

Способы подачи диагностического сигнала и получения результирующего сигнала определяются схемой подключения измерительной установки к АД, подлежащего контролю. Среди представленных схем наиболее приминительными являются схемы, представленные в табл. 1.

Литература

1. Гольдберг, О. Д. Испытания электрических машин. Учеб для вузов по спец. «Электромеханика» / О. Д. Гольдберг. – М.: Высш. шк., 1990. – 255 с.

2. Гемке, Р. Г. Неисправности электрических машин / Под ред. Р.Б. Уманцева. – 9-е изд., перераб. и доп. / Р. Г. Гемке. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 336 с.

3. Способ контроля витковой изоляции обмотки якоря электрической машины : пат. РБ 16628 / Ю. В. Суходолов, А. А. Шейников, А. Н. Малашин, В. Р. Вашкевич. – Опубл. 2012.08.30.

4. Способ контроля фазных обмоток трехфазной электрической машины : пат РБ 20042 / Ю. В. Суходолов, А. В. Белоусов, Л. П. Крученюк. – Опубл. 2016.04.30.

УДК 004.056.053

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФНФ СТАТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛИС И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИКРОСХЕМ

Кайкы М.Н., Иванюк А.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Данная работа посвящена изучению применимости физически неклоняемых функций на основе ячеек статической памяти в качестве схем идентификации цифровых устройств. В работе представлены результаты сравнения характеристик стабильности и уникальности ячеек статической памяти промышленных микросхем и ячеек, сконфигурируемых на элементной базе программируемых логических интегральных схем.

Ключевые слова: физически неклоняемая функция, статическая память, идентификация, ПЛИС.

COMPARISON OF STATIC MEMORY PUF CHARACTERISTICS USING FPGA AND INDUSTRIAL ICs

Kaiky M., Ivaniuk A.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This work is devoted to the study of the applicability of physically uncloneable functions based on static memory cells as digital device identification schemes. The paper presents the results of comparing the characteristics of stability and uniqueness of static memory cells of industrial integrated circuits and cells configured on the element base of field programming gate arrays.

Key words: physically uncloneable function, static memory, identification, FPGA.

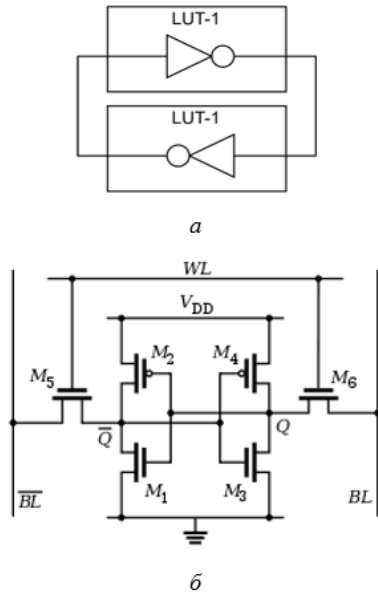
Адрес для переписки: Кайкы М.Н. e-mail kaikymykhailo@gmail.com; Иванюк А.А. e-mail ivaniuk@bsuir.by

Актуальность. Процесс производства современных интегральных схем (ИС) состоит из множества этапов, начиная с функционального проектирования, заканчивая размещением кристалла в корпус и его герметизацией [1]. На данный момент распространенными являются методы защиты цифровых устройств (ЦУ) от несанкционированного копирования, клонирования и использования, позволяющие пресекать акты промышленного шпионажа, изготовления и распространения контрафактной продукции. Одними из эффективных методов защиты ЦУ являются методы идентификации аппаратного обеспечения (Hardware Metering), позволяющие распознать устройство, определить его принадлежность владельцу прав интеллектуальной собственности и даже заблокировать работу устройства при попытке несанкционированного использования [2].

Физически неклоняемые функции. Основную роль при построении систем идентификации играют источники энтропии. В основе источников энтропии и идентификаторов обычно лежат физически неклоняемые функции (ФНФ), являющиеся сущностями, воплощенными в физической структуре, которые легко оценить, но, в силу неконтролируемых человеком процессов, невозможно воспроизвести, смоделировать или охарактеризовать [3, 4]. В научной литературе упоминаются различные типы ФНФ, реализуемые с использованием современных КМОП-технологий: ФНФ на основе задержек, ФНФ типа бабочка, ФНФ на статической памяти и т.д. Однако, вне зависимости от типа ФНФ, все они в результате случайных технологических вариаций при изготовлении ИС будут иметь уникальные электрофизические характеристики, извлечение (регистрация)

которых позволяет представлять их в двоичном виде для дальнейшего использования.

