

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Խաչիկյան Կարեն Տիգրանի

ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐՈՒՄ ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ՄԻՋԱՆՑԻԿՈՒԹՅԱՆ ԿԱՐԳԱԲԵՐՄԱՆ
ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ե.27.01 «Էլեկտրոնիկա, միկրո և նանոէլեկտրոնիկա» մասնագիտությամբ տեխնիկական
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՄԵՂՍԱԳԻՐ

Երևան 2021

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И
СПОРТА РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
АРМЕНИИ

Хачикян Карен Тигранович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ
КОРРЕКТИРОВКИ СКВАЖНОСТИ СИГНАЛОВ В
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 05.27.01-
“Электроника, микро- и наноэлектроника”

Ереван 2021

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում (ՀԱՊՀ):

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ. Վազգեն Շավարշի Մելիքյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Սուրիկ Խաչիկի Խուդավերդյան,
տ.գ.թ. Կարո Հրաչիկի Սաֆարյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և
Էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2021թ. հունիսի 30-ին, ժամը 14⁰⁰-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046 Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք) :

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2021թ. հունիսի 17-ին:

046 Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.

Բենիամին Ֆելիքսի
Բադալյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете Армении (НПУА)

Научный руководитель: д.т.н. Вазген Шаваршович Меликян

Официальные оппоненты: д.т.н. Сурик Хачикович Худавердян,
к.т.н. Каро Грачикович Сафарян

Ведущая организация: Институт радиофизики и электроники
НАН Армении

Защита диссертации состоится 30-го июля 2021г. в 14⁰⁰ ч. на заседании
Специализированного совета 046 — "Радиотехники и электроники",
действующего при НПУА, по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.
Автореферат разослан 17-го июня 2021 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета 046,
к.т.н.

Бениамин
Феликсович Бадалян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С развитием современных интегральных схем (ИС) скорости передачи и чтения данных увеличиваются, что делает обработку данных весьма сложной задачей. Процесс обработки данных осуществляется через узлы ввода/вывода (В/В), которые соединены между собой линией передачи. Эти линии подавляют амплитуду передаваемых сигналов и ограничивают их скорость. Из-за линий передач, могут возникнуть отражения волн, которые искажают сигнал и значительно снижают его надежность. С другой стороны, используемые в настоящее время узлы В/В имеют много разных типов, каждый из которых имеет свое приложение, что, в свою очередь, является причиной разных напряжений питания и рабочих частот, которые усложняют процесс чтения и передачи данных.

Современные ИС наиболее чувствительны к изменениям технологических процессов, напряжения питания и температуры (ПНТ). Во время упомянутых процессов характеристики узлов В/В изменяются и влияют на качество передаваемых данных. В указанных условиях обработка данных представляет собой чрезвычайно сложный процесс и часто может вызывать сбои в системах, что является серьезной проблемой для современных ИС, работающих в очень чувствительной среде требующих высокой надежности чтения и передачи данных.

Способы повышения надежности сигналов и уменьшения внешних воздействий известны из литературы, но они не соответствуют современным требованиям ИС. Последние корректируют отклонения сигналов перед процессом их передачи и считывания. При этом не учитываются отклонения, возникающие при передаче сигнала, что значительно снижает надежность системы.

Системы корректировки скважности сигналов позволяют нейтрализовать отклонения данных при их обработке. Эти системы регулируют асимметрию фронтов, коэффициент заполнения и другие временные параметры сигналов. Они также повышают надежность высокочастотных данных в узлах В/В за счет увеличения потребления энергии системы и ее площади.

Таким образом, разработка средств корректировки скважности сигналов в ИС является чрезвычайно актуальной задачей. Это обусловлено тем, что известные в литературе методы и решения не соответствуют современным требованиям практического проектирования с точки зрения эффективности, что диктует необходимость создания новых инструментов для решения описанных проблем.

Диссертация посвящена разработке средств корректировки скважности сигналов в ИС, которые позволят нейтрализовать отклонения, вызванные передачей и чтением данных и повысить надежность узлов В/В.

Объект исследования. Устранение проблем в узлах В/В с помощью систем корректировки скважности сигналов. Возможные способы уменьшения внешних воздействий и повышения надежности считываемых и передаваемых сигналов в ИС.

Цель работы. Разработка принципов, систем и программного обеспечения (ПО) для увеличения скоростей считывания и повышения надежности передаваемых данных с использованием систем корректировки скважности сигналов.

Методы исследования. В ходе исследования были изучены подходы к разработке аналоговых схем, принципы моделирования узлов В/В, подходы схемотехнического проектирования и оптимизации узлов В/В, теория полупроводниковых устройств, а также объектно-ориентированные принципы программной реализации.

Научная новизна:

- Предложены принципы разработки средств корректировки скважности сигналов в интегральных микросхемах, позволяющие существенно улучшить их основные технические характеристики и параметры, такие как скорость передачи данных, надежность обработки данных, энергопотребление и др.
- Разработана система обнаружения и саморегулирования отклонений коэффициента заполнения сигналов, которая позволяет значительно повысить надежность данных за счет использования цифровых узлов. Система регулирует коэффициент заполнения с точностью до 0,5% за счет увеличения энергопотребления приемного узла всего на 3,95 МВт.
- Создана система повышения надёжности передачи высокочастотных данных в узле передатчика, которая позволяет путем снабжения подузла преобразователя напряжения (ПН) дополнительным током регулировать отклонение коэффициента заполнения на 39,5%, а также снизить дрожание фронтов сигнала в два раза за счет увеличения площади высокочастотного преобразователя напряжения на 12%.
- Разработана система регулирования асимметрии фронтов высокочастотных сигналов, которая позволяет существенно снизить влияние изменений ПНТ, в результате чего асимметрия

фронтов регулируется до 1,2%, колебания и дрожание фронтов сигналов уменьшаются за счет увеличения тока на 2,26 мА в узле предварительного буфера (ПБ).

- Реализована система коррекции искажения передаваемых сигналов для уменьшения воздействия линии передачи, которая позволяет увеличить скорости фронтов сигналов на 50%, а так же горизонтальные и вертикальные апертюры "глазковой" диаграммы соответственно на 13% и 10%, в результате чего дрожание фронтов снижается на 20,7% за счет увеличения площади выходного буфера на 13%.

Практическая ценность работы. Основываясь на принципах и методах, предложенных в диссертации, был разработан программный инструмент I/O Optimizer для реализации систем коррекции сигналов в интегральных схемах, который внедрен в ООО «Экспер» и используется в схемотехническом проектировании узлов В/В. Эксперименты, проведенные с использованием созданного ПО показали, что время проектирования ИС сокращается в среднем на 44%, максимум - на 84%, за счет ухудшения основных параметров узлов В/В всего на 5,6%.

Достоверность научных положений подтверждена сравнением полученных научных результатов с экспериментальными результатами моделирования, представленными в диссертации.

Внедрение. Программный инструмент I/O Optimizer внедрен и используется ООО «Экспер». Он предназначен для регулирования параметров узлов и В/В во время схемотехнического проектирования ИС.

