# ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

# ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

# Ավետիսյան Զավեն Մակարի

# ԳԵՐՄԵԾ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԲԱՐՁՐ ՃՇՏՈՒԹՅԱՄԲ ՉԱՓՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱՋՈՏՈՒՄԸ

Ե.13.02 – «Ավտոմատացման համակարգեր» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

# ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան 2019

# МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

## НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

## Аветисян Завен Макарович

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ С ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТЬЮ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХБОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

## ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.02 – "Системы автоматизации"

Ереван 2019

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Եվրոպական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

տ.գ.դ. Օ.Հ. Պետրոսյան

տ.գ.դ. Ա. Գ. Հարությունյան տ.գ.թ. Ա.Ա. Գևորգյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

Երևանի կապի միջոցների գիտահետազոտական ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2019թ. հունիսի 13-ին, ժամը 14<sup>00</sup>-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող - «Կառավարման և ավտոմատացման» 032 Մասնագիտական խորիրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք) Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ–ի գրադարանում։ Սեղմագիրն առաքված է 2019 թ. մայիսի 3-ին։

032 Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.՝

Ա.Վ. Մելիքյան

Тема диссертации утверждена в Европейском университете

Научный руководитель:

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

д.т.н. О.А. Петросян

д.т.н. А.Г. Арутюнян к.т.н. А.А. Геворгян

Ереванский научно-исследовательский институт средств связи

Защита диссертации состоится 13 июня 2019г. в 14<sup>00</sup> ч. на заседании Специализированного совета 032 - "Управления и автоматизации", действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПУА), по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА. Автореферат разослан 3 мая 2019г.

Ученый секретарь Специализированного совета 032 к.т.н.

А.В. Меликян

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

<u>Актуальность темы.</u> Одной из важнейших задач проектирования и эксплуатации сверхбольших интегральных схем (СБИС) является проведение в них точных измерений. Целью этих измерений является проверка параметров СБИС, а также оценка работоспособности схемы. Измерения параметров СБИС проводятся на всех жизненных этапах устройств – при проектировании для улучшения параметров СБИС и приведения проекта в соответствие с технической задачей; при производстве для проверки работы разработанной СБИС перед серийным производством; при эксплуатации с целью регулирования работы схемы.

Учитывая требования к современным полупроводниковым кристаллам, технологии постоянно подвергаются масштабированию, за счет чего уменьшаются абсолютные значения параметров СБИС. Это делает возможным обеспечение низкого энергопотребления и высокого быстродействия при занимаемой малой площади. Однако уменьшение значений параметров приводит тому, что погрешности с малым абсолютным значением систем измерения параметров СБИС могут иметь большое влияние на результаты измерения и привести к уменьшению их точности. Измерения, не имеющие достаточную точность, вызывают ряд других проблем, вплоть до производства неработоспособной СБИС.

С целью уменьшения погрешности измерений, в настоящее время проводятся значительные работы со стороны технологических заводов и организаций, проектирующих системы измерения параметров СБИС. Для увеличения точности измерений постоянно повышается точность алгоритмов средств моделирования и разрабатываемых моделей, а также принимаются во внимание такие явления, которые влияют на работу и характеризуют параметры транзисторов.

Учитывая важность сфер применения СБИС, особое внимание уделяется измерению характеризующих надежность устройств параметров. Отсюда возникает необходимость рассмотрения явлений, влияющих на надежность. Некорректная оценка влияний подобных явлений может стать причиной увеличения количества сбоев, возникающих в разработанной СБИС. В настоящее время большое внимание уделяется возможным изменениям параметров при старении транзисторов, обусловленной масштабированием технологий, так как влияние старения на транзисторы с малым каналом велико. С течением времени ухудшается работа транзисторов, что приводит к сокращению жизненного цикла СБИС. Следовательно, для обеспечения надежности устройства необходимо повысить точность измерения с учетом точной оценки последствий старения.

Поскольку для обеспечения большой функциональности в СБИС начинают использоваться многосинхросигнальные узлы, другим важнейшим явлением, влияющим на надежность, становятся метастабильные состояния, возникающие в синхронизаторах. Следовательно, на этапе проектирования необходимо проводить точные измерения параметров, характеризующих метастабильные состояния. Кроме измерений, проводимых на этапе проектирования, в СБИС необходимо интегрировать такие схемы, которые при измерении в разработанной схеме позволят выявить существующие сбои и, тем самым, исключить их распространение сбоев или устранить причины их возникновения.

При проведении измерений вручную с использованием программных устройств не всегда удается обеспечить высокую точность (поскольку достоверные анализы, проводимые во время измерений, могут занять довольно большое время у проектировщика). Кроме того, также должна быть возможность внедрения разработанных измерительных систем в процедуру проектирования СБИС.

Учитывая приведенные факты, можно прийти к выводу, что разработка автоматизированной системы для измерения с высокой точностью параметров СБИС является актуальной задачей.

Диссертационная работа посвящена исследованию существующих вариантов и методов измерения параметров СБИС, а также разработке автоматизированной системы точных измерений посредством рассмотрения явлений, влияющих на надежность схем.

<u>Объект исследования.</u> Проводимые измерения в СБИС, повышение их точности с учетом явлений, влияющих на параметры схемы, и подходов рассмотрения этих явлений.

<u>Цель работы.</u> Разработка обобщенного метода и автоматизированной системы для измерения с высокой точностью параметров СБИС, способствующих проектированию СБИС, удовлетворяющих современным требованиям, с применением современных производственных процессов.

<u>Методы исследования.</u> В процессе исследования использованы методы моделирования измерений параметров СБИС и способы программного обеспечения этих методов.

#### Научная новизна.

1. Предложены способы измерения с высокой точностью параметров СБИС:

- которые учитывают влияние фазовых сдвигов входных сигналов стандартных ячеек, при старении, на параметры ячейки;

- которые основаны на проводимых измерениях значений предложенного коэффициента, характеризующего наработку на отказ (ННО), обусловленной метастабильными состояниями триггеров библиотек стандартных ячеек.

2. Предложен способ повышения надежности устройства, путем измерения с высокой точностью параметров СБИС, для реализации которого разработан синхронизатор, обнаруживающий метастабильность.

3. На основе предложенных способов разработаны обобщенный метод измерения с высокой точностью параметров СБИС и алгоритм его реализации для проектирования автоматизированной системы.

4. Разработана автоматизированная система для измерения с высокой точностью параметров СБИС на основе обобщенного метода.