ФНФ на основе статической памяти. В основе исследуемой структуры ФНФ лежит ячейка статической памяти, состоящая из двух инверторов с перекрестной обратной связью и двух транзисторов, работающих в ключевом режиме для доступа к ячейке (рис. 1).



а – ячейка на ПЛИС;
б – ячейка на КМОП-транзисторах

Рисунок 1 – Ячейка статической памяти

После включения ИС, в силу физической асимметрии реализованной схемы (рис. 1), состояние ячеек статической памяти будет случайным и непредсказуемым,

Экспериментальная установка. Для исследования характеристик ФНФ на статической памяти были задействованы платы быстрого прототипирования Nexys-4, содержащие кристалл ПЛИС компании Xilinx и промышленные микросхемы статической памяти компании MicroChip 23K256. Выбранные микросхемы имеют информационный размер 256 Кбит, структура ячейки-состоит из шести КМОП-транзисторов (рис 1 б), размер транзистора – 180 нм. Была спроектирована цифровая система на ПЛИС с использованием софт-процессора MicroBlaze компании Xilinx и контроллера SPI, выполняющего роль блока-сопряжения с микросхемами статической памяти. Эксперимент состоял из многократно повторяющихся этапов включения микросхем, с извлечением всего объема данных из массива ячеек памяти. После считывания значения из ячеек данные отправлялись с использованием интерфейса UART на ПК для дальнейшего анализа.

Эксперименты с использованием эмуляции ячеек памяти. Ячейки статической памяти реализовывались на кристалле ПЛИС с применением

технологических LUT (Look Up Table)-блоков, сконфигурируемых в качестве инверторов. Всего было реализовано 16384 ячейки, доступ к которым осуществлялся с использованием того же софт-процессора MicroBlaze и системной шины AXI4-Lite. Как и в предыдущем варианте, данные, полученные с ячеек эмулирующих статическую память, отправлялись на ПК для анализа.

Анализ полученных данных. С целью достижения соизмеримости анализа характеристик были проанализированы одинаковые объемы данных (16 Кбит), которые были разделены на 8-битные и 32-битные идентификаторы. В результате анализа были получены характеристики для каждого из экспериментов (табл. 1).

Таблица 1. Результаты эксперимента

	23K256	Artix-7
16 Кбит		
Соотношение 0/1	38,28%	48,12%
Стабильность	95,24%	77,85%
8-битные идентификаторы		
Среднее удельное расстояние Хэмминга	4,81%	1,86%
Средняя стабильность	95,19%	97,82%
Среднее единообразие	66,05%	83,67%
32-битные идентификаторы		
Среднее удельное расстояние Хэмминга	3,87%	1,25%
Средняя стабильность	94,67%	93,31%
Среднее единообразие	79,17%	92,59%

При расчете удельного расстояния по Хэммингу для каждого из идентификаторов были взяты все возможные сочетания из 100 по 2, где 100 – количество проведенных экспериментов. Метрика единообразия рассчитывалась по следующей формуле:

$$U = 100 * \left(1 - 2 * \left| \frac{WH(V)}{N} - 0,5 \right| \right) \%, \quad (1)$$

где $WH(V)$ – вес бинарного вектора V по Хэммингу; N – разрядность вектора (идентификатора). Кроме этого был произведен расчет метрики стабильности ячеек статической памяти (рис 2).

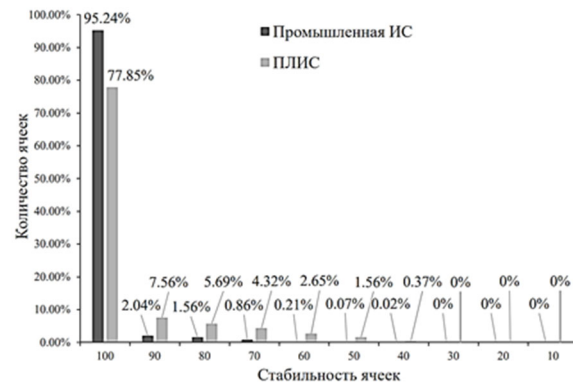


Рисунок 2 – Графики распределения числа ячеек по метрике их стабильности

Стабильность вычисляется по формуле (2)

$$S = 100\% * \frac{\sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{N-1} x_{ji} \text{ xor } x_{j(i-1)}}{N * S} \quad (2)$$

где N – количество экспериментов; S – количество ячеек; x_{ji} – значение j -той ячейки в i -том эксперименте.