Основные положения, выносимые на защиту:

- метод обнаружения и саморегулирования отклонений коэффициента заполнения сигналов;
- метод повышения надежности высокочастотных данных в подузлах передатчика;
- метод регулирования асимметрии высокочастотных сигналов;
- метод коррекции искажений передаваемого сигнала.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертации докладывались на:

- 36-ом Международном симпозиуме "ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY" (Киев, Украина, 2016 г.);
- 25-й Международной конференции "IEEE Scientific Conference Electronics (ET)" (Созополь, Болгария, 2016 г.);
- 37-ом Международном симпозиуме "ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY" (Киев, Украина, 2017 г.);
- Международном симпозиуме 2018 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI)" (Гонконг, 2018 г.);
- научных семинарах кафедры "Микроэлектронные схемы и системы" НПУА (Ереван, Армения, 2018-2021 гг.);
- научных семинарах ЗАО "Синописис Армения" (Ереван, Армения, 2018 - 2021 гг.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в девяти научных трудах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 115 наименований а также 5 приложений. Первое приложение включает в себя акт внедрения диссертации, второе – отрывок Hspice описания узла передатчика, третье - часть QT описания инструмента I/O Optimizer, четвертое - список рисунков и таблиц, используемых в диссертации, и пятое - список сокращений. Основной текст диссертации составляет 115 страниц, а вместе с приложениями - 154 страницу. Диссертация написана на армянском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна, практическая значимость и основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены современные требования к узлам В/В, такие как быстродействие, надежность данных. Это вызвано увеличением скоростей передачи и чтения данных, а также трудностями обработки данных при высоких частотах.

В современных узлах В/В скорость передачи данных может достигать несколько Гбит/с, что значительно затрудняет процесс обработки данных. Например, в узлах двойной передачи данных 5-го поколения (DDR5) скорость составляет 6,4 Гбит/с, в этом случае обработка данных представляет собой весьма трудную задачу. Помимо этого, наличие линий передач в узлах В/В, в свою очередь, усложняет этот процесс. Линия передачи содержит емкостные и индуктивные компоненты, которые

действуют как низкочастотный фильтр, и из-за этого подавляется амплитуда сигнала, вызывая искажения. Для считывания таких сигналов требуются специальные методы, использование которых нейтрализует искажения и позволит считывать данные без потерь. Для компаний, проектирующих микросхемы, важнейшей задачей является разработка точных методов передачи и чтения данных, которые могут применяться к большому количеству типов В/В, а также нейтрализовать искажения, вызванные во время обработки данных.

Современные системы коррекции скважности сигналов в основном состоят из элементов В/В, которые служат для улучшения качества передачи и чтения данных. Основными компонентами упомянутых элементов В/В являются передатчик и приемник (рис. 1).

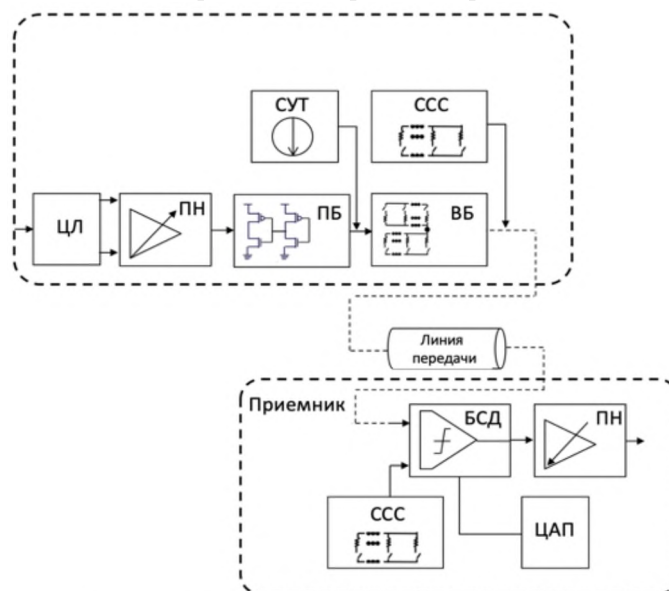


Рис. 1. Архитектура узла ввода/вывода

Данные, передаваемые из ядра, предварительно обрабатываются в узле цифровой логики (ЦЛ). Последний подает управляющие сигналы, определяет режим работы элемента В/В, а также отправляет сигналы, характеризующие состояние напряжения питания системы и входного сигнала. Поскольку значения напряжения питания в ядре и вне его разные, используется ПН. Проходя через входной узел, данные передаются в выходной буфер (ВБ), который подключен к линии передачи. ВБ содержит буферы высокой мощности, подключенные параллельно, что позволяет максимально снизить потерю данных. Поскольку ВБ имеет большую входную емкость, передаваемые данные заранее усиливаются через предварительный буфер. ПБ состоит из буферов, подключенных к системе управления током (СУТ). Последний направляет дополнительный ток в ПБ, в результате чего становится возможным управление скоростями фронтов передаваемых данных. Важно отметить, что во избежание искажения передаваемых сигналов необходимо, чтобы выходное сопротивление передатчика, волновое сопротивление и входное сопротивление приемника были согласованы. Однако сопротивления трудно согласовать в случае отклонений ПНТ, в результате чего значения сопротивлений на выходе передатчика и на входе приемника изменяются, вызывая волновые отражения и снижая точность передачи данных. Система соответствия сопротивлений (ССС) используется для нейтрализации влияния отклонений ПНТ, что позволяет сохранять значения резисторов на выходе передатчика и на входе приемника неизменными. СССР сравнивает значение высокоточного ($\pm 2\%$ точности) резистора вне ИС с выходным сопротивлением передатчика, которое изменяется в зависимости от колебаний ПНТ. При обнаружении отклонений подключаются или отключаются несколько из буферов ВБ, в результате чего значение выходного сопротивления изменяется. Выполняя этот процесс, можно достичь целевого значения сопротивления.

Во второй главе представлены методы решения проблем, изложенных в первой главе.

Система обнаружения и саморегулирования отклонений коэффициента заполнения сигналов. Как упоминалось в предыдущей главе, отклонения коэффициента заполнения сигнала в узле приемника могут снизить надежность считываемых данных, что, в свою очередь приведет к сбоям системы. Одним из основных факторов этих сбоев являются отклонения ПНТ, которые могут возникнуть как до, так и во время передачи сигнала. Однако в настоящее время применяемые системы регулировки коэффициента заполнения в основном используются до процесса передачи сигнала. Поэтому отклонения, возникающие при передаче сигнала (рис. 2), не учитываются, в результате чего надежность системы значительно снижается.

