

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ  
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

## Մարտիրոսյան Արմեն Արայիկի

**ԽԱՌԸ ԱՉԴԱՆՇԱՆԱՅԻՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆՄԱՆԵՐԻ  
ԱՐԱԳԱԳՈՐԾՈՒ ԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՅՄԱՆ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒ ՄԸ  
ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒ ՄԸ**

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

**ՍԵՂՄԱԳԻՐ**

Երևան 2019

---

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

**Մարտիրոսյան Արմեն Արայիկի**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ  
СМЕШАННЫХ СИГНАЛЬНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

Ереван 2019

---

---

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

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ. Օ.Ն. Պետրոսյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Ս.Խ. Խուրավերդյան,  
տ.գ.դ. Հ.Ա. Փիրույան,

Առաջատար կազմակերպություն՝ Երևանի կապի միջոցների  
գիտահետազոտական ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2019թ. հունիսի 7-ին, ժամը 14<sup>00</sup>-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 2019թ. ապրիլի 26-ին:

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



Մ.Յ. Այվազյան

---

---

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете Армении (НПУА)

Научный руководитель: д.т.н. О.А. Петросян

Официальные оппоненты: д.т.н. С.Х. Худавердян,  
д.т.н. Г.А. Пирумян,

Ведущая организация: Ереванский научно-исследовательский институт средств связи

Защита диссертации состоится 7-го июня 2019 г. в 14<sup>00</sup> 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 26-го апреля 2019 г.

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



Մ.Ս. Այվազյան

## ОБЩАЯ ХАРКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время смешанные сигнальные интегральные схемы (ИС) широко распространены в системах сбора и приема данных. Особенностью смешанных сигнальных ИС является совместное применение цифровых и аналоговых подузлов, что вызывает множество проблем, связанных с быстродействием, помехоустойчивостью, отклонением сигналов, потерей данных и ресурсами времени.

Кроме того, из года в год длина транзисторных каналов уменьшается до нескольких нанометров, при этом, согласно закону Мура, число транзисторов на единицу площади поверхности полупроводникового кристалла удваивается каждые 18 месяцев, что приводит к значительным отклонениям параметров, характеризующих смешанные сигнальные ИС. Параметрические отклонения обусловлены увеличением влияния вторичных явлений транзистора.

Процесс проектирования современных смешанных сигнальных ИС с каждым днем усложняется, что объясняется ужесточением требований, предъявляемых ведущими компаниями рынка в области производства узлов ввода/вывода (ВВ) в смешанных сигнальных ИС. В частности, постоянно увеличивается частота смешанных сигнальных ИС, в результате чего система становится более чувствительной к шуму и отклонениям сигнала. С другой стороны, одним из условий конкурентоспособности в области смешанных сигнальных ИС является небольшое энергопотребление, но с увеличением быстродействия параллельно увеличивается также и энергопотребление.

В дополнение к вышеупомянутым явлениям, увеличение быстродействия узлов ВВ смешанных сигнальных ИС приводит к увеличению степени зависимости критических параметров важнейших подузлов системы от напряжения питания, внешней температуры и технологического процесса.

Исходя из вышеизложенного, разработка способов увеличения быстродействия смешанных сигнальных ИС чрезвычайно актуальна. Это обусловлено тем, что возникаемые в результате этого проблемы, а также известные из литературы подходы недостаточно повышают эффективность передачи данных, что диктует необходимость принципиально новых решений существующих проблем.

Диссертация посвящена созданию принципов повышения быстродействия смешанных сигнальных ИС, которые будут полностью отвечать современным требованиям.

**Объект исследования.** Проектные средства для устранения проблем по увеличению быстродействия узлов ВВ смешанных сигнальных ИС и зависимость системы от технологического процесса, внешней температуры и шума от напряжений питания, а также пути их оптимизации.

**Цель работы.** Разработка и исследование средств, направленных на увеличение быстродействия смешанных сигнальных ИС с минимальной потерей занимаемой площади и энергопотребления, независимо от технологического процесса, напряжения питания и внешних температур.

**Методы исследования.** В ходе работы над диссертацией были применены основные положения теории проектирования смешанных сигнальных ИС, принципы моделирования, методы оптимизации и объектно-ориентированный подход к программному обеспечению(ПО).