**Практическая ценность работы.** Программный инструмент "Ассигаte Measurement of Reliability" (AMR) создан с использованием обобщенного метода, разработанного в диссертации и предоставляет возможность проведения точных измерений параметров СБИС путем детального рассмотрения явлений, влияющих на надежность СБИС. Благодаря внедренной автоматизированной системе, инструмент позволяет выявлять максимальное, минимальное и среднее воздействия старения, возникающих вследствие разных фазовых сдвигов на параметры ячейки и измерять задержки при этих условиях. С помощью точных измерений он позволяет также выявлять максимально соответствующий синхронизатору триггер и на основе этого триггера проектировать надежный синхронизатор, который путем проведения измерений в кристалле обнаруживает метастабильные состояния. Использование АМR на этапе проектирования предоставляет проектировщику возможность существенно повысить надежность разрабатываемой в дальнейшем СБИС за счет выполнения измерений с высокой точностью.

<u>Достоверность научных положений.</u> Научные положения подтверждены теоретическими исследованиями, соответствием результатов расчетов и моделирования, а также совпадением результатов, полученных методами, разработанными в диссертационной работе и другими авторами.

**<u>Внедрение</u>**. Разработанный программный инструмент AMR утвержден для внедрения в ЗАО "Синопсис Армения". Он предусмотрен для измерения с высокой точностью параметров СБИС и повышения их надежности. Обоснована важность разработанного программного инструмента в процессе измерений СБИС.

## Основные положения, выносимые на защиту:

- обобщенный метод измерения с высокой точностью параметров СБИС;

- способ измерения параметров СБИС, посредством коэффициента, характеризующего ННО, обусловленного метастабильными состояниями;

- схема надежного синхронизатора, обнаруживающей метастабильные состояния, на основе измерений параметров СБИС, выполняемых в кристалле;

- программный инструмент AMR для проведения автоматизированных измерений с высокой точностью параметров СБИС;

- автоматизированные средства проведения с высокой точностью измерений параметров СБИС при максимальном, минимальном и среднем воздействиях явлений старения, возникающих вследствие разных фазовых сдвигов.

<u>Апробация работы.</u> Основные научные и практические результаты диссертации были представлены и обсуждены на: Международной научнотехнической конференции: "16-й симпозиум по проектированию и тестированию IEEE Восток – Запад" (EWDTS'18, Казань, Россия, 2018); "39-ой Международной конференции электроники и нанотехнологий IEEE" (ELNANO, Киев, Украина, 2019); ежегодной конференции НПУА (2017-2018, Ереван, Армения), научнотехнических семинарах кафедры "ИТ и прикладной математики" ЕУ (2017-2018, Ереван, Армения).

<u>Публикации.</u> Основные положения диссертации отражены в восьми научных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка использованной литературы, включающего 98 наименований, и шести приложений. Основной объем диссертации составляет 148 страниц, включая 64 рисунок и 28 таблиц. Общий объем работы, включая приложения, составляет 187 страниц. Диссертация написана на армянском языке.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи исследования, представлены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

<u>В первой главе</u> анализированы виды измерений, проведенных в СБИС. Обоснована необходимость выполнения измерений с высокой точностью, а также необходимость изучения явлений, влияющих на надежность СБИС. Учитывая важность характеризации срока жизни схемы и применения многосинхросигнальных узлов в современных СБИС, выделены явления старения схем и метастабильности. Изучены причины возникновения указанных явлений и методы измерения их воздействий.

Рассмотрены методы увеличения точности измерений, проводимых в СБИС. Показано, что сушествующие полходы проведения измерений в библиотеках станлартных ячеек имеют нелостаточную точность (что приволит к уменьшению точности измерений в цифровых СБИС), что объясняется не детальным рассмотрением явлений, влияющих на надежность схемы. В частности, в существующих подходах не рассматривается наработка на отказ, характеризующая влияние метастабильных состояний на надежность СБИС. Также исследованы существующие подходы в случае учета старения ячеек и представлены недостатки каждого подхода. В некоторых подходах не рассматриваются явления старения положительной нестабильности температуры смещения (НТС) и явления инъекции горячего носителя (ИГН), а в некоторых - оба эти явления. Показано также влияние фазовых сдвигов между входными сигналами ячеек на деградацию характеристики при старении, которое не учитывается в существующих подходах. Доказана необходимость применения автоматизированной системы для проведения точных измерений и сформулированы важнейшие задачи, выдвигаемые перед измерительной системой и проектировщиком СБИС.

Во второй главе проведено детальное исследование приведенных в первой главе явлений, влияющих на надежность СБИС. Разработан обобщенный метод точных измерений параметров СБИС на основе измерений воздействия явлений старения и метастабильности, на базе которого построена алгоритмическая основа автоматизированной системы.

Точные измерения с учетом явления старения. Исследовано влияние фазовых сдвигов между входными сигналами ячеек на параметры транзисторов при Рассмотрены находящиеся явлениях старения НТС И ИГН. в пепях последовательно соединенные однотипные транзисторы. Установлено, что деградация этих транзисторов зависит от фазовых сдвигов между входными сигналами ячеек. Показано, что пороговое напряжение того же транзистора при разных фазовых сдвигах может меняться в 22 и 66 раз соответственно для металлоксид-полупроводника р типа (p-MOII) и n типа (n-MOII) транзисторов. Рассмотрено известное в литературе уравнение задержек ячеек и показано, что деградация задержки ячейки при старении также зависит от фазового сдвига между входными сигналами ячейки, следовательно, его игнорирование приводит к погрешностям в измерениях. С целью иллюстрации указанного влияния HSPICE инструментом произведено моделирование для ячейки "Исключающий-ИЛИ" при разных фазовых сдвигах входных сигналов (табл. 1, ff/125<sup>0</sup>C/1.1B).

Табл. 1

20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 2	Фазовый сдвиг				Beering trans (arm (8/)
задержка	$0^0$	$90^{0}$	$180^{0}$	$270^{0}$	Разница макс./мин. (%)
rise_fall_a (пс)	7,88	7,07	5,14	7,25	53,5
fall_rise_a (пс)	4,48	4,80	5,65	4,79	26,1
rise_fall_b (пс)	7,78	6,88	6,65	6,83	17
fall_rise_b (пс)	2,97	4,91	5,69	5,06	91,8

Результаты измерения при разных фазовых сдвигах в течение старения

Так как указанные выше фазовые сдвиги влияют на те ячейки, в которых входные сигналы подключаются к вентилям последовательно соединенных транзисторов, влияние фазового сдвига рассматривается на логических элементах. Количество вариантов характеризации, добавляемых для рассмотрения фазовых сдвигов, для ячейки с *n* входами равно.

$$\mathbf{P}_{\mathbf{\Phi}} = \mathbf{m}^{\mathbf{n}-1},\tag{1}$$

где *т* – количество элементов множества рассматриваемых фазовых сдвигов.