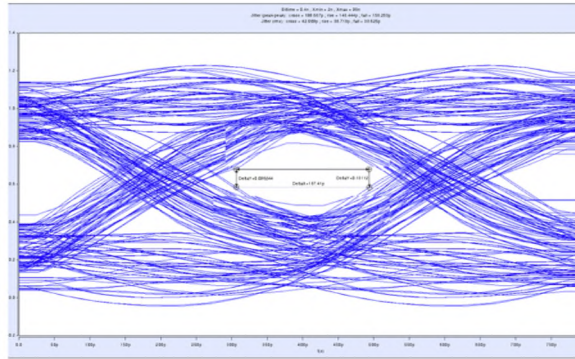


Рис. 2. Отклонения сигналов, возникающие во время передачи данных

Предлагаемая система регулировки коэффициента заполнения сигналов обнаруживает отклонения и регулирует их в течение всей работы элемента В/В. Основными компонентами разработанной системы регулировки (рис. 3) являются RC-интегратор, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), блок распределения эталонного напряжения (РЭН), аналоговый мультиплексор, а также узел ЦА. Следует отметить, что такая структура позволяет не прерывать процесс передачи и параллельно с этим регулировать коэффициент заполнения, нейтрализуя отклонения ПНТ и другие причины искажения сигналов. Цель использования RC-интегратора состоит в том, чтобы получить фиксированный уровень напряжения амплитуды сигнала, который соответствует значению коэффициента заполнения. Таким образом, можно получить значение коэффициента заполнения сигнала и обнаружить его отклонения. Например, в результате интеграции сигнала с амплитудой 1В и коэффициентом заполнения 50% постоянный уровень сигнала будет равен 50%, а при коэффициенте заполнения 40% уровень сигнала будет 0,4 В.

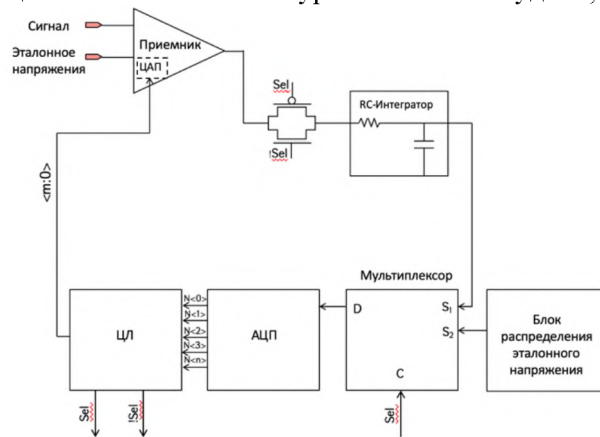


Рис. 3. Архитектура предлагаемой системы регулировки коэффициента заполнения сигналов

Для оценки эффективности предлагаемой системы был разработан высокочастотный приемник, а также проведено моделирование системы в 27-и отклонениях ПНТ. Передаваемый сигнал со скоростью 2133 МГц предварительно имел отклонение коэффициента заполнения на 15% (рис. 4).

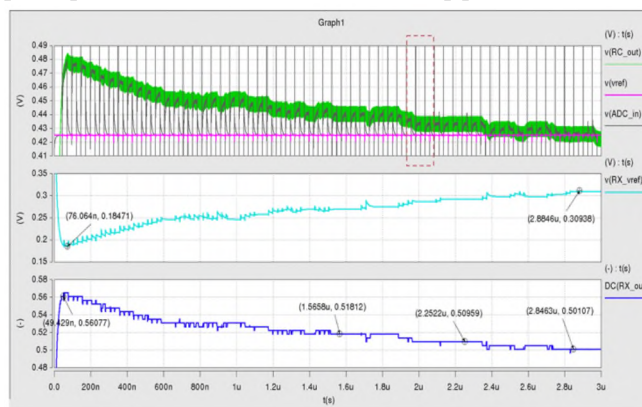


Рис. 4. Процесс регулирование коэффициента заполнения сигнала

Результаты моделирования показывают, что система регулирует коэффициент заполнения сигнала в течение 3 мкс, доводя его значение с точностью до 50,1%. Можно заметить, что уже через 1 мкс было зарегистрировано значительное улучшение коэффициента заполнения. В частности, на момент 1,55 мкс его значение составляло 51,8%, а на одну микросекунду позже - 50,9%. Моделирование показало, что предлагаемая система может эффективно работать в разных условиях ПНТ (табл. 1). В худшем случае система регулирует коэффициент заполнения, доводя его значение с точностью до 50,5%.

Таблица 1

Результаты моделирования предлагаемой системы

Параметр	Существующая система	Предложенная система
Точность регулирования (%)	2	0,5
Диапазон регулирования (%)	25...75	40...60
Частота сигнала (ГГц)	2	2,1
Технологический процесс (нм)	45	28
Напряжение питания (В)	0,9...1,4	0,8...0,9

Таким образом, с использованием предлагаемой системы можно значительно улучшить надежность данных и регулировать коэффициент заполнения с точностью до 0,5%. Однако в результате введения системы энергопотребление узла приемника увеличится и в худшем случае составит 3,95 мВт.

Система повышения надежности высокочастотных данных в подузлах передатчика. Как уже упоминалось, в результате увеличения скоростей передачи данных входная емкость подузлов ИС начинает значительно подавлять передаваемый сигнал. Вот почему в высокочастотных ПН входной сигнал применяется к стоку металл-оксид-полупроводник (МОП) транзистора (рис. 5), чтобы уменьшить воздействие входной емкости.

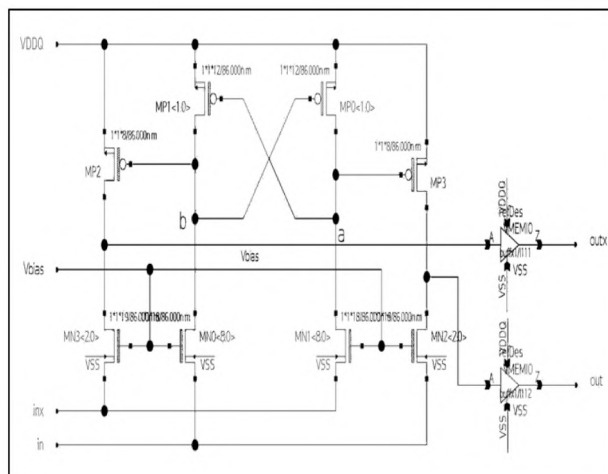


Рис. 5. Архитектура высокочастотного преобразователя напряжения

В результате использования этой архитектуры возникают искажения передаваемого сигнала, в частности, образуются ступенчатообразные участки на фронтах сигналов. Эти искажения значительно снижают надежность передаваемых данных и оказывает негативное влияние на их временные параметры. Стоит отметить, что высокочастотные ПН применяются почти во всех узлах В/В.

Таким образом, была создана новая архитектура высокочастотного ПН (рис. 6), в которую была внедрена система коррекции фронтов сигналов, что позволяет исправлять отклонения коэффициента заполнения, а также восстанавливать скорости фронтов сигналов.