**Научная новизна:**

- Предложена архитектура быстродействующего фазового миксера, которая благодаря встроенной синхронизирующей цепи и стабилизатору напряжения обеспечивает значительное снижение заданного колебания, что способствует увеличению быстродействия за счет повышения энергопотребления.
- Разработан метод эквализации, который выполняется на передающем узле, генерируемой в соответствии с частотой сигнала. Последний имеет такую же эффективность по сравнению с известным способом, но в отличие от существующих подходов, он обеспечивает более высокий уровень эквализации, в более широких частотных полосах, т.е. его можно применять в случае высокой эффективности, за счет потребления энергии вплоть до небольшого увеличения.
- Разработан метод линейной эквализации на приемном узле, согласно которому, кроме усиления соответствующих частотных полос сигнала данных, происходит подавление шума, что приводит к большему горизонтальному и вертикальному раскрытию диаграммы глаза за счет небольшого увеличения занимаемой площади.
- Создана система поддержки передающей единицы, которая обеспечивает независимость от технологического процесса, напряжения питания и отклонений внешней температуры, что приводит к увеличению частоты системы и сокращению времени проектирования за счет увеличения энергопотребления и занимаемой площади.

**Практическая ценность работы.** Предложенные методы были внедрены в ПО "Speed Up Designer", которое применяется в ЗАО "Синопис Армения" и используется для проектирования подузлов смешанных сигнальных ИС и в целях осуществления различных опытов. Програмное обеспечение, благодаря встроенным алгоритмам, дает возможность сократить время, затрачиваемое на проектирование, более чем в 10 раз, за счет уменьшения максимальной рабочей частоты, в худшем случае, на 400 МГц.

**Достоверность научных положений.** Научные положения диссертации подтверждены сравнением математических обоснований научных результатов и экспериментальных результатов моделирования, а также совпадением с результатами, полученными методами, разработанными другими авторами.

**Внедрение.** Программное обеспечение "Speed Up Designer" нашло свое применение в компании ЗАО "Синопис Армения" и широко используется для проектирования подузлов смешанных сигнальных ИС и осуществления различных экспериментов. С помощью программного обеспечения "Speed Up Designer" был

разработан и оптимизирован ряд современных подузлов смешанных сигнальных ИС.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- метод увеличения быстродействия фазового миксера в смешанных сигнальных ИС;
- способ эквализации в передающем узле в соответствии с частотой сигнала данных;
- способ линейной эквализации в высокоскоростных приемных узлах, с выборочной частотной полосой;
- система обнаружения и самокоррекции технологических отклонений передающего узла.

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

- ежегодной научной конференции Национального политехнического университета Армении (Ереван, Армения, 2016 г.);
- 16-ом Международном симпозиуме "IEEE EWDTs: East-West Design & Test" (Казань, Россия, 2018 г.);
- научных семинарах кафедры "Микроэлектронные схемы и системы" НПУА (Ереван, Армения, 2016-2019 гг.);
- научных семинарах кафедры "Микроэлектроника и биомедицинское оборудование" НПУА (Ереван, Армения, 2016-2019 гг.);
- научных семинарах ЗАО "Синопсис Армения" (Ереван, Армения, 2016 - 2019 гг.).

**Публикации.** Основные положения диссертации представлены в шести научных публикациях, список которых приведен в конце автореферата. Результаты были доложены на республиканских и международных конференциях.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 140 наименований, и 5 приложений. Первое приложение включает в себя акт о вкладе диссертации, второе - список рисунков, используемых в диссертации, третье - список таблиц, четвертое - список сокращений, пятое - часть Spice описания системы выравнивания узлов передатчика. Основной текст диссертации составляет 111 страниц, а вместе с приложениями - 163 страницы. Диссертация написана на армянском языке.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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

**В первой главе** представлены современные требования к смешанным сигнальным ИС, такие как быстродействие и энергопотребление, предъявляемые

передовыми компаниями и мировыми корпорациями (USB, PCIe, HDMI, DP, SATA, XAUI и т.д.). При проектировании узлов ВВ смешанных сигнальных ИС с последовательной передачей данных необходимо использовать параллельно-последовательный преобразователь (ПрПсП), который преобразовывает параллельный пакет данных с соответствующей частотой в последовательный и отправляет, а полученные в приемнике последовательные данные преобразовывает в параллельные с помощью последовательно - параллельного преобразователя (ПсПрП).

