

УДК 621.37/39.019.3

Б.А. Шостак<sup>1</sup>, В.Б. Шостак<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный технический университет «ХПИ», Харьков*<sup>2</sup> *Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ МОДУЛЕЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

*В статье приведены результаты исследований по диагностике аналоговых модулей радиоэлектронных систем посредством применения метода принудительной диагностики.*

**Ключевые слова:** процесс диагностирования, аналоговый модуль, априорная неопределенность.

### Введение

При диагностике сложных аналоговых электронных модулей РЭС в условиях частичной неопределенности возникают значительные трудности. Эти трудности также обусловлены тем, что при моделировании сложных объектов действует фундаментальное положение кибернетики: при сложности объекта выше некоторого уровня его адекватная (полная модель) не может быть более простой. Поэтому фактически ни одна электронная система, содержащая модули, выполняющие преобразование аналоговых сигналов, не имеет исчерпывающего математического описания. Такие устройства, как приемники и передатчики телевизионных и аудиосигналов, блоки питания, стабилизаторы, генераторы и т.п. могут быть аналого-цифровыми, но основная функциональная часть схемы реализована в аналоговой области. Поэтому задача диагностирования аналоговых устройств по-прежнему актуальна.

Для эффективного решения задачи обнаружения возникших в процессе эксплуатации дефектов необходимо уже при проектировании обеспечить диагностируемость РЭС. Наибольшее применение при решении задачи диагностики нашли следующие методы и технологии:

– DFT (Design for Test), или технология проектирования контролепригодных схем – технология, которая упрощает разработку и проведение производственных испытаний, а также обеспечивает диагностируемость электронного оборудования. Большинство вариантов DFT, применяемых сегодня, основаны на принципе структурного испытания. Структурное испытание не создает прямого воздействия для определения, все ли выходные функции схемы соответствуют норме. Вместо этого осуществляется проверка, что схема правильно собрана из некоторых низкоуровневых составных частей в соответствии со структурной таблицей соединений. При этом должно соблюдаться следующее условие: если таблица соединений корректна, и структурная проверка подтверждает правильность сборки элементов схемы, тогда схема долж-

на работать корректно [1]. Эта технология применяется для диагностики РЭС при производстве.

– JTAG (Joint Test Automation Group), или Boundary Scan – периферийное сканирование, используемое для внутрисхемной проверки работоспособности плат. Эта технология предполагает отсутствие зондов, но при ее использовании преимущества традиционной внутрисхемной проверки сохраняются, то есть диагностируется работоспособность элементов схемы. Периферийное сканирование предполагает преобразование внешних зондов посредством многозондового адаптера во внутренние, так называемые электронные зонды. Они предусмотрены на краю кристалла, откуда эта технология и получила свое название [2]. Одним из основных недостатков является включение в схему избыточной логики, а также связей, не являющихся необходимыми для функционирования. Также надо отметить, что эта технология в основном применяется для проверки цифровых схем. Возможность проверки схем смешанного или аналогового сигналов сейчас только обсуждается [3].

– ATPG (Automated Template Generation), или технология автоматической генерации образцов, используемая для электрической проверки полупроводников, где тестовый набор автоматически генерируется программой. Вектор последовательно применяется к проверяемым устройствам, и отклик устройства на каждый входной сигнал сравнивается с образцовым откликом от исправного устройства. Ошибка в отклике устройства означает, что оно неисправно. Эффективность ATPG оценивается полнотой проверки, то есть все ли неисправности удалось обнаружить с помощью набора тестов, а также ценой выполнения проверки. Основная сфера применения этой технологии – проверка работоспособности полупроводниковых устройств в цифровой схеме [4].

– BIST или встроенное самотестирование – технология проектирования дополнительного оборудования и программного обеспечения, содержащихся в интегральных схемах и позволяющих проводить проверку их работы с использованием их собственных схем. BIST уменьшает зависимость от

внешнего автоматического тестового оборудования (ATE), однако ей свойственны недостатки (те же, что и у JTAG-технологии).

Перечисленные технологии реализованы в программных средствах создания контролепригодных РЭС и проверки их работоспособности на этапе проектирования и производства, например, таких как:

– onTAP Boundary Scan Software (Flynn Systems). Применяется для разработки и проведения диагностики печатных плат с помощью JTAG-технологии.

– ProntoTEST; FIXTURE software (UniSoft). Применяется для диагностики печатных плат с помощью ATE.

– Galaxy Design Platform (Synopsys). Пакет программ для проектирования, отладки и диагностирования цифровых интегральных микросхем.

– Design for Test (Mentor Graphics). Пакет программ для разработки, усовершенствования тестов и диагностирования печатных плат с использованием технологий ATPG, BIST и JTAG.

Перечисленные выше методы и программные продукты ориентированы на применение для диагностики цифровых электронных средств, печатных плат и интегральных микросхем. Для диагностирования аналоговых схем, как правило, используются следующие методы: метод справочников, параметрическая идентификация, методы контроля неисправностей, приближенные методы и т.д. Многие из этих методов обладают следующими недостатками: большой объем вычислений, необходимость доступа ко всем узлам схемы, чувствительность к погрешностям вычислений и, как следствие, трудность практической реализации.

### Теоретические исследования

Для выхода из создавшейся ситуации при формировании диагностических моделей аналоговых систем, как правило, используют три уровня описания: алгоритмический; функциональный; узловый.

В этом случае полное математическое описание строится по линейному принципу:

$$L = L_{yu} + L_{fy} + L_{ay}, \quad (1)$$

где  $L_{yu}$  - язык узлового уровня;

$L_{fy}$  - язык функционального уровня;

$L_{ay}$  - язык алгоритмического уровня.

Многоуровневая модель выглядит следующим образом:

$$L = L_{ay} (L_{fy} (L_{yu})). \quad (2)$$

Такая последовательность создания многоуровневых диагностических моделей, как показала практика, является оптимальной с точки зрения снижения трудоемкости и уменьшения временных характеристик процесса диагностирования аналоговых устройств. Это связано с тем, что на каждом этапе создания тестовых наборов тестовые алгорит-

мы осуществляют поиск неисправности с заданным уровнем детализации.

Таким образом, происходит ступенчатое углубление детализации. На рис. 1 изображен процесс поиска кратных неисправностей одного структурного модуля.

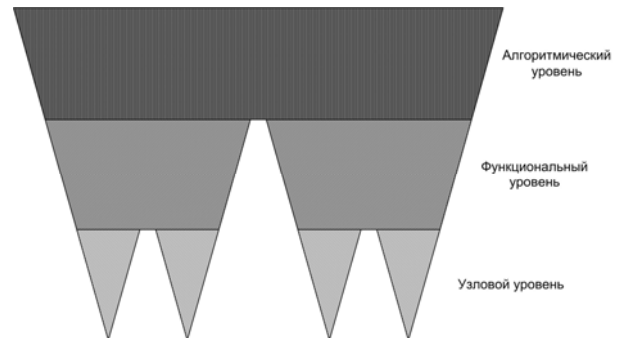


Рис. 1. Процесс поиска одиночных и кратных отказов в аналоговых модулях РЭС

В соответствии с данным подходом по мере реализации процесса диагностирования происходит постепенное снятие неопределенности. При этом чем больше информации получено, тем меньше степень неопределенности состояния объекта диагностирования.

Развитие теории информационных систем со временем выявило ряд несоответствий между классическим определением и получаемым результатом, которые в некоторых случаях оказываются значительно лучше, чем предсказывает существующая теория. Так, шенноновский подход совершенно не учитывает степени полезности и осмысленности информации, наличия априорных знаний о предмете и т.д., он направлен не на увеличение знания, а на уменьшение незнания, то есть в каком-то смысле является пассивным.

В статье предлагается решение задачи минимизации времени диагностики аналоговых модулей посредством применения метода принудительной диагностики. Суть метода принудительной диагностики заключается в подаче внешних тестовых воздействий на определенный исследуемый элемент объекта диагностики посредством специального зонда и анализе полученного с выходов элемента откликов.

При таком подходе работоспособность РЭС определяют, сравнивая ее динамические характеристики с аналитической моделью диагностируемого узла. Технические средства определения работоспособности при этом строятся по разным принципам в зависимости от формулировки условий работоспособности. Если условия работоспособности формулируются как ограничение на изменение показателей формы временной характеристики, то, как правило, осуществляют тестовое диагностирование, используя в качестве тестового воздействия единичное импульсное или ступенчатое напряжение.

Известно, что динамические свойства любой радиотехнической системы можно описать ее откликом

$h(t)$ , т.е. функцией веса. Если функцию  $h(t)$  разложить в ряд Фурье и установить аналитическую зависимость между коэффициентами ряда для отклика  $h(t)$  и параметрами диагностируемой аппаратуры, то на этой основе можно проводить диагностирование.

Известно, что передаточная функция системы есть преобразование по Лапласу ее отклика. Производя с передаточной функцией аналогичные преобразования, можно определить коэффициенты  $a_n$  и  $b_n$  ряда Фурье. Весовая функция  $h(t)$  в общем случае зависит от всех параметров диагностируемого объекта

$$h(t) = f(x_1, x_2, \dots, x_\xi).$$

Пусть  $h(t) = 0$  при  $t \geq t_0$ . Продолжим ее четным образом. Тогда четную периодическую функцию  $h(t)$  можно разложить в ряд Фурье по косинусам:

$$h(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi}{t_0} t, \quad (3)$$

где 
$$a_n = \frac{2}{t_0} \int_0^{t_0} h(t) \cos \frac{n\pi}{t_0} t dt.$$

Между откликом диагностируемого объекта и действительной частью передаточной функции  $Re(\omega)$  существует следующая зависимость:

$$Re(\omega) = \int_0^{\infty} h(t) \cos \omega t dt.$$

Учитывая (3), можно записать

$$Re(\omega, \{x\}) = \int_0^{\infty} h(t) \cos \omega t dt. \quad (4)$$

Сравнивая (3) и (4), видим, что для фиксированных частот они отличаются только множителем  $2/t_0$ .

Отсюда получаем формулы, выражающие коэффициенты Фурье через фиксированные значения вещественной частотной передаточной функции диагностируемой системы:

$$a_n = \frac{2}{t_0} Re[\omega_n, \{x\}],$$

где  $\omega_1 = \pi/t_0$ ;  $\omega_2 = 2\pi/t_0$ .

Тогда будем иметь

$$h(t) = \frac{2}{t_0} \sum Re\left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\}\right) \cos \frac{n\pi}{t_0} t. \quad (5)$$

Известно, что для всякой ограниченной кусочно-непрерывной функции, каковыми являются временные характеристики диагностируемой аппаратуры, ряд Фурье сходится в среднем к функции  $h(t)$

$$\int [h(t) - S_n(t)]^2 dt = 0 \text{ при } n \rightarrow \infty,$$

где  $S_n(t)$  – сумма членов ряда.

Из сходимости следует, что можно определить отклик системы, пользуясь дискретными значениями действительной части частотной передаточной функции  $H(\omega)$ . С увеличением числа членов ряда точность

аппроксимации  $h(t)$  рядом (5) увеличивается, но при этом увеличивается и объем вычислений, так как растет число гармоник, которые нужно учитывать.

Для получения переходной характеристики достаточно проинтегрировать ряд (5) от 0 до  $t_0$ . Тогда

$$H(t) = \frac{2}{t_0} \sum_{n=0}^{\infty} Re\left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{t_0} t\right). \quad (6)$$

Или, учитывая равенство (4),

$$H(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \sin\left(\frac{n\pi}{t_0} t\right).$$

На основании выражения (6) составляют систему уравнений, которая используется для нахождения уходов соответствующих параметров диагностируемого объекта:

$$H(t_1) = \frac{2}{t_0} \sum Re\left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{t_0} t_1\right);$$

$$H(t_2) = \frac{2}{t_0} \sum Re\left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{t_0} t_2\right);$$

.....

$$H(t_\xi) = \frac{2}{t_0} \sum Re\left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{t_0} t_\xi\right),$$

где  $H(t_1), \dots, H(t_k)$  – значения переходной характеристики для системы с номинальными параметрами, измеренными через интервалы  $\Delta t = \pi/\omega_0$ ;  $\omega_0 = 2\pi/t_0$ .

Так как коэффициенты Фурье являются функциями всех параметров диагностируемой аппаратуры, можно определить текущие значения контролируемых параметров  $\{x\}$  решением системы алгебраических уравнений:

$$a_0 = \frac{2}{t_0} Re(0, \{x\});$$

$$a_1 = \frac{2}{t_0} Re\left(\frac{\pi}{t_0}, \{x\}\right);$$

...

$$a_n = \frac{2}{t_0} Re\left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\}\right),$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_n$  – текущие значения коэффициентов Фурье, снимаемых с анализатора, на вход которого подано напряжение, соответствующее отклику диагностируемого объекта;  $Re(n\pi/t_0, \{x\})$  – вещественная часть частотной передаточной функции.

Основной проблемой до последнего времени был значительный объем вычислений, выполняемый при анализе откликов. Но с появлением цифровых сигнальных процессоров основная нагрузка как раз ложится на такие устройства. При этом такой процессор позволяет достаточно просто реализовать процесс формирования различных тестовых сигналов.

Таким образом, система принудительной диагностики функционирует в три этапа:

1 – формирование тестового воздействия;

2 – считывание и анализ отклика диагностируемого узла;

3 – сравнение результатов расчета с аналитической моделью, хранящейся в базе данных.

Структура аппаратного обеспечения представлена на рис. 2.

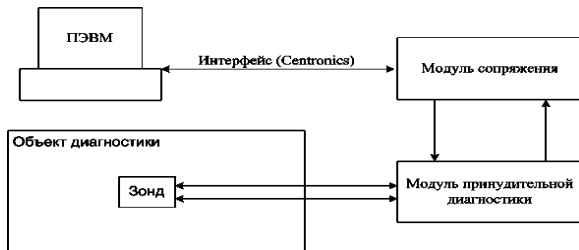


Рис. 2. Схема подключения аппаратных узлов

Основным элементом модуля принудительной диагностики является цифровой сигнальный процессор ADSP2181. Связь процессора с управляющей ЭВМ выполняется посредством модуля сопряжения, обеспечивающего согласование уровней сигнала и гальваническую развязку системы.

Разработанная на основе описанного метода система принудительной диагностики (СПД) позволяет производить диагностику аналоговых микросхем, не выпаивая их из платы.

Общая методика функционирования СПД заключается в следующей последовательности действий:

1. В исследуемом объекте диагностики (ОД) аппаратно блокируются все внутренние генераторы;
2. На исследуемый элемент (например, аналоговую микросхему) устанавливается зонд;
3. На ОД подается напряжение питания;
4. Активизируется программа динамической инициализации, которая производит формирование управляющих воздействий определенной длительности и формы;
5. Проверяется динамический функционал путем сравнения с прототипом из базы знаний;
6. Если динамические функционалы совпадают, то элемент считается исправным, и переходят к исследованию следующего элемента, если нет – то производится аналогичный контроль сопряженных с выходными цепями элементов.

Таким образом, проверяются функциональная исправность всех элементов, прототипы (функциональные модели) которых содержатся в базе знаний.

## ДІАГНОСТУВАННЯ АНАЛОГОВИХ МОДУЛІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

Б.О. Шостак, В.Б. Шостак

У статті приведені результати досліджень щодо діагностики аналогових модулів радіоелектронних систем за допомогою застосування методу примусової діагностики.

**Ключові слова:** процес діагностування, аналоговий модуль, априорна невизначеність.

## DIAGNOSTICS OF ANALOG MODULES IN RADIO ELECTRONIC SYSTEMS

B.A. Shostak, V.B. Shostak

This study presents the new method of electronic system analog modules diagnostics based on forced diagnostics. The method is intended for optimization of search for failure analog element in arbitrary electronic module.

**Ke words:** process of diagnostics, analog module, a priori vagueness.

Время проверки одного элемента в среднем составляет 3 минуты. Подача внешних импульсов на выходные выводы микросхем не приводит к выходу из строя выходных каскадов в связи с малым временем воздействия и ограничением максимального импульсного тока ( $I_{max} = 50$  мА). Ограничение по току необходимо также и для проверки аналоговых микросхем (например, компараторов), входные цепи которых соединены либо с выходными каскадами с открытым коллектором, либо с цепями питания.

## Выводы

Проведены теоретические исследования применения метода принудительной диагностики для реализации процесса диагностирования аналоговых модулей РЭС в условиях частичной неопределенности. В результате исследований предложены программные и аппаратные средства, обеспечивающие реализацию разработанного метода. Результаты исследования показывают, что применение метода принудительной диагностики позволяет производить диагностику аналоговых элементов, не выпаивая их из платы.

## Список литературы

1. Gray K. *Electronics Testing into the 21st Century: Success in Test Is in Capabilities, Not Specifications* / K. Gray, W. Tustin. // *Test and Measurements World*. №2/2007.
2. IEEE Std 1149.1 (JTAG/Boundary Scan). Tutorial. – GЦPEL electronic GmbH, 2006.
3. Kacand U., Novak F., Azas F. *Extending IEEE Std. 1149.4 Analog Boundary Modules to Enhance Mixed-Signal Test* // *Test and Measurements World*. №12/2006.
4. Kabisatpathy P. *Fault detection and diagnosis in analog integrated circuits using artificial neural network in a pseudorandom testing scheme* / Kabisatpathy P., Barua A., Sinha S. // *3rd Int. Conf. on Electrical & Computer Engineering ICECE 2004, 28-30 Dec. 2004, Dhaka, Bangladesh*. – P. 52-55.
5. Воловикова В.Е. Уйвасов С.У. *Диагностика аналоговых схем с учетом тепловых режимов электрорадиоэлементов*. // *Теория и практика контроля, измерений, испытаний и диагностики*. №3/2009. с.23-28.
6. Гуляев В. А. *Техническая диагностика управляющих систем*. – Киев.: “Наукова думка”, 1983. – 208 с.
7. Бушуева М.Е. *Методы и алгоритмы обеспечения контролепригодности сложных технических систем при кратных дефектах*: Дис. ... канд. тех. наук 05.13.01/ НГТУ. Н.Новгород, 1997. –170 с.

Поступила в редколлегию 20.07.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.М. Порошин, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.