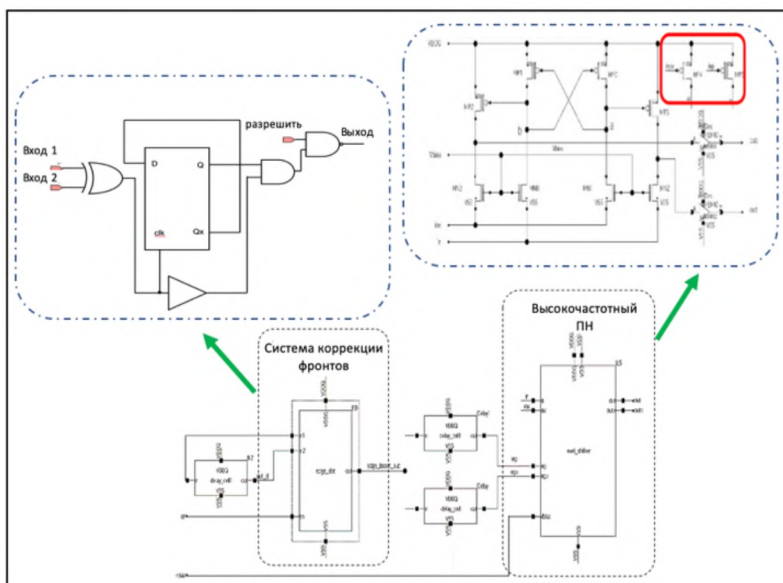


Рис.6. Архитектура высокочастотного преобразователя напряжения

Система коррекции фронтов сигналов была реализована с использованием логического вентиля «Исключающее ИЛИ». К одному из входов вентиль применяется передаваемый сигнал, а к другому тот же сигнал, но с задержкой. Таким образом, вентиль «Исключающее ИЛИ» генерирует новый сигнал во время разницы во входах. Этот сигнал информирует о переключениях входного сигнала, в течение которых система должна усилить фронты передаваемых данных. Поскольку система реализована через цифровые логические элементы, она занимает небольшую площадь.

Для измерения эффективности предлагаемой системы был спроектирован высокочастотный ПН, а также проведено моделирование системы в случае 27-и отклонений ПНТ. Измерения выполнялись для двух случаев: когда предлагаемая система подключена и когда она выключена (табл. 2).

Таблица 2

Результаты моделирования предлагаемой системы

Параметр	Существующая система	Предложенная система
Коэффициент заполнения (%)	51,1	50,2
Дрожание фронтов (пс)	2,5	0,5

Можно заметить, что в случае применения системы дрожание фронтов выходного сигнала значительно снизилось. Система также регулировала коэффициент заполнения сигнала. В частности, когда система была отключена, коэффициент заполнения варьировался с точностью от 48,7 до 51,1%, а с использованием системы диапазон вариаций значительно уменьшился, достигая 49,55...50,5% (рис. 7).

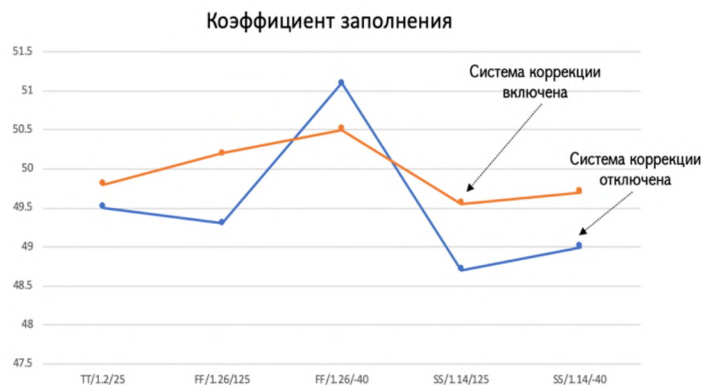


Рис. 7. Значения коэффициента заполнения в разных случаях ПНТ

Таким образом, разработанная система повышения надежности высокочастотных данных значительно улучшает временные параметры передаваемого сигнала. Моделирование предлагаемой системы показало, что она регулирует отклонения коэффициента заполнения на 39,5%, а также уменьшает дрожание фронтов примерно в два раза. При этом поверхность высокочастотного ПН в узле передатчика увеличивается на 12%.

Система регулировки асимметрии высокочастотных сигналов. Как уже упоминалось в предыдущей главе, при увеличении скоростей передачи данных обработка данных представляет собой очень сложную задачу. Основными источниками асимметрии сигналов являются отклонения ПНТ, флуктуации напряжения, а также шумы в системе, которые значительно уменьшают надежность узлов В/В. Для устранения асимметрии сигналов используются системы управления током, которые усиливают фронты сигналов в узле ПБ. Нынешние системы корректируют отклонения сигналов перед процессом передачи данных, но отклонения могут возникнуть во время работы узла В/В.

Предложенная система регулировки асимметрии предложенных фронтов сигналов позволяет корректировать отклонения на протяжении всей работы передатчика (рис. 8). В системе передаваемые данные разделяются на две ветви, одна из которых присоединяется к системе управления током, а другая - к предварительному буферу.

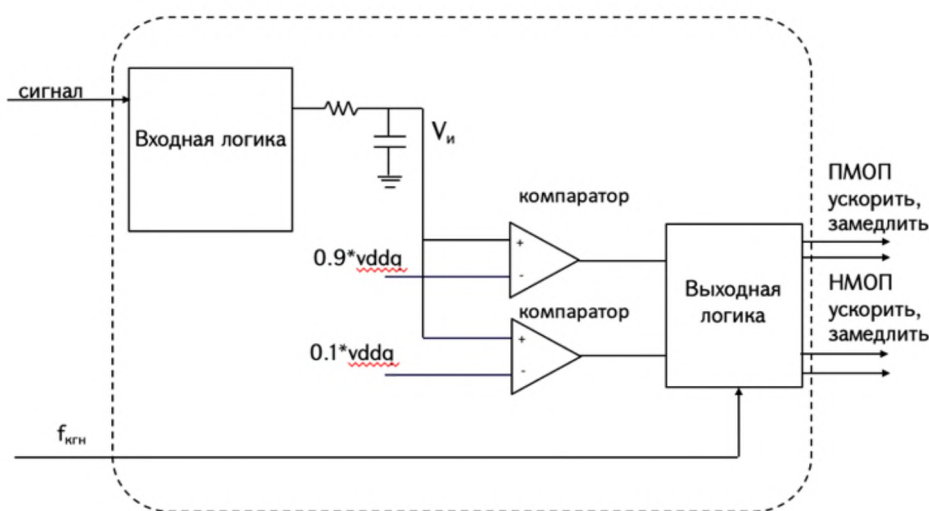


Рис.8. Архитектура предлагаемой системы регулировки асимметрии сигналов

Данная структура позволяет не прерывать передачу данных и осуществлять корректировку сигналов во время работы узла В/В. Целью системы является обнаружение диспропорций фронтов сигналов во время передачи данных, после чего она направляет дополнительный ток в узел В/В, в результате чего происходит корректирование. Следует отметить, что отклонения могут возникнуть в случае передних и задних фронтов сигнала. Поэтому система перед корректированием обнаруживает направление отклонений и усиливает соответствующие выходные транзисторы НМОП или ПМОП в предварительном буфере. Блок входной логики отделяет один период сигнала, который затем обрабатывается для расчета скоростей фронтов. Поскольку скорости фронтов очень высокие, то они заранее замедляются с помощью RC-интегратора. Замедленные сигналы сравниваются в двух компараторах, один из которых имеет входное эталонное напряжение $90\% \cdot v_{ddq}$, а другой - $10\% \cdot v_{ddq}$. Таким образом, на выходе компаратора образуется новый сигнал который оповещает о начале и конце переключения входящего сигнала. Этот сигнал подается в логический узел, который рассчитывает продолжительность передних и задних фронтов и соответственно образует сигналы ускорения или замедления. Последние выключают или соединяют выходные транзисторы в ПБ, результате чего скорости фронтов меняются.