Количество вариантов характеризации общей библиотеки с учетом (1) равно

$$\mathbf{P}_{\mathbf{b}_{-}\boldsymbol{\phi}} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{n} \cdot \mathbf{s} \cdot \mathbf{l} \cdot \mathbf{d}^{\mathbf{n}_{i}} \cdot \mathbf{m}^{\mathbf{n}_{i} \cdot \mathbf{1}} , \qquad (2)$$

где *s*, *l* и d – соответственно количество элементов множества рассматриваемых длительностей фронтов входных сигналов, множества выходных емкостных грузов и множества коэффициентов заполнения, а k – количество ячеек библиотеки.

Учитывая, что при старении влияние фазовых сдвигов между входными сигналами ячейки на ее параметры имеет немонотонный характер, характеризация поведения ячейки, в зависимости от фазового сдвига, с малым количеством шагов будет нереализуема. Из выражения (2) следует, что выбор большого количества шагов может привести к резкому увеличению объема информации, хранящейся в библиотеке.

На основе вышеизложенного, в зависимости от влияния фазовых сдвигов входных сигналов ячейки, в диссертационной работе предложено характеризовать библиотеки, учитывающие влияние старения для трех случаев:

 наихудший случай – когда влияние фазового сдвига на задержки ячейки максимально;

 наилучший случай – когда влияние фазового сдвига на задержки ячейки минимально;

- средний случай – когда рассматривается среднее значение влияния фазового сдвига на задержки ячейки.

В диссертационной работе обоснована необходимость применения вышеперечисленных случаев измерения задержек на этапе проектирования, что обусловлено нарушениями времен установок и удержаний, а также оценкой таких участков перебоев, в которых фазовые сдвиги сигналов во входах ячеек будут иметь разные значения в течение жизненного цикла работы СБИС.

**Измерения** для оценки **ННО**. Во второй главе исследовано также ННО, что обусловлено влиянием метастабильных состояний на СБИС. Предложено измерить ННО в триггерах библиотеки стандартных ячеек, что позволит выбрать триггер с лучшими параметрами в качестве синхронизатора, в результате чего повысится надежность ИС. Для этого рассмотрен исследованный в первой главе механизм измерения ННО при содержащихся в триггере двух защелках (n=2):

$$HHO = T_{\pi}T_{c}\left(\prod_{j=1}^{n-1} \frac{\tau_{j}e^{\sum_{i=1}^{n} \frac{T_{j}^{YT}}{\tau_{i}}}}{T_{j}^{OM}}\right) \cdot \left(\frac{e^{\sum_{i=1}^{n} \frac{T_{j}^{YT}}{\tau_{i}}}}{T_{n}^{OM}}\right),$$
(3)

где  $T_{a}$  – период сигнала даты;  $T_{c}$  – период синхросигнала;  $T^{yT}$  – время утверждения рассматриваемой защелки;  $T^{OM}$  – окно метастабильности рассматриваемой защелки; а  $\tau$  – временная константа рассматриваемой защелки.

Решение выражения (3) приведет к расчету ННО для триггера, но учитывая, что в полученном выражении существуют переменные, характеризующиеся параметрами работы ИС (T<sub>a</sub>, T<sub>c</sub>), на этапе характеризации библиотек измерение значения ННО триггеров оказывается невозможным. По этой причине предложено измерить коэффициент, характеризующий ННО триггеров:

$$k_{\rm HHO} = \frac{\tau_{\rm y} e^{\left(\frac{T_{\rm c} - 2T_{\rm fl}^{\rm yc}}{\tau_{\rm y}} + \frac{T_{\rm c} - 2T_{\rm y}^{\rm yc} - 2T_{\rm CB}}{\tau_{\rm n}}\right)}{\left(T_{\rm y}^{\rm yc} + T_{\rm y}^{\rm yA}\right)\left(T_{\rm fl}^{\rm yc} + T_{\rm fl}^{\rm yA}\right)} , \qquad (4)$$

где  $T_y^{yc}$  и  $T_n^{yc}$  – соответственно время установки управляющей и подчиненной защелки;  $T_y^{yg}$  и  $T_n^{yg}$  – соответственно время удержания управляющей и подчиненной защелки;  $\tau_y$  и  $\tau_n$  – соответственно временная константа управляющей и подчиненной защелки, а  $T_{CB}$  – задержка от синхросигнала до выхода.

В выражении (4) значение  $T_c$  задается проектировщиком при характеризации библиотеки, а для измерения значений  $\tau_y$ ,  $\tau_n$ ,  $T_y^{yc}$ ,  $T_n^{yc}$ ,  $T_y^{ya}$ ,  $T_n^{ya}$  и  $T_{CB}$  разработана автоматизированная система, позволяющая с помощью программного инструмента HSPICE обнаружить значения указанных параметров на основании методов, исследованных в первой главе.

Разработан метод проектирования надежного синхронизатора посредством выделения триггера с наибольшим значением измеренной ННО, в котором предложено добавить схему, обнаруживающую метастабильность.

Разработанная схема приведена на рис. 1, где выделенный отрезок - это схема, обнаруживающая метастабильное состояние, а остальная часть – схема защелки синхронизатора.



Рис. 1. Схема защелки триггера, обнаруживающего метастабильное состояние

Схема работает по следующему принципу:

- с помощью элемента "Исключающего-ИЛИ" рассматриваются сигналы во входных и выходных узлах защелки – "D1" и "D3" (сигналы сравниваются);

- так как полученный результат (узел "Х") не всегда находится на одном из логических уровней, то его сравнивают с напряжением смещения. Если полученный результат больше напряжения смещения, то фиксируется метастабильное или неправильно прочтенное состояние, в противном случае - фиксируется, что схема работала правильно (узел "Выход").

После добавления схемы в синхронизаторе смоделировано метастабильное состояние, которое обнаружено схемой (рис. 2).

Несмотря на то, что после добавления схемы в триггере увеличились потребляемые токи и площадь схемы, надо учесть, что во всей системе синхронизаторы встречаются в небольшом количестве. Следовательно, при предложенном подходе площадь всей системы и потребляемая мощность вырастут на незначительные проценты (площадь – на 0,009%, мощность – на 0,016%).