Данные передаются и принимаются с соответствующей частотой, источником которой является система генератора тактового сигнала (СГТС). СГТС, принимая усиленный опорный тактовый сигнал (ОТС) равным до 100 МГц, умножает его на предварительно выбранный коэффициент. ОТС формируется из кварцевого генератора, но имеет небольшую ширину колебания - 100 мс, поэтому он и усиливается. Усиленный тактовый сигнал, сравниваясь с сигналом обратной связи (СОС), обнаруживает разность фаз, и заряжает или разряжает выходные способности, в зависимости от обнаруженной разности. В результате частота выходного сигнала увеличивается или уменьшается, в зависимости от значения способности. В итоге на выходе формируется скоростной тактовый сигнал (СТС).

Коэффициент наполнения (КН) СГТС должен быть максимально близок к 50%:

$$КН = \frac{\text{ШИ}}{\text{П}} * 100\% , \quad (1)$$

где ШИ - ширина импульса, а П - период.

Система уточнения коэффициента наполнения (СУКН), получая выходной сигнал СГТС, обрабатывает его и в результате формирует высокочастотный тактовый сигнал с КН ~ 50%. С каждым тактом тактового сигнала параллельный пакет данных преобразовывается в последовательный. Сигнал, содержащий полученные последовательные данные, эквализируется, чтобы после передачи по каналу не было потери данных, за что отвечает система эквализации (СЭ).

Эквализация также выполняется на входе приемного узла с помощью системы линейной эквализации (СЛЭ), чтобы противодействовать каналу.

Высокочастотные последовательные данные искажаются при прохождении по каналу, так как сигнал отражается и, накладываясь на полезный компонент, создает проблемы для надежного чтения. Система согласования сопротивлений (ССС) согласовывает выходное сопротивление передатчика и входное сопротивление приемника с сопротивлением канала, что делает систему передатчика данных, канал и приемник однородными. Значение сопротивления канала зависит от стандарта узла ВВ.

От передатчика к приемнику передаются только данные, и тактовый сигнал не отправляется во избежание расходов, связанных с дополнительными межвключениями и оборудованием. Следовательно, приемник должен иметь встроенный механизм, который позволит восстановить тактовый сигнал из принятого потока данных, а затем с помощью тактового сигнала надежно считывать данные. Система восстановления фазы тактового сигнала (СВФТС)

отклоняет фазу выходного сигнала СГТС так, чтобы сделать возможным надежное считывание принятого сигнала данных (рис. 1).

С целью снижения мощности в узлах ВВ современных смешанных сигнальных ИС используются многоуровневые источники питания. Цифровые блоки питаются от источника с низким уровнем питания (0,7...1 В), а аналоговые блоки – с высоким (1,5...2 В).

Таким образом, общее энергопотребление значительно снижается за счет уменьшения напряжения цифровых блоков системы в два раза.