Для оценки эффективности системы был спроектирован высокочастотный передатчик, а также проведено моделирование системы с применением сигнала, соответствующего LPPDR4 стандарту, в случае 27-и отклонений ПНТ. При этом фронты входящего сигнала заранее были смещены для имитирования реальных условий работы системы. Моделирование показало, что с помощью предлагаемой системы в течение трех периодов сигнала диспропорции фронтов были скорректированы (рис. 9). Следует отметить, что система не зависит от направления отклонений, и во время ее работы процесс передачи данных не прерывается.

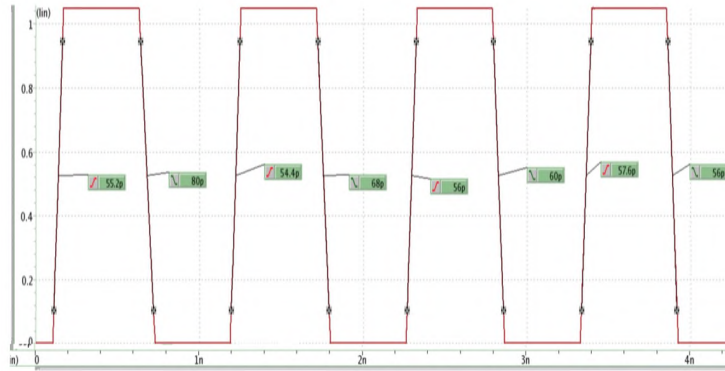


Рис.9. Процесс регулировки асимметрии фронтов сигналов

Время регулировки фронтов сигналов отличается в разных случаях ПНТ, но даже в худшем случае оно не превышает 5 периодов. Полученные результаты были сравнены с системами регулировки, которые используются в настоящее время (табл. 3).

Таблица 3

Результаты моделирования системы регулирования фронтов сигналов

Параметр	Существующая система	Предложенная система
Точность регулирования (%)	1,2	3,4
Скорость передачи данных (Мбит/с)	500	2133
Технологический процесс (мкм)	0,18	0,032

Таким образом, разработанная система регулировки асимметрии фронтов высокочастотных сигналов существенно снижает влияние изменений ПНТ, в результате чего асимметрия фронтов регулируется с точностью до 1,2%, а также уменьшаются колебания и дрожание фронтов сигналов за счет увеличения тока на 2,26 мА в узле ПБ.

Система коррекции искажений передаваемого сигнала. Как упоминалось в предыдущей главе, линия передачи значительно подавляет передаваемый сигнал, вызывая потери данных (рис. 10). Следует отметить, что даже в случае согласованной линии она уменьшает амплитуду, а также замедляет скорость передаваемых сигналов.

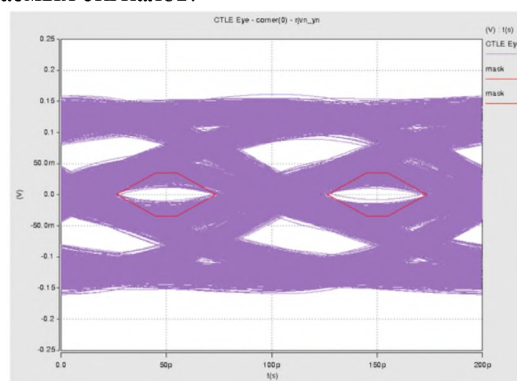


Рис.10. Подавление сигнала из-за линии передачи

Предлагаемая система подает дополнительный ток в выходные буферы, вследствие чего улучшаются скорости фронтов сигналов, и становится возможным нейтрализовать потери, вызванные из-за линии передачи. Разработанная система может применяться в высокочастотных узлах В/В, а также не прерывает процесс передачи данных в узле передатчика (рис. 11). Для

проведения коррекции искажений сигналов и улучшения скорости фронтов система была реализована с использованием логического вентиля «Исключающее ИЛИ». Последний расположен в узле передатчика и во время передачи информации усиливает выходной сигнал.

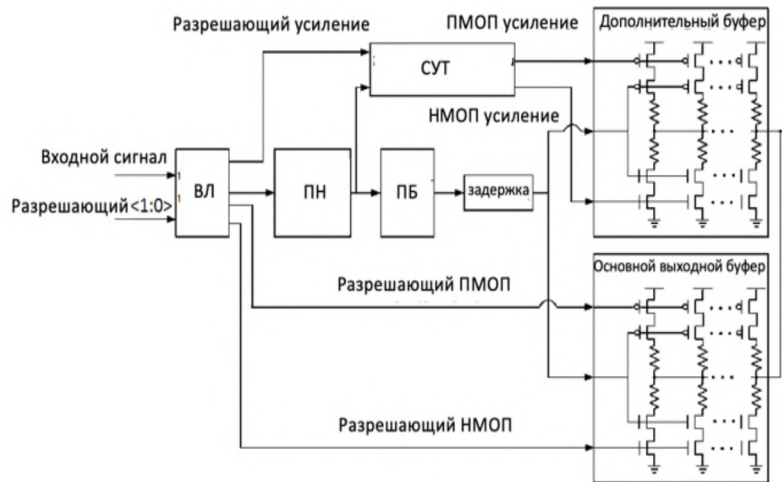


Рис.11. Системы коррекции фронтов сигналов в узле В/В

К одному из входов вентиля «Исключающее ИЛИ» подключается передаваемый сигнал, а к другому - тот же сигнал, но с задержкой (рис. 12). В результате вентиль «Исключающее ИЛИ» генерирует импульсный сигнал во время фронтов передаваемого сигнала. Этот сигнал подключается к D-триггеру, который делит его частоту в два раза. Впоследствии формируются два сигнала: ПМОП усиление и НМОП усиление, с помощью которых во время переключений сигнала дополнительный ток подается в узел выходного буфера.

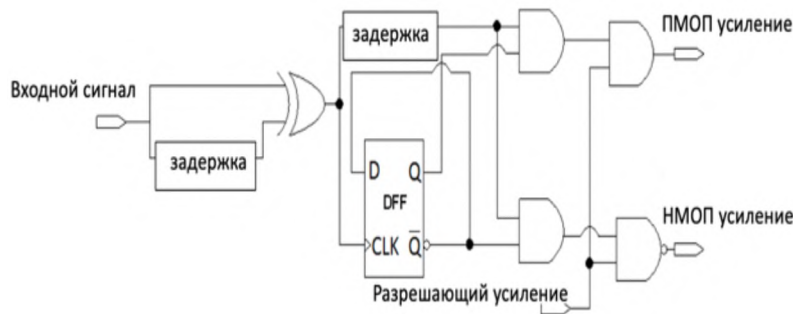


Рис.12. Архитектура предлагаемой системы коррекции фронтов сигналов

Для оценки эффективности предлагаемой системы был спроектирован высокочастотный передатчик с использованием 32/28нм технологического процесса, а также проведено моделирование системы в случае основных отклонений ПНТ, во время которых входной сигнал соответствовал стандарту LPDDR4. В результате использования системы скорость фронтов входного сигнала резко возрастает, и его амплитуда приближается к целевому напряжению (рис. 13).