Исследованы схемы существующего и разработанного триггеров (табл. 2).

Использование разработанной схемы дает возможность избегания ликвидации причины возникновения метастабильного состояния или распространения ложного сигнала.



Рис. 2. Результаты моделирования работы схемы, обнаруживающей метастабильность

Табл. 2

	Дин. ток,	Оценка	HHO,	Обнаружение
Слема триттера	мкА	площади, мкм <sup>2</sup>	год	метастабильности
Существующий триггер	13,1	7,7	7,2*10 <sup>31</sup>	-
Разработанный триггер	46,8	11,9	$1,3*10^{30}$	+

Параметры существующей и разработанной схем

**Обобщенный метод точных измерений параметров СБИС.** На основании предложенных решений проведения измерений разработан обобщенный метод точных измерений параметров в библиотеках стандартных ячеек, шаги которого имеют следующую очередность:

1. Ввод множества элементов библиотеки стандартных ячеек А [A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, ..., A<sub>k</sub>].

2. Ввод множества длительностей фронтов входных сигналов S [S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, ..., S<sub>s</sub>].

3. Ввод множества выходных емкостных грузов L [L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, ..., L<sub>l</sub>].

4. Ввод множества коэффициентов заполнения D [D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, ..., D<sub>l</sub>].

5. Выбор действия со стороны проектировщика (характеризация библиотеки с учетом явлений старения при разных воздействиях фазового сдвига - для наихудшего/наилучшего/среднего случая или характеризация синхронизатора).

6. Реализация одного (или нескольких) из следующих этапов на основании выбранного варианта:

- измерение задержек в библиотеках, учитывающих явления старения в случае максимального воздействия;

- измерение задержек в библиотеках, учитывающих явления старения в случае минимального воздействия;

- измерение задержек в библиотеках, учитывающих явления старения в случае среднего воздействия;

- измерение ННО для триггеров и проектирование надежного синхронизатора.

7. Возврат к пункту 5 и повторение шагов или завершение функционирования метода.

Обобщенный метод при максимальном воздействии. Для измерения задержек, сформированных в результате максимального воздействия фазовых

сдвигов между входными сигналами ячеек при старении, проведено более детальное рассмотрение этого воздействия. В результате исследований предложены шесть позиций фазовых сдвигов, при которых воздействия явлений НТС и ИГН старения на задержки ячеек могут быть максимальными (рис. 3).



Рис. 3. Позиции множества фазовых сдвигов для выявления максимального воздействия

Для получения позиций, приведенных на рис. 3, для фазовых сдвигов получено следующее множество:

 $C = ["-\delta", "\delta", "T_n d_{K31} - \delta", "T_n d_{K31} + \delta", "T_n - T_n d_{K32} - \delta", "T_n - T_n d_{K32} + \delta"],$  (5) где  $T_n$  – период сигнала;  $d_{K31}$  – коэффициент заполнения сигнала, по отношению к которому производится сдвиг;  $d_{K32}$  – коэффициент заполнения сдвигаемого сигнала;  $\delta$  – сдвиг между сигналами (берется равным длительности фронта входного сигнала).

Для оценки погрешности измерений, производимых предложенным методом, обусловленной внутренними задержками ячеек, проведены исследования, в которых задержки измерены при значениях сдвига  $\delta$  в промежутке  $\pm x$ , где x характеризует внутренние задержки ячейки. Результаты приведены для ячейки "Исключающей-ИЛИ", для чего рассчитано среднее квадратическое отклонение (СКО) при 100 измерениях в промежутке  $\pm 5$  *nc*. В результате СКО получилось  $\sigma$ =14.7  $\phi c$ .

Показано, что количество необходимых симуляций для выявления максимального влияния старения, вызванного вследствие фазового сдвига на задержках ячейки, не может быть определено выражением (1). С помощью математической индукции доказано, что для ячейки с *n* входами количество необходимых симуляций при множестве, приведенном в (5), равно

$$P_{\phi} = \prod_{i=1}^{n-1} 6i = 6^{n-1} \cdot (n-1)! .$$
(6)

На основе метода выявления максимального воздействия, разработан алгоритм автоматизированного средства для реализации первого пункта 6-го шага обобщенного метода проведения измерений.

Последовательность шагов алгоритма при измерении задержек в библиотеках, учитывающих явления старения, в случае максимального воздействия:

1. выделение логических элементов во множестве F;

2. рекурсивное определение фазового сдвига входных сигналов соответственно количеству входов выделенных элементов с учетом приведенного в (5) множества и регистрация в разных множествах *C* в зависимости от количества входов;

3. выбор стандартной ячейки из множества F;

4. создание HSPICE описаний, сформированных элементами соответствующего множества *C*;

5. осуществление HSPICE симуляций;

6. анализ результатов и выявление элементов максимального воздействия множества *C*;

7. создание HSPICE описаний, для выявленных позиций максимальных воздействий, с комбинациями элементов введенных множеств *S*, *L* и *D*;

8. возврат к пункту 3 и повторение шагов до завершения элементов множества F;

9. осуществление симуляций HSPICE;

10. создание библиотеки при максимальном воздействии.

Обобщенный метод при минимальном воздействии. Для измерения задержек, сформированных в результате минимального воздействия фазовых сдвигов между входными сигналами ячеек при старении, проведены исследования, по результатам которых предложены три позиции, в которых воздействие старения может быть минимальным (рис. 4).



Рис. 4. Позиция множества минимального воздействия фазового сдвига

Для получения позиций, приведенных на рис. 4, получено следующее множество фазовых сдвигов:

$$C = [0, "T_{\pi} \cdot d_{K31}", "T_{\pi} - T_{\pi} \cdot d_{K32}"].$$
(7)

Соответственно предыдущего метода, для выявления минимального воздействия также проведены исследования для расчета СКО, обусловленного внутренними задержками ячеек. При 100 измерениях в промежутке  $\pm 5$  пс СКО получилось  $\sigma$ =72.2  $\phi c$ .

Для выявления позиции минимального воздействия старения доказано, что количество необходимых симуляций равно

$$\mathbf{P}_{\phi} = \prod_{i=1}^{n-1} 3i = 3^{n-1} \cdot (n-1)! .$$
(8)

На основе метода выявления минимального воздействия разработан алгоритм автоматизированного средства для реализации второго пункта 6-го шага обобщенного метода проведения измерений. Шаги совпадают с шагами алгоритма для случая максимального воздействия. В данном случае в пункте 2 используется множество (7), а в пункте 6 выявляются элементы минимального влияния.

