраторы, шифраторы и преобразователи кодов, так как при этом получаем предельно простое КУ, то есть его низкую аппаратную сложность, что немаловажно при проектировании самой схемы КТ.

5. КТ также рекомендуется применять для мультиплексоров и демультиплексоров. Причём, именно для этих схем желательно использование при проектировании КУ укороченного периода – это приводит к резкому снижению времени на проведение теста.

6. КТ можно использовать для некоторых многовходовых компараторов.

### Summary

*G.V. Tayurskaya, Yu.K. Sitnikov, M.N. Safonov.* Application of ring testing for digital integral schemes.

The advisability of application of ring testing with different periods for combination schemes is considered by means of confidence estimation. Particularly the dependence of confidence on period is investigated in details. The corresponding formulas for confidence estimation are derived for the shortened and arbitrary periods. The obtained theoretical results for some combination schemes are checked by means of the computer – aided design tool MAX+plusII.

**Литература**

1. *Латыпов Р.Х.* О достоверности кольцевого тестирования линейных последовательностных машин // Автоматика и вычислительная техника. – 1984. – № 4. – С. 89–91.
2. *Литиков И.П.* Кольцевое тестирование цифровых устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 169 с.
3. *Таюрская Г.В., Ситников Ю.К., Сёмин А.В.* Оценка достоверности кольцевого тестирования для комбинационных схем // Материалы IV междунар. научно-практ. конф. «Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики». – Новочеркасск, 2003. – Ч. 2. – С. 37–41.
4. *Зельдин Е.А.* Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной аппаратуре. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1986. – 280 с.

Поступила в редакцию  
24.02.06

---

**Таюрская Галина Васильевна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: *gal\_tayurskaya@mail.ru*

**Ситников Юрий Кириллович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: *Jury.Sitnikov@ksu.ru*

**Сафонов Максим Николаевич** – инженер кафедры радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: *alex\_rus@mail.ru*