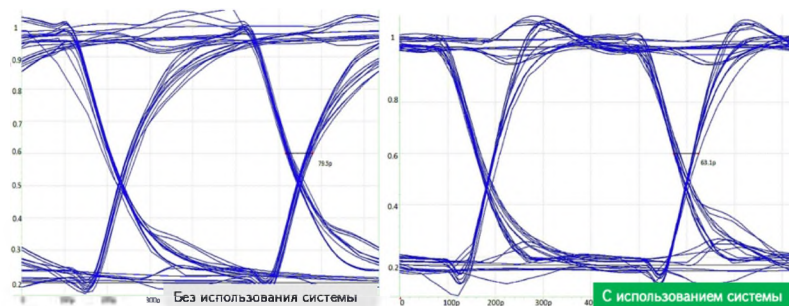


Рис.13. Коррекция искажений сигнала с помощью предлагаемой системы

Также были выполнены измерения дрожания фронтов, которые показали, что в результате использования системы регулирования фронтов сигналов вибрации и другие временные параметры передаваемого сигнала значительно уменьшаются (табл. 4).

Результаты моделирования системы регулирования фронтов сигналов

Параметр	Существующая система	Предложенная система
Дрожание фронтов (%)	48,7	35,7
Скорость переднего фронта (В/нс)	3,13	6,81
Скорость заднего фронта (В/нс)	3,03	6,48

Таким образом, реализованная система коррекции искажения передаваемых сигналов увеличивает скорости фронтов на 50%, а также горизонтальные и вертикальные аперттуры "глазковой" диаграммы соответственно на 13% и 10%, в результате чего дрожание фронтов снижается на 20,7% за счет увеличения площади выходного буфера на 13%.

В третьей главе представлено разработанное программное обеспечение для реализации предлагаемых способов и систем корректировки скважности сигналов в ИС. ПО обеспечивает широкие возможности для исследования узлов В/В, содержит различные системы для регулировки параметров, характеризующих узлы В/В, а также имеет удобный и современный интерфейс.

ПО I/O Optimizer дает возможность реализовать различные исследования сигналов в узлах передатчика и приемника, а впоследствии внедрять системы регулирования в узлы В/В, что значительно упрощает процесс проектирования.

Главное окно (рис. 14) ПО содержит следующие разделы:

1. File – раздел для доступа к проектам.
2. Edit – раздел редактирования.
3. View – раздел для визуализации.
4. Help – информационный раздел.
5. Get Started – Кнопка запуска ПО

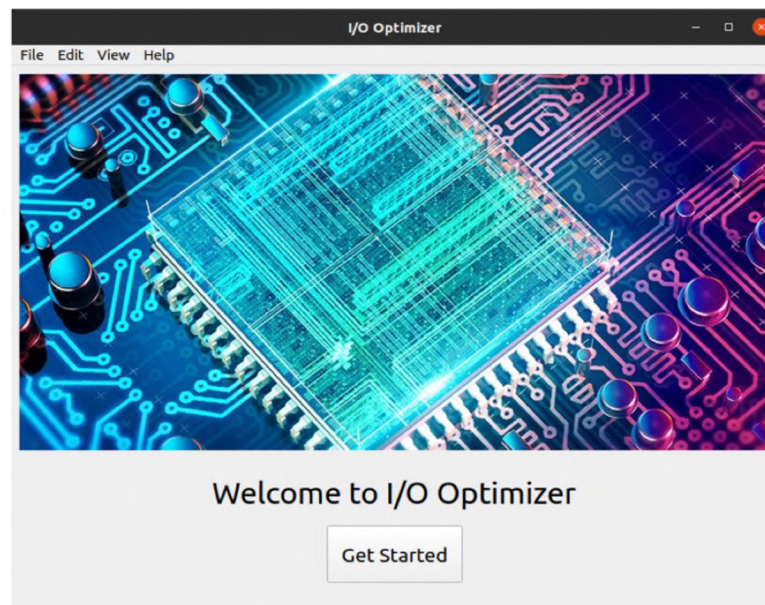


Рис. 14. Главное окно ПО I/O Optimizer

После загрузки проекта разделы Top Level, Circuit, Release становятся доступными, с использованием которых можно выбрать категорию проекта и узлы В/В (рис. 15). Раздел Optimization Settings позволяет применять существующие системы регулирования, а также выполнять различные исследования с использованием выбранного узла В/В. Раздел Control panel состоит из следующих полей: Start/Stop Simulation, Plot Visualization, Run Optimization, Extract Netlist, Job Monitor, с помощью которых можно запустить процесс моделирования, визуализировать полученные сигналы или применять системы регулирования.