Обобщенный метод при среднем воздействии. Проведены исследования для измерения средних значений задержек, возникающих вследствие старения ячеек, при наличии фазовых сдвигов между входными сигналами. Так как вероятность возникновения фазовых сдвигов между входами ячеек во всех случаях считается одинаковой, для выявления среднего воздействия необходимо рассмотреть фазовые сдвиги при равных шагах. Следовательно, задача сводится к выбору множества фазовых сдвигов *C*:

$$C = \left[0, \frac{T_{\pi}}{m}, 2 \cdot \frac{T_{\pi}}{m}, \dots, (m-1) \cdot \frac{T_{\pi}}{m}\right], \qquad (9)$$

где m – количество точек дискретизации фазового сдвига. Очевидно, что точность результатов зависит от количества элементов множества C, от которого зависят также количество симуляций (рассчитывается с помощью выражения (1)) и длительность характеризации. Следовательно, определение случая среднего воздействия фазового сдвига на параметры ячейки выполняется интерактивным способом (m вводится проектировщиком).

Для оценки погрешности измерений при среднем воздействии в диссертационной работе исследовано распределение задержек "Исключающей-ИЛИ" при разных фазовых сдвигах, и показано, что усредненный результат при измерениях в четырех точках фазового сдвига, различается от усредненного результата, полученного при измерениях в ста точках в 0.26 (где *σ* является СКО измерений в ста точках фазового сдвига).

На основе метода выявления среднего воздействия разработан алгоритм автоматизированного средства для реализации третьего пункта 6-го шага обобщенного метода проведения измерений.

Последовательность шагов при измерении задержек в библиотеках, учитывающих явления старения в случае среднего воздействия:

1. ввод количества точек дискретизации фазового сдвига;

2. определение множества C в соответствии с (9);

3. выделение логических элементов во множестве F;

3. выбор стандартной ячейки из множества F;

4. создание HSPICE описаний комбинациями элементов введенных множеств S, L и D и определенного множества C;

5. возврат к пункту 4 и повторение шагов до завершения элементов множества F;

6. осуществление HSPICE симуляций;

7. анализ результатов и создание библиотеки для случая среднего воздействия.

Обобшенный метол для измерения ННО И проектирования синхронизатора. На основе предложенного подхода для измерения ННО в триггерах библиотеки стандартных ячеек разработан алгоритм, с помощью которого измеряются временные параметры, приведенные в выражении (2), и рассчитывается коэффициент k<sub>HHO</sub>. После чего становится возможным проектирование належного синхронизатора. Разработан алгоритм автоматизированного средства для реализации четвертого пункта 6-го шага обобщенного метода проведения измерений.

Последовательность шагов при измерении ННО для триггеров и проектировании надежного синхронизатора:

1. ввод частоты синхросигнала для измерения коэффициента ННО;

2. выделение триггеров из библиотеки стандартных ячеек во множество Т;

3. выбор триггера из множества T;

4. измерение временных параметров  $T_y^{yc}$ ,  $T_n^{yc}$ ,  $T_y^{yd}$ ,  $T_n^{yd}$ ,  $\tau_y$ ,  $\tau_n$  и  $T_{CB}$ ;

5. расчет коэффициента k<sub>нно</sub> с помощью выражения (4);

6. возврат к пункту 3 и повторение шагов до завершения элементов множества *T*;

7. проектирование надежного синхронизатора на основе триггера, имеющего наибольшее значение коэффициента k<sub>HHO</sub>.

**<u>В третьей главе</u>** на основе алгоритмов обобщенного метода, приведенного во второй главе, разработана автоматизированная система для измерения с высокой точностью параметров СБИС, маршрут которой состоит из четырех основных процедур:

- ввод и анализ уже существующей библиотеки стандартных ячеек или создание новой библиотеки;

- объявление входных параметров, необходимых для проведения измерений;

- точное измерение задержек ячеек в зависимости от старения ячейки и создание точных библиотек;

- измерение параметров триггеров как синхронизаторов и проектирование надежного синхронизатора.

Разработано программное обеспечение обобщенного метода точных измерений параметров СБИС, для реализации которого создан инструмент AMR, наиболее важные окна которого приведены на рис. 5.



Рис. 5. Основные окна программного инструмента AMR: а – главное окно инструмента AMR после ввода библиотеки; б – окно, предусмотренное для выполнения измерений при учете явления старения; в – окно, предусмотренное для выполнения измерений при учете метастабильных явлений

Кроме того, приведены также детальные описания и блок-схемы программных реализаций, созданных на основе разработанного во второй главе обобщенного метода и внедренных в нем алгоритмов. На рис. 6 и 7 приведены некоторые из имеющихся в диссертационной работе блок-схем.

С помощью разработанной автоматизированной системы проведены исследования методов, предложенных во второй главе. Некоторые из результатов при учете явлений старения приведены на рис. 8. Проведены сравнения максимального и минимального воздействий фазового сдвига, полученного программным инструментом AMR, с результатами при игнорировании фазового сдвига, а также сравнения эффективности алгоритмов программного инструмента AMR с максимальными и минимальными воздействиями, выявленными при рассмотрении фазовых сдвигов с простейшими шагами. Кроме того, приведены времена, необходимые для измерения максимальной и минимальной задержек как программным инструментом AMR, так и простейшими шагами, при разных количествах входов той же ячейки.

Сравнения измерений, проведенных программным инструментом AMR, работающим на основе разработанной автоматизированной системы, с измерениями, проведенными на основе известных подходов характеризации ячеек (когда фазовый сдвиг игнорируется), приведены для библиотеки, содержащей 72 ячейки. В табл. 3 приведены результаты сравнений с точными измерениями (фазовые сдвиги, рассмотренные 100 шагов).