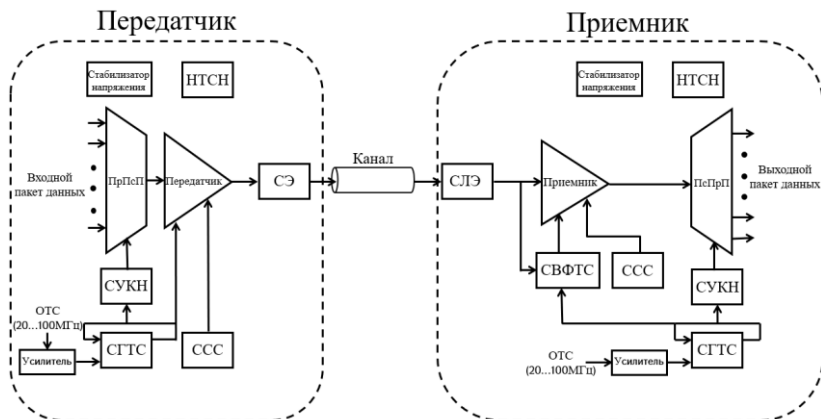


Рис. 1. Блок-диаграмма последовательной передачи данных

Цифровые блоки в основном работают на высоких скоростях, и эти быстрые переключатели вызывают скачки напряжения на низких уровнях напряжения питания. Для чувствительных цепей эти скачки могут быть опасными. Поэтому используются стабилизаторы напряжения, на выходах которых формируются устойчивые напряжения низкого уровня. Стабилизатор напряжения имеет сопротивление от шумов питания напряжения, а значение выходного напряжения зависит от входного напряжения и соотношения сопротивлений. Стабилизатор напряжения представляет собой систему с отрицательной обратной связью, роль которой заключается в стабилизации выходного сигнала и подавлении шума от дрожаний питания.

Первый каскад стабилизатора напряжения представляет собой операционный усилитель, который обеспечивает усиление системы, а второй каскад является корневым дубликатом, обеспечивающие большой поток по направлению нагрузки.

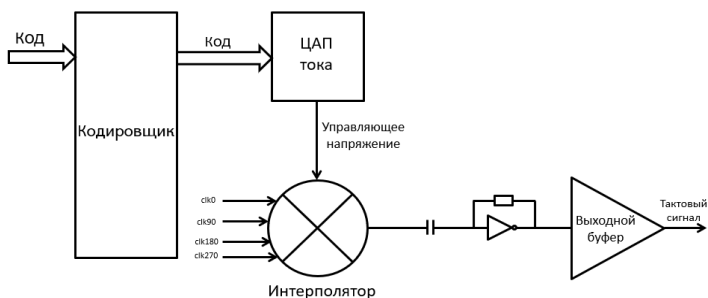
Стабилизатор напряжения является устойчивым источником напряжения, который обеспечивает независимость от шумов питания напряжения, но является зависимым от процесса, напряжения и температуры (ПНТ).

В целях нейтрализации температурных изменений используются независимые от температуры стабилизаторы напряжения (НТСН). Для получения независимого от температуры напряжения используются биполярные транзисторы и усилители. Падение напряжения на переходе база-эмиттер биполярного транзистора имеет обратную зависимость от температуры. Таким образом, при наложении обратной зависимости с положительной получается независимое от температуры напряжение.

В узлах ВВ смешанных сигнальных ИС важнейшей задачей является необходимость повышения временных запасов, что способствует увеличению быстродействия.

**Во второй главе** представлены разработки методов решения задач, изложенных в первой главе.

**Метод увеличения быстродействия фазового миксера в смешанных сигнальных ИС.** Получая последовательный код, описывающий фазы сигнала данных, фазовый миксер преобразовывает его в параллельный, который управляет цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) тока и формирует управляющее напряжение. Интерполятор, получая тактовые сигналы, отклоненные друг от друга на  $90^\circ$ , и управляющее напряжение, на выходе формирует тактовый сигнал с соответствующей фазой, который имеет маленькую амплитуду. Благодаря этому переменная составляющая тактового сигнала проходит через фильтр, а постоянная составляющая - нет. С помощью инвертора с обратной связью полученная постоянная составляющая тактового сигнала выравнивается с точкой переключения последнего, что позволяет выходному буферу усилить его (рис. 2).



*Рис. 2. Архитектура фазового миксера*

Известная архитектура фазового миксера имеет небольшую помехоустойчивость. Порядок ЦАП тока для обеспечения фазы и частоты близок к идеальному, но отклонение входных кодов друг от друга приводит к изменению частоты выходного сигнала. Кроме того, управляющее напряжение должно быть очень стабильным и независимым от любых шумов. Однако в случае данной архитектуры это невозможно, поскольку напряжение, питающее ЦАП тока, также питает другие схемы, в том числе и цифровые.



Для решения вышеупомянутых проблем предлагается новый подход, который заключается в увеличении цепочки синхронизации и повышении стабилизатора напряжения.

Синхронизатор, синхронизируя полученные параллельные сигналы, делает работу ЦАП тока линейной. Следовательно, на управляющем напряжении отсутствуют скачки напряжения. Таким образом, решается первая проблема.

Стабилизатор напряжения обеспечивает независимость чувствительных подузлов от шумов питающего напряжения, тем самым решая вторую проблему (рис. 3).

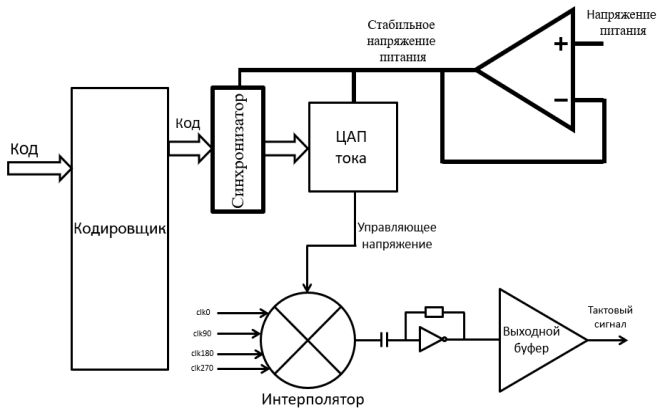


Рис. 3. Архитектура предлагаемого метода фазового миксера

Как и ожидалось, уменьшение задержки приводит к уменьшению колебания выходного сигнала, что отчетливо отражается в описании характеристики зависимости частоты выходного сигнала от времени (рис. 4).

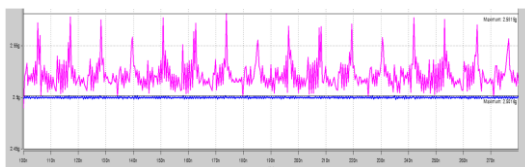


Рис. 4. Зависимости частоты выходных сигналов известных и предлагаемых фазовых миксеров от времени

Полученные результаты моделирования фазового миксера (табл. 1) в точности соответствуют стандартам ряда устройств ВВ, таким как межсистемная связь вычислительных узлов (PCIe) и универсальная последовательная шина (USB).

Результаты моделирования фазового миксера

Параметр	Известный фазовый миксер	Предлагаемый фазовый миксер
Детерминированное колебание - нет шума (пс)	0,66	0,6
Детерминированное колебание - шум применен только на напряжении низкого питания (пс)	16,88	2,69
Детерминированное колебание - шум применен на напряжениях и низкого, и высокого питаний (пс)	19,16	3,81

Таким образом, предлагаемый метод позволяет снизить детерминированную вибрацию на 80% за счет увеличения энергопотребления в четыре раза. Четырехкратное увеличение энергопотребления фазового миксера приводит к увеличению энергопотребления общей системы всего на 0,1%.

**Метод эквализации в передающем узле в соответствии с частотой сигнала данных.** Для эквализации сигнала данных по частоте необходимо сначала выявить частоту последовательного пакета данных, после чего сформировать управляющий сигнал, в зависимости от обнаруженного значения. Управляющий сигнал руководит передающей единицей, обеспечивая предварительную эквализацию по частоте.

Для обнаружения частоты используется высокочастотный фильтр. В результате перехода пакета последовательных данных через фильтр получают сигналы, описывающие частоту.

Выходной сигнал блока управления совпадает с входным, но с отклонением фазы на  $90^0$ , чтобы совпасть на середине ширины предварительного сигнального импульса. Поскольку уровень выходного сигнала фильтра разный, в зависимости от частоты, следовательно, выбирая среднюю точку ширины импульса, получается, что рост частоты приводит к увеличению входящего аналого – цифрового преобразователя (АЦП). Полученное напряжение меняет АЦП в цифровой сигнал, с помощью которого управляется выходная единица передатчика (рис. 5).

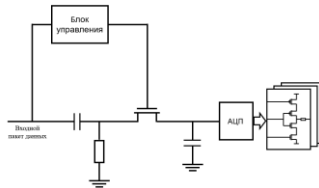


Рис. 5. Предлагаемый метод управления передающей единицей

Чем выше частота сигнала данных, тем выше уровень входящего напряжения АЦП, следовательно, увеличивается также цифровой код, управляющий передающей единицей. В результате этого увеличивается количество передающих единиц, что приводит к эквализации с еще большей силой. Получается, что при увеличении частоты сигнала данных сила эквализации тоже растет, поэтому увеличивается противодействие по отношению к каналу с низкочастотной характеристикой.

Разница между известной и предлагаемой архитектурами заключается в методе эквализации. В первом случае эквализация выполняется соразмерно, независимо от частоты сигнала данных, а во втором случае уровень эквализации определяется частотой входящего напряжения (табл. 2).

Таблица 2

Результаты моделирования предложенной СЭ

Параметр	Известная СЭ			Предлагаемая СЭ		
	мал.	тип.	бол.	мал.	тип.	бол.
Горизонтальное раскрытие диаграммы глаза (пс)	71	80	89	73	85	87
Вертикальное раскрытие диаграммы глаза (мВ)	98	125	160	95	120	150
Ошибка переданных данных	5	5	13	5	5	12

Таким образом, предлагаемый метод обладает той же эффективностью, но, в отличие от известного способа, при увеличении быстродействия он может обеспечить более высокий уровень эквализации, в более широких частотных диапазонах, т.е. он применим в случае повышения быстродействия более чем на 50%.

**Метод линейной эквализации в высокоскоростных приемных узлах, с выборочной частотной полосой.** Чтобы обеспечить эквализацию в приемнике, необходимо внедрить систему, которая будет иметь такую амплитудно - частотную характеристику, которая, накладываясь с каналом, скомпенсирует его. В результате получится коэффициент усиления около 0 дБ до необходимой частоты.

Для нейтрализации воздействия канала в узлах В/В в современных смешанных сигнальных ИС используются СЛЭ, которые обеспечивают в низкочастотном диапазоне 0 дБ, а в высокочастотном диапазоне сигнала данных – более высокое усиление.

Имея усиление 0 дБ до частоты сигнала данных, приемный узел считывает все те шумы, частоты которых меньше рабочих. Из-за шумов уменьшаются все типы временных ресурсов, т.е. ограничивается быстродействие.

Для фильтрации низкочастотных шумов предлагается добавить высокочастотный фильтр 2-го порядка, который подавляет низкочастотную составляющую сигнала (рис. 6).

Предлагаемая архитектура высокочастотного фильтра основана на операционном усилителе, частота среза которого определяется значениями сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и конденсаторов  $C_1$ ,  $C_2$  (рис. 7). Из-за внешних факторов и канала на входе приемного узла быстродействующий сигнал данных подавлен и содержит шумы. Поэтому предлагается перед эквализацией выполнить фильтрацию низкочастотной составляющей сигналов.

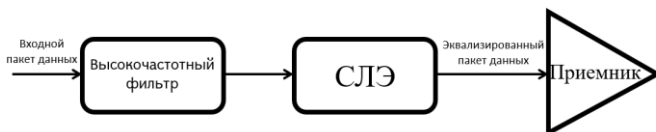


Рис. 6. Предлагаемый метод эквализации

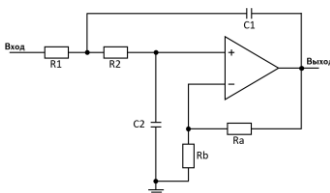


Рис. 7. Предлагаемая архитектура высокочастотного фильтра

С помощью предлагаемой архитектуры в случае всех отклонений смоделированных ПНТ система обеспечивает достаточную частоту среза и доброкачественность на желаемой полосе частот (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение диаграммы глаза

Параметр	Вход	Выход известной СЛЭ	Выход предлагаемой СЛЭ
Горизонтальное раскрытие диаграммы глаза (пс)	75	124	153
Вертикальное раскрытие диаграммы глаза (мВ)	141	210	241

Сравнение известного и предлагаемого методов линейной эквализации показывает, что предлагаемый метод обеспечивает на 10...20% большее раскрытие диаграммы глаза.

**Система обнаружения и самокоррекции технологических отклонений передающего узла.** Предложена система обнаружения и самокоррекции технологических отклонений. Для уменьшения зависимости сигнала данных от ПНТ предлагается внедрить систему, которая, обнаруживая отклонения процесса, усилит или ослабит передающую единицу. Поскольку отклонение процесса выражается предельным напряжением транзистора, используется инвертор с обратным подключением, выходной сигнал которого повторяет входной с разницей предельного напряжения, т.е. уровень логической "1" ниже на величину предельного напряжения, а уровень логического "0" - выше.

Позже, в зависимости от данного сигнала, генерируется цифровой код, с помощью которого управляется размер выходной единицы передатчика.

Обратно подключенный инвертор должен быть дубликатом выходной единицы передатчика, чтобы в обоих случаях вариации процесса были одинаковыми. На выходе дифференциального усилителя, соответственно разнице выходного сигнала и  $V_{DD}/2$ , формируется напряжение, которое преобразовывается в цифровой код с помощью АЦП. Цифровой код в точности записывается в регистрах типа N и P, посредством чего осуществляется управление выходной единицей передатчика. В целях правильной записи, для селекторного сигнала мультиплектора используется входящий сигнал (рис. 8).

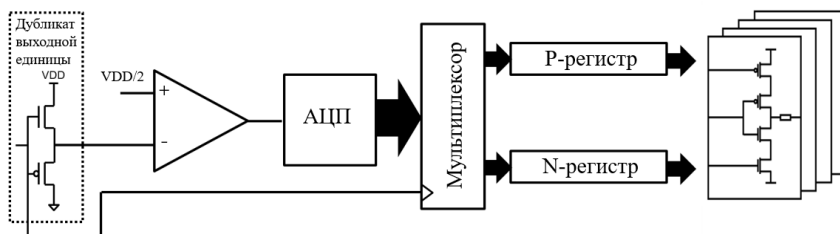


Рис. 8. Архитектура предлагаемого метода

Для доказательства эффективности предлагаемого метода, была смоделирована система передачи и реализована имитация с внедрением данного метода и без него. Результаты симуляции показывают, что без применения предлагаемого метода длительность фронтов роста и снижения колеблется в области от 20 до 90 пс, т.е. приближается вплоть до длительности порядка сигнала данных. Это означает, что в случае последующего увеличения быстродействия система даст сбой.

При внедрении предлагаемой архитектуры передающая единица спроектирована таким образом, чтобы удовлетворить типовому случаю, а в случае отклонения процесса система обнаружит и скомпенсирует его, увеличив или уменьшив количество передающих единиц, в зависимости от направления отклонения процесса. В результате во всем диапазоне отклонений ПНТ

длительности фронтов роста и снижения сигнала данных близки к типовому и колеблются около 40 пс (рис. 9) (табл. 4).

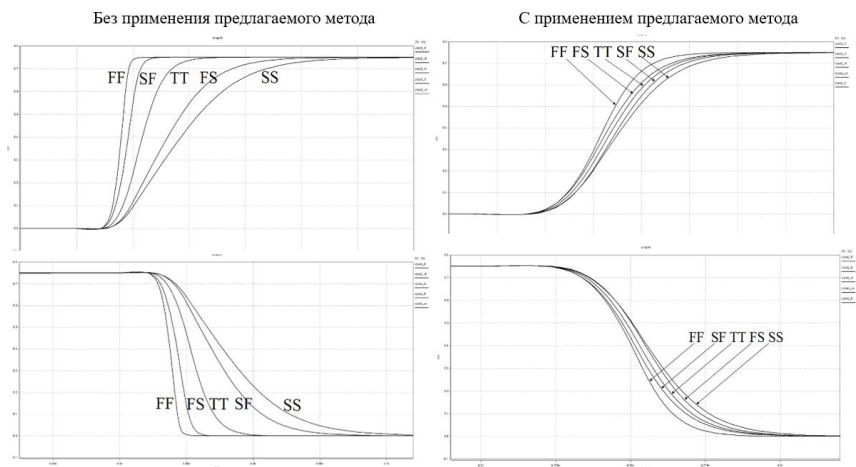


Рис. 9. Зависимость фронтов роста и снижения от ПНТ в известных и предлагаемых архитектурах

Таблица 4

Результаты моделирования предложенной системы

Варианты моделирования	