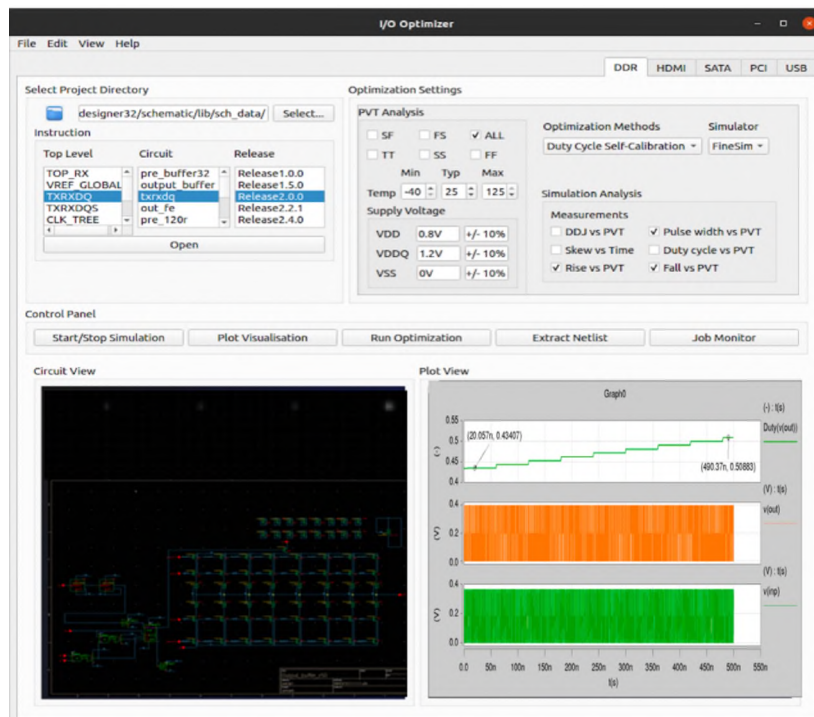


Рис. 15. Разделы и категории ПО I/O Optimizer

Таким образом, тестирование ПО I/O Optimizer, разработанного для корректировки скважности сигналов в ИС на ряде реальных проектов, показало его значительную эффективность по сравнению с другими используемыми в настоящее время системами. Эксперименты показали, что с использованием ПО I/O Optimizer время проектирования в ИС сокращается в среднем на 44%, максимум - на 84%, за счет ухудшения основных параметров узлов В/В всего на 5,6%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Предложены принципы разработки средств корректировки скважности сигналов в интегральных микросхемах, позволяющие существенно улучшить их основные технические характеристики и параметры, такие как скорость передачи данных, надежность обработки данных, энергопотребление и др. [1-9].
2. Разработана система обнаружения и саморегулирования отклонений коэффициента заполнения сигналов, которая позволяет значительно повысить надежность данных за счет использования цифровых узлов. Система регулирует коэффициент заполнения с точностью до 0,5% за счет увеличения энергопотребления приемного узла всего на 3,95 МВт [1].
3. Создана система повышения надёжности передачи высокочастотных данных в узле передатчика, которая позволяет путем снабжения подулза преобразователя напряжения дополнительным током регулировать отклонение коэффициента заполнения на 39,5%, а также снизить дрожание фронтов сигнала в два раза за счет увеличения площади высокочастотного преобразователя напряжения на 12% [2].
4. Разработана система регулирования асимметрии фронтов высокочастотных сигналов, которая позволяет существенно снизить влияние изменений технологических процессов, напряжения питания и температуры, в результате чего асимметрия фронтов регулируется с точностью до 1,2%, а также уменьшаются колебания и дрожание фронтов сигналов за счет увеличения тока на 2,26 мА в узле предварительного буфера [3].
5. Реализована система коррекции искажений передаваемых сигналов для уменьшения воздействия линии передачи, которая позволяет увеличить скорости фронтов сигналов на 50%, также горизонтальные и вертикальные апертуры "глазковой" диаграммы соответственно на 13% и 10%, в результате чего дрожание фронтов снижается на 20,7% за счет увеличения площади выходного буфера на 13% [4].
6. На основе принципов и методов, предложенных в диссертации, был разработан программный инструмент I/O Optimizer для реализации систем коррекции сигналов в интегральных схемах, который внедрен в ООО «Экспер» и используется в

схемотехническом проектировании узлов В/В. Эксперименты проведенные с использованием созданного программного обеспечения, показали, что время проектирования интегральных схем сокращается в среднем на 44%, максимум в на 84%, за счет ухудшения основных параметров узлов В/В всего на 5,6% [1-9].

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Khachikyan K., Balabanyan A., Gumroyan H. Precise Duty Cycle Variation Detection and Self-Calibration System for High-Speed Data Links // IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI--2018). –2018. – P. 191-196.
2. Melikyan V., Khachikyan K., Msryan L., Mkrtchyan A. High speed, low-jitter level shifter for high speed ICs // IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2017). –2017. – P. 175-177.
3. Խաչիկյան Վ.Տ. Ազդանշանի ճակատների անհամաչափության կարգաբերման համակարգ // Հայաստանի գիտությունների ազգային ակադեմիայի և Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա. – 2021. – Հ. 73, No 4. – Էջ 408–415:
4. Melikyan V., Trdatyan A., Khachikyan K., Durgaryan A. Design of edge boosting digital control circuit for high-speed ICs // IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2016). – 2016. – P. 315 – 318.
5. High quality factor 5.0 Gbps CTLE circuit for SERDES serial links / V. Melikyan, K. Khachikyan, A. Trdatyan, A. Petrosyan, A. Martirosyan // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Sep. 14, 2018. –Kazan, Russia, 2018. –P. 641–644.
6. Process Variation Detection and Self-Calibration Method for High-Speed Serial Links / V. Melikyan, K. Khachikyan, A. Sahakyan, A. Martirosyan, et al // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS-2018), Sep. 14, 2018. - Kazan, Russia, 2018. – P. 681 – 684.
7. Khachikyan K., Balabanyan A., Petrosyan A. PLL control voltage stabilization method for high-speed systems // 2016 XXV International Scientific Conference Electronics (ET-2016). –2016. – P. 1-4.
8. Khachikyan K., Msryan L., Balabanyan A., Tshshmarityan A. Research of PVT variation influence on PLL system and methodology of control voltage stabilization // IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2017). – 2017. – P. 190-193.
9. Crystal Area Reduction Method for Impedance Matching Systems in High-Speed Data Links / V. Melikyan, K. Khachikyan, H. Gumroyan, A. Babayan, et al. // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2019. – Т. 24, – №. 5. – P. 503-510.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ժամանակակից ինտեգրալ սխեմաներում (ԻՄ) տվյալների մշակման արագությունները զգալիորեն աճում են, ինչի արդյունքում բարդ է դառնում տվյալների փոխանցման և ընթերցման գործընթացը: ԻՄ-երում տվյալները մշակվում են մուտք/ելք (Մ/Ե) հանգույցների միջոցով: Դրանք միմյանց միացված են փոխանցման գծերով, որոնք կարող են առաջացնել տվյալների կորուստներ, ճնշել ազդանշանը և զգալիորեն սահմանափակել դրա մշակման ազարագությունը:

Փոխանցման գծերը առաջացնում են նաև ալիքային անդրադարձումներ, որոնք աղավաղում են տվյալը և նվազեցնում համակարգի հուսալիությունը: Ժամանակակից ԻՄ-երը նաև ավելի զգայուն են տեխնոլոգիական գործընթացի, սնման լարումների և ջերմաստիճանի (ԳԼՋ) շեղումների նկատմամբ: Դրանց դեպքում Մ/Ե հանգույցների պարամետրերը շեղվում են և նվազում է տվյալների մշակման հուսալիությունը: Վերջիններիս առկայության դեպքում չափազանց բարդ է ազդանշանների մշակումը և հաճախ կարող է առաջացնել տվյալների կորուստներ, ինչը կարևորագույն խնդիր է ժամանակակից ԻՄ-երում:

Ներկայումս կիրառվող ազդանշանի հուսալիության մեծացման և արտաքին ազդեցությունների նվազեցման համակարգերը չեն բավարարում ԻՄ-երում առկա ժամանակակից պահանջները: Դրանք ազդանշանի շեղումների կարգաբերումն իրականացնում են մինչև դրա փոխանցման և ընթերցման գործընթացը: Դրա հետևանքով հաշվի չեն առնվում ազդանշանի փոխանցման ընթացքում առաջացած աղավաղումները, ինչի արդյունքում նվազում է համակարգի ճշտությունը:

Ազդանշանների միջանցիկության կարգաբերման համակարգերը թույլ են տալիս չեզոքացնել տվյալի շեղումները դրա փոխանցման և ընթերցման ընթացում: Դրանք իրականացնում են նաև լցման գործակցի, ազդանշանի ճակատների անհամաչափությունների և այլ ժամանակային պարամետրերի կարգաբերում:

Այսպիսով, ԻՄ-ում ազդանշանների միջանցիկության կարգաբերման համակարգերի մշակումը դարձել է չափազանց կարևոր հիմնախնդիր, քանի որ գրականությունից հայտնի սկզբունքները և մեթոդները արդյունավետության տեսանկյունից չեն բավարարում գործնական նախագծմանն առաջադրվող ժամանակակից պահանջները, ինչը առաջացնում է նկարագրված խնդիրների լուծման համար նոր միջոցների ստեղծման անհրաժեշտություն:

Ատենախոսությունը նվիրված է ԻՄ-ում ազդանշանների միջանցիկության կարգաբերման համակարգերի մշակմանը և իրագործմանը, որոնք կչեզոքացնեն տվյալների փոխանցման և ընթերցման ընթացքում առաջացած շեղումները, կմեծացնեն Մ/Ե հանգույցների հուսալիությունը և հնարավորինս կփոքրացնեն արտաքին և ԳԼՋ շեղումների ազդեցությունները:

Առաջարկվել են ինտեգրալ սխեմաներում ազդանշանների միջանցիկության կարգաբերման համակարգերի մշակման սկզբունքներ, որոնք թույլ են տալիս էապես բարելավել դրանց հիմնական տեխնիկական բնութագրերը և պարամետրերը՝ արագագործությունը, տվյալների փոխանցման և ընթերցման հուսալիությունը, սպառվող հզորությունը և այլն:

Մշակվել է ազդանշանի լցման գործակցի շեղումների հայտնաբերման և ինքնակարգաբերման համակարգ, որում կիրառված թվային հանգույցների միջոցով տվյալներն ընթերցելու շնորհիվ՝ էապես բարելավվում է տվյալի հուսալիությունը, և կարգաբերում լցման գործակիցը $\pm 0,5\%$ ճշտությամբ՝ ի հաշիվ ընդունիչի հանգույցի սպառվող հզորության ընդամենը 3,95 մՎտ-ով մեծացման:

Ստեղծվել է հաղորդչի ենթահանգույցներում բարձր հաճախականային տվյալների հուսալիության մեծացման համակարգ, որը հավելյալ հոսանքի մատակարարման հետևանքով կարգաբերում է լարման փոխակերպիչի հանգույցում լցման գործակցի շեղումները 39,5%-ով, ինչպես նաև փոքրացնում թրթռոցը երկու անգամ՝ հաղորդչում գտնվող բարձր հաճախականային լարման փոխակերպիչի մակերեսի 12%-ով մեծացման հաշվին:

Մշակվել է բարձր հաճախականային ազդանշանների ճակատների անհամաչափության կարգաբերման համակարգ, որը զգալիորեն նվազեցնում է գործընթաց-լարում-ջերմաստիճան շեղումների ազդեցությունը, ինչի արդյունքում ճակատների անհամաչափությունը կարգաբերվում է՝ հասնելով 1,2%-ի, փոքրանում են նաև ճոճքը և թրթռոցը՝ ի հաշիվ նախաբուժերի հանգույցում սպառվող հոսանքի 2,26 մԱ-ով մեծացման:

Առաջարկվել է փոխանցման գծով պայմանավորված ազդանշանի աղավաղումների կարգաբերման համակարգ, որը նվազեցնում է փոխանցման գծի ազդեցությունը, ինչի արդյունքում փոխանցվող ազդանշանի ճակատների արագությունը մեծանում է 50%-ով, ազդանշանի «աչք»-ի հորիզոնական և ուղղահայաց բացվածքներն աճում են համապատասխանաբար 13% և 10%-ով, ինչպես նաև ազդանշանի թրթռոցը նվազում է 20,7%-ով՝ ի հաշիվ էլքային բուժերի մակերեսի 13%-ով մեծացման:

Ատենախոսությունում առաջարկված սկզբունքների, մեթոդների և եղանակների հիման վրա մշակվել է ինտեգրալ սխեմաներում ազդանշանների միջանցիկության կարգաբերման համակարգերի կառուցման I/O Optimizer ծրագրային միջոցը, որը ներդրվել է «Էքսպեր» ՍՊԸ-ում և օգտագործվում է խառը ազդանշանային համակարգերի սխեմատեխնիկական նախագծման ժամանակ: Դրա միջոցով իրականացված փորձարկումները ցույց են տվել, որ ինտեգրալ սխեմաների նախագծման ժամկետը կրճատվում է միջինում 44%-ով, իսկ առավելագույնը 84%-ով, մուտք/ելք տարրերի հիմնական պարամետրերի ընդամենը 5,6%-ով վատացման հաշվին:

KAREN TIGRAN KHACHIKYAN

DEVELOPMENT OF SIGNALS' DEVIATIONS COMPESATION SYSTEMS IN INTEGRATED CIRCUITS

SUMMARY

In modern integrated circuits (IC), the frequency of data transfer is continuously increasing, which complicates data receiving and transmitting processes. The data is being processed in input/output (I/O) blocks connected with transmission lines.

Transmission lines are another critical factor in high-speed data links, as they can affect signal shape and timing and degrade timing parameters from nominal values. The transmission lines also have an adverse influence on the data quality, as they can reduce the signal's amplitude and cause data loss. This reduces the accuracy of the systems and limits the further increase of data transfer speed. The transmission lines can also cause signal reflections that significantly reduce the data quality and cause system failures.

Modern ICs are very sensitive to process, voltage, temperature (PVT) variations. The IC parameters can deviate from nominal values due to mentioned phenomena and reduce the quality of receiving and transmitting signals. This is a critical problem in high-speed ICs.

The systems which are currently being used to reduce the influence of transmission lines and PVT variations are not robust and effective enough. The existing systems mainly compensate the signals' disproportions before the receiving and transmitting processes. That means that the variations caused during the data transmitting process will not be compensated. As a result, the system's accuracy reduces.

Signal's compensation systems allow improving data quality during the whole period of I/O operation. The systems can reduce signal duty cycle variations, skew, jitter, and other critical timing parameters, increasing system accuracy.

Thus, the development of signal deviation compensation systems became highly relevant, as the known method and approaches from the literature don't meet the current needs from an effectiveness perspective. This causes a big need to develop new types of systems that can solve the mentioned problems.

The dissertation is devoted to developing and designing signals' deviation compensation systems, which can significantly improve the transmitting and receiving data quality, increase the accuracy of I/O devices, and reduce the external and PVT variation influence on the high-speed ICs.

Principals of development of signals' deviation compensation systems have been proposed which allow to significantly improve their technical characteristics and parameters such as data transfer speed, the accuracy of transmitting and receiving signals, power consumption, etc.

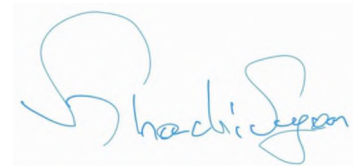
A system of duty cycle variations detection and self-calibration has been proposed, which allows significantly increases receiving signal's quality and reduced duty cycle variations in $\pm 0,5\%$ range, due to implemented digital cells, resulting in receiver's power consumption increase by $3,95mW$.

A system of improving the accuracy of high-speed signals in transmitters has been designed, which compensates duty cycle variations by $39,5\%$ and reduces signal's jitter value up to two times, due to additional current distribution to level-shifters, resulting in increase of level shifter's area by 12% .

A system of high-speed signal's edge boosting was developed, which significantly reduces PVT variations influence on high-speed ICs. This results in signal's disproportions reduction to $1,2\%$ and also in signal's skew and jitter improvement, due to pre-driver's power consumption increase by $2,26mA$.

A system of transmission lines adverse influence compensation on high-speed data signals has been constructed, which signal's disproportions caused by transmission lines, increase signals' slew rate by 50% and increases eye diagram horizontal and vertical openings by 13% and 10% correspondingly. Also, the system reduces signal's jitter by $20,7\%$, due to an increase of output buffer's area by 13% .

Based on the principles, methods, and approaches developed in the dissertation, the I/O Optimizer software has been designed and implemented in "Expper" LLC and used for mixed-signal circuit design activities. Its testes showed that with the use of proposed software, it is possible to reduce the I/O circuit design process time on average by 44% , and in the best case by 84% , at the expense of just $5,6\%$ of the measured IC's parameters worsening.

A handwritten signature in blue ink, reading "Shachi Jyoti". The signature is stylized and written in a cursive-like font.