явлений старения



Рис. 7. Блок-схемы реализации алгоритмов: а – измерения среднего воздействия явлений старения; б – измерения ННО и проектирования синхронизатора

Табл. 3

	<b>`</b>	- 1	1		1100		~	
	hinnan	nna	han manager and a man	111100000000000000000000000000000000000	A A A P	0 111010011	0000111111	amananni
- U.	ленки з	(1)(1	лективности	инструменти	ANIN	с учетом	явлении	стирения
						- ,		

Способы измерения		Максимальное воздействие	Минимальное воздействие	Среднее воздействие		
Подходы, игнорирующие	Максимальмая погрешность, %	97,2	54,9	67,9		
фазовый сдвиг	Длительность, час	11,6				
AMR	Максимальная погрешность, %	0,8	0,8	3,6		
	Длительность, час	16,4	12,3	93		
Длительность точных измерений, час			443			

Приведенные в таблице значения временных параметров соответствуют времени выполнения измерений с одним ресурсом. Учитывая, что разработанная автоматизированная система основана на симуляциях HSPICE, которые можно разделить между разными ресурсами, AMR дает возможность проектировщику контролировать количество ресурсов. Учитывая сказанное, большие значения времени выполняемых измерений сокращаются, используя более одного ресурса (при использовании 100 ресурсов измерения, проводимые инструментом AMR для случая среднего воздействия можно выполнить менее чем за один час).

Посредством AMR проведены измерения, необходимые для характеризации ННО обобщенного метода. Также произведен выбор синхронизатора, выполненный программой, И представлены результаты проектирования (выявление метастабильного состояния за счет увеличения занимаемой площади на 65%), для проверки работы которого в нем было смоделировано метастабильное состояние. Приведены результаты моделирования, по которым видно, что спроектированная схема повторяет поведение, приведенное на рис. 2. Для одного из триггеров библиотеки стандартных ячеек посредством ручных симуляций проведено измерение характеризующих параметров ННО, и полученные результаты сравнены с результатами измерений, проведенных AMR для того же триггера (табл. 4). Показано, что максимальная погрешность результатов, полученных АМК, составляет 1,9%. Длительность выполнения измерений, проводимых инструментом AMR, в 7 раз меньше времени измерений, проводимых вручную.

Длительность измерения коэффициента ННО имеет линейную зависимость от количества присутствующих в библиотеке триггеров. Зависимость измерения коэффициента ННО и времени проектирования синхронизатора с помощью AMR от количества присутствующих в библиотеке триггеров приведена на рис. 9.



Рис. 8. Исследование результатов, полученных программным инструментом AMR



Рис. 9. Время измерения параметров с помощью AMR при метастабильности

Табл. 4

Временные параметры		Ручные	Измерения,	Погрешность
		измерения	проводимые Амк	AIVIN, 70
Время	Управляющая защелка	14,7	14,7	0
установки, пс	Подчиненная защелка	7,81	7,81	0
Время	Управляющая защелка	3	3	0
утверждения, пс	Подчиненная защелка	5,2	5,2	0
Временная	Управляющая защелка	6,87	7	1,9
константа, пс	Подчиненная защелка	11,97	12,1	1,1
Синхрвыход задержка, пс		87	87	0

Оценка эффективности инструмента AMR с учетом явлений метастабильности

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Обоснована необходимость разработки автоматизированной системы измерения с высокой точностью параметров СБИС [1, 7, 8] и предложены принципы, удовлетворяющие современным требованиям, основанные на:

- рассмотрении фазового сдвига между входными сигналами ячеек, при одновременном воздействии НТС и ИГН явлений старения [3, 4];

- измерениях значений предложенного коэффициента, характеризующего ННО, показывающего вероятность сбоев, обусловленных возникновением метастабильных состояний триггеров библиотек стандартных ячеек [5].

2. На основе предложенных методов разработан обобщенный метод измерения с высокой точностью параметров СБИС и создан алгоритм его реализации, применение которых в результате проведения точных измерений на этапе проектирования предоставляет возможность повысить надежность СБИС [3-5].

3. Разработаны автоматизированные средства с целью проведения точных измерений параметров СБИС, предусмотренные для:

 выявления позиций, соответствующих максимальному и минимальному воздействиям фазового сдвига между входами ячеек при старении с помощью выполнения измерений в шести и трех разных позициях сдвигов, и характеризации библиотек, содержащих упомянутые воздействия в выявленных позициях [4];

- измерения средних воздействий фазовых сдвигов между входными сигналами ячейки при старении и характеризации библиотек, содержащих эти воздействия, основанный на усреднении значений измерений [4];

- оценки вероятности сбоев, обусловленных метастабильными состояниями, посредством которого выполняются измерения предложенного коэффициента, характеризующего ННО триггеров библиотеки стандартных ячеек и проектирования надежного синхронизатора, на основе триггера, имеющего максимальную величину коэффициента. Для обнаружения метастабильных состояний в проектируемой схеме разработана новая схема [2, 5, 6].

4. Разработана автоматизированная система для выполнения точных измерений параметров СБИС и создан программный инструмент AMR на основе разработанного обобщенного метода и алгоритма его реализации, что предоставляет возможность проектировщику интерактивным методом выполнять измерения с высокой точностью в библиотеках стандартных ячеек [3].

5. Испытан разработанный программный инструмент и показано, что для ff/125<sup>0</sup>C/1.1B ПНТ случая ячейки "Исключающий-ИЛИ" программный инструмент AMR увеличивает точность измерений при максимальном воздействии фазовых

сдвигов на 97% за счет временных потерь 41%, при минимальном воздействии - на 54% за счет временных потерь 6% и при среднем воздействии на 57% за счет временных потерь в 8 раз, по сравнению с методами, игнорирующими фазовые сдвиги входных сигналов ячеек. При проведении измерений разработанными в программном инструменте AMR алгоритмами, максимальные погрешности по отношению к точным измерениям, проведенным при рассмотрении большого количества точек сдвигов, составляют 0.8%, 0.8% и 3.6% для измерения максимального, минимального и среднего результатов, в то время, как измерения проводятся в 27, 36 и 4.7 раза быстрее [4].

6. Испытан разработанный программный инструмент для описания библиотек, содержащих влияние явления метастабильности и показано, что оно сокращает время проведения измерений в 7 раз за счет погрешностей в 1.9% и проектирует синхронизатор, обнаруживающий метастабильные состояния, за счет увеличения площади схемы на 65% [5].

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ավետիսյան 2.U. Սինքրոն ռիկամիկ կամայական րնտրությամբ հիշող սարքում ավտոմատացված գրանցման կ ար գ ավ ո ր մ ան արագության բարձրազմա ն մեթոդ պոլ իտեխնիկական ազգային Յա լաստանի համա սա ոա նհ Լրաբեր.Գիտական հոդվածների ժողովածու.–Մաս 1.–Երևան, 2018. – **E 9** 209-215:

2. Петросян О.А., Аветисян З.М., Мартиросян А.Р. Метод обнаружения метастабильности в синхронизаторах // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. –2018. –№ 2. –С. 56-66.