В результате проведенного сравнения мы пришли к следующему выводу: реальные образцы статической памяти обладают меньшей стабильностью ячеек, чем эмуляция на ПЛИС, но при этом дают возможность получить соотношение нулей и единиц, близкое к идеальному.

Благодарности. Авторы выражают благодарность резиденту парка высоких технологий РБ СК

Hynix memory solutions Eastern Europe за предоставленное оборудование для проведения экспериментов.

Литература

1. Заливако, С. С. Обзор методов активной идентификации цифровых устройств / С. С. Заливако, А. А. Иванюк // Информатика. – 2016. – №3. – С. 38–47.
2. Tehranipoor, M. Counterfeit Integrated Circuits. Detection and Avoidance / M. Tehranipoor, U. Guin, D. Forte. – Switzerland: Springer International Publishing, 2015. – 269 p.
3. Pappu, R. Physical One-Way Functions: Ph.D. thesis / R. Pappu // MIT. – Boston, USA, 2001.
4. Physical one-way functions / R. Pappu [et al.] // Science. – 2002. – Vol. 297, № 5589. – P. 2026–2030.

УДК 531.383

ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ, РАБОТАЮЩИЙ В РЕЖИМЕ СВОБОДНОЙ ВОЛНЫ

Каликанов А.В., Стрельцов Д.С., Матвеев В.В., Лихошерст В.В., Погорелов М.Г.

ФГБОУ «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация: В работе представлены результаты исследования волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором на подвижном основании, работающем в режиме свободной волны, показана возможность определения углового положения.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, свободная волна, металлический резонатор, датчик угла.

WAVE SOLID STATE GYRO WITH METAL CAVITY OPERATING IN FREE WAVE MODE

Kalikanov A., Streltsov D. Matveev V. Likhosherst V. Pogorelov M.

Tula State University
Tula, Russian Federation

Abstract: As a result of the studies of a wave solid-state gyroscope with a metal resonator on a movable base operating in the free wave mode, the possibility of determining the angular position was found.

Key words: wave solid-state gyroscope, free wave, metal resonator, angle sensor.

Адрес для переписки: Каликанов А.В., пр. Ленина, 95, Тула 300012, Российская Федерация
e-mail: kalikanov.aleksei@mail.ru

Как известно, существуют две основные схемы построения волнового твердотельного гироскопа (ВТГ): измеритель угла поворота (ВТГ-ИГ) и измеритель угловой скорости вращения (ВТГ-ДУС). В ВТГ-ИГ используется инерционное свойство стоячей волны и оценивается угол поворота основания, на котором установлен гироскоп, относительно положения волны через коэффициент пересчета (коэффициент Брайана). В ВТГ-ДУС реализуется удержание стоячей волны относительно корпуса гироскопа, а вторичная волна, возникающая при вращении основания, подавляется (компенсируется). Сила компенсации содержит информацию об угловой скорости вращения основания [1].

В настоящее время существует необходимость в создании ВТГ-ИГ среднего класса точности для применения в качестве датчика угловых

перемещений для беспилотного летательного аппарата, при этом ВТГ должен измерять не угловую скорость, а угол поворота основания. Для создания ВТГ в режиме датчика угловых перемещений необходимым условием является, чтобы стоячая волна, возбуждаемая в цилиндрической оболочке, не была бы «привязана» к основанию прибора, а существовала в резонаторе «свободно». В этом случае ВТГ можно уподобить маятнику Фуко, позволяющего фиксировать угол поворота основания.

В режиме свободной волны (рис. 1) в начальный промежуток времени с генератора синусоидальных сигналов на диаметрально противоположные пьезоэлементы I–I подается сигнал в виде синусоидального напряжения $A \sin(\omega t)$, где A – амплитуда, ω – частота подачи переменного сигнала, равная (или близкая) к собственной частоте