3. Accuracy increasing approach in aging-aware standard cell libraries / V.Sh. Melikyan, O.H. Petrosyan, Z.M. Avetisyan, S.A. Ghukasyan, H.V. Vardanyan, R.H. Musayelyan and K.T. Hakobyan // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 2019. –Kyiv, Ukraine, 2019. –P. 292-295.

4. Avetisyan Z.M. Phase Shift Consideration Mechanisms in Aging-Aware Standard Cell Libraries // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 2019. –Kyiv, Ukraine, 2019. –P. 296-300.

5. Avetisyan Z.M. Measurement, calculation and analysis of MTBF for single-stage synchronizers using an automated system // Proceedings of the Republic of Armenia National Academy of Sciences and National Polytechnic University of Armenia. –2018. –Vol. 71, № 3. –P. 374-384.

6. Low Power, Low Offset, Area Efficient Comparator Design in Nanoscale CMOS Technology / V.Sh. Melikyan, V.P. Grigoryants, A.Kh. Mkhitaryan, G.A. Petrosyan, A.K. Hayrapetyan, Z.M. Avetisyan, S.H. Gharibyan and N.H. Beglaryan // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), September 14-17, 2018. –Kazan, Russia, 2018. –P. 75-79.

7. **Ավետիսյան 2.Մ.** Փականային մակարդակի նկարագրության մեջ անալոգային և թվային ենթահանգույցների տարբերակման ավտոմատացման համակարգ//Եվրոպական համալսարանգիտական հոդվածների ժողովածու. –Երևան, 2018. – 9. – Էջ 426-433։

8. SDF report generation methodology for digital delay lines without simulations / V.Sh. Melikyan, Z.M. Avetisyan, A.A. Hovsepyan, A.Kh. Mkhitaryan, A.K.

Hayrapetyan, A.A. Petrosyan and A.E. Mkrtchyan // Problems of Advanced Microand Nanoelectronic Systems Development (MES), October 1-5, 2018. –Russia, 2018. –P. 63-68.

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Գերմեծ ինտեգրալ սխեմաների (ԳՄԻՍ) նախագծման և շահագործման կարևորագույն հիմնահարցերից է դրանցում կատարվող ճշգրիտ չափումների իրականացումը՝ սխեմայի աշխատունակությունը գնահատելու և աշխատանքի րնթագքում կարգավորումներ կատարելու համար։ ԳՄԻՍ-ների բարձր արագագործությունը և ցածր էներգասպառումը զբաղեցրած փոքր մակերեսի պայմաններում ապահովելու համար պարբերաբար մասշտաբավորվում են կիսահաղորդչային տեխնոլոգիաները։ Մասշտաբավորման արդյունքում փոքրանում են սխեմաների բնութագրիչ պարամետրերի արժեքները, և եթե չափման համակարգերի սխալանքի բացարձակ արժեքը մնում է անփոփոխ, դրա ազդեցությունը մեծանում է և դառնում անրնդունելի։ Ավելանում են սխեմաների վրա ազդող պարացիտային երևույթների ազդեզությունները, և դրանզ մանրակրկիտ դիտարկումը չափումներ կատարելիս դառնում է առաջնային խնդիր։ ԳՄԻՍ-ների կիրառության ոյորտների կարևորությունը հաշվի առնելով, չափումներ կատարելիս անհրաժեշտ է դիտարկել սարքի հուսալիության վրա ազդող երևուլթները։ Տրանզիստորների հոսքուղու փոքրազումը ստիպում է նախագծման փույում բարձր ճշտությամբ չափել սարքի պարամետրերի փոփոխությունը ծերացման երևույթների ազդեցության ներքո։ Իսկ բարձր ֆունկցիոնալության ապահովման համար կիրառվող բազմասինքրոազդանշանային հանգույզները ստիպում են հաշվի առնել սարքում առաջացող մետակալունության երևույթների ազդեզությունները։ Ատենախոսությունը նվիրված է ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի չափման առկա եղանակների հետազոտմանը և սխեմաների հուսալիության վրա ազդող երևույթների մանրակրկիտ դիտարկման միջոցով ճշգրիտ չափումների ավտոմատազված համակարգի մշակմանը։

1. Հիմնավորվել է ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված համակարգի մշակման անհրաժեշտությունը և առաջարկվել են ժամանակակից պահանջներին բավարարող սկզբունքներ հիմնված՝

- բջիջների ծերացման հենակային ջերմաստիճանային անկայունության և տաք լիցքակրի ներարկման երևույթների միաժամանակյա ազդեցության պարագայում մուտքային ազդանշանների միջև եղած փուլային շեղվածությունների դիտարկման վրա,

- ստանդարտ բջիջների գրադարանների տրիգերների մետակայուն վիճակներով պայմանավորված անխափան աշխատանքի միջին ժամանակահատվածը (ԱԱՄԺ) բնութագրող առաջարկված գործակցի չափումների վրա։

2. Մշակվել՝ է՝ ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ընդհանրացված մեթոդ՝ առաջարկված եղանակների հիման վրա, որի օգտագործումը նախագծողին թույլ կտա բարձրացնել ԳՄԻՍ-ի հուսալիությունը, և ստեղծվել է դրա իրականացման ալգորիթմը։ 3. Մշակվել են ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված միջոցներ, նախատեսված՝

- բջիջների մուտքերի միջև եղած փուլային շեղվածությունների վեց և երեք տարբեր դիրքերում չափումներ կատարելու միջոցով ծերացման առավելագույն և նվազագույն ազդեցություններին համապատասխանող դիրքերի հայտնաբերման և այդ դիրքերում նշված ազդեցությունները պարունակող գրադարանների բնութագրման համար,

- ծերացման ընթացքում բջիջների մուտքերի միջև եղած փուլային շեղվածությունների միջին ազդեցությունները չափելու և այդ ազդեցությունները պարունակող գրադարանների բնութագրման համար՝ հիմնված չափման արդյունքների միջինացման վրա,

- ստանդարտ բջիջների գրադարանի տրիգերների ԱԱՄԺ-ն բնութագրող առաջարկված գործակցի չափումների միջոցով մետակայուն վիճակներով պայմանավորված խափանումների հավանականությունը գնահատելու և գործակցի առավելագույն արժեք ունեցող տրիգերի հիման վրա հուսալի համաժամանակող սխեմայի նախագծման համար, որում մետակայուն վիճակների հայտնաբերման համար մշակվել է նոր սխեմա։

4. Մշակվել է ԳՄԻՍ-ների պարամետրերի բարձր ճշտությամբ չափման ավտոմատացված համակարգ և ստեղծվել է AMR ծրագրային գործիքը՝ ընդհանրացված մեթոդի և դրա իրականացման ալգորիթմի հիման վրա, որը նախագծողին հնարավորություն է տալիս ինտերակտիվ եղանակով կատարել բարձր ճշտությամբ չափումներ ստանդարտ բջիջների գրադարաններում։

5. Փորձարկվել է մշակված ծրագրային գործիքը ծերացման երևույթների ազդեցությունը ներառող գրադարանների բնութագրման համար և ցույց է տրվել, որ «Բացառող ԿԱՄ» բջջի ԱԱ/125<sup>o</sup>C/1.1Վ ՊԼՋ դեպքի համար այն բարձրացնում է չափումների ճշտությունը փուլային շեղվածությունների առավելագույն ազդեցության դեպքում 97%-ով՝ 41% ժամանակային կորստի հաշվին, նվազագույն ազդեցության դեպքում 54%-ով՝ 6% ժամանակային կորստի հաշվին և 57%-ով՝ միջին ազդեցության դեպքում ունենալով 8 անգամ ժամանակային կորուստ բջիջների մուտքային ազդանշանների փուլային շեղվածությունների անտեսման եղանակների հետ համեմատ։ Հավասար քայլերով կատարված ճշգրիտ չափումների նկատմամբ AMR ծրագրային գործիքում ներդրված ալգորիթմներով կատարված չափումների առավելագույն սխալանքները կազմում են 0.8%, 0.8% և 3.6% համապատասխանաբար առավելագույն, նվազագույն և միջին արդյունքների չափման համար, մինչդեռ չափումները կատարվում են 27, 36 և 4.7 անգամ ավելի արագ։

6. Փորձարկվել՝ է՝ մշակված ծրագրային գործիքը՝ մետակայունության երևույթի ազդեցությունը ներառող գրադարանների բնութագրման համար և ցույց է տրվել, որ այն խնայում է չափումների տևողությունը 7 անգամ՝ 1.9% սխալանքի հաշվին և նախագծում է մետակայուն վիճակներ հայտնաբերող համաժամանակող սխեման՝ զբաղեցրած մակերեսի 65% աճի հաշվին։

### ZAVEN MAKAR AVETISYAN DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR MESAURENMENT OF PARAMETERS WITH HIGH ACCURACY FOR CIRCUITS WITH VERY LARGE SCALE INTEGRATION

#### SUMMARY

One of the most important points of design and exploitation of integrated circuits (IC) with very large scale integration (VLSI) is the implementation of accurate measurements. The measurements are necessary to make verifications in VLSI circuits, which will help to estimate the performance of the circuits. Modern requirements of VLSI circuits usage make vital for technological factories to scale semiconductor technologies, which makes possible to provide high performance and low power consumption for the same circuit area.

As a result of semiconductor technology scaling the values of circuits' parameters decrease. If the absolute value of the measuring system's error remains unchanged, its impact on the measurement inaccuracy increases and becomes unacceptable. As a result of technology scaling the impacts of the several parasitic effects on the ICs are being increased, and detailed monitoring of those impacts during measurement process becomes a high priority issue.

Taking into account the importance of VLSI circuits usage spheres, during measurement process it is necessary to observe such parameters and effects that characterize reliability of the circuit and have large impact on it. The decrease of the transistors' channel length makes it necessary to measure the degradation of the circuit parameters, caused by the aging effects, with high accuracy in the design process. Multi-clock domains, which are used to provide greater functionality, make it necessary to consider impacts of metastability phenomena occurring in the circuit.

The dissertation is devoted to the investigation of existing methods and approaches of measuring VLSI parameters and development of an automated system for accurate measurements by precise monitoring of phenomena, which influence reliability of the schemes.

1. The necessity of an automated system development of VLSI parameters measurement with high accuracy is substantiated, and principles that meet modern requirements are proposed, based on:

- the observation of phase shifts between input signals of cells in the case of simultaneous influence of bias temperature instability and hot-carrier injection aging mechanisms;

- the measurements of the proposed coefficient describing mean time between failures (MTBF) of standard cell libraries' flip-flops, which characterizes the probability of metastable states.

2. A generalized method of high-accuracy measurement of VLSI parameters is developed based on the proposed approaches, and its implementation algorithm is created, the usage of which allows the designer to increase the reliability of the developed ICs.

3. Automated techniques for measurements of VLSI parameters with high accuracy are developed, intended to be used for:

- revealing states corresponding to maximum and minimum impacts of input signals' phase shifts during aging, by implementing measurements on six and three different positions of shifts, and for characterization of libraries containing mentioned impacts of aging phenomenon in the revealed positions;

- measurements of the average impact of cells' input signals' phase shift during aging and for characterization of libraries taking into account those impacts, by averaging the measurements results;

- estimation of failures probability caused by metastable states via measurements of the proposed coefficient, which characterizes MTBF of sequential cells of standard cell library, and for reliable synchronizer design based on the flip-flop having higher value of the coefficient. The new circuit is developed for detection of metastable states in the designed synchronizer.

4. An automated system and the AMR software tool are developed to measure VLSI parameters with high accuracy, based on generalized method and its implementation algorithm, which allows the designer to implement high-accuracy measurements in standard cell libraries on interactive mode.

5. The developed software tool is verified and is shown that for XOR cell in  $ff/125^{0}C/1.1V$  PVT corner, compared to approaches that ignore the cells' input signals' phase shifts, in the case of maximum impact of phase shifts, AMR software tool increases the accuracy of measurements by 97% with 41% loss in time. In the case of minimum impact of phase shifts, the accuracy of measurement increases by 54% with 6% loss in time. In the case of average impact of phase shifts, the accuracy of measurement increases by 54% with 6% loss in time. In the case of average impact of phase shifts, the accuracy of measurement increases by 57% with 8 times loss in time. Over accurate measurements implemented by equal-steps, maximum errors of measurements implemented by the developed algorithms in AMR software tool are 0.8%, 0.8% and 3.6% for measuring maximum, minimum and average results, while measurements are made 27, 36 and 4.7 times faster.

6. The developed software tool is verified by characterizing libraries that take into account the impact of metastability phenomenon and it is shown that it economizes the duration of measurements 7 times on account of 1.9% error and designs a synchronizer, which detects metastable states and has a 65% increase in circuit's occupied area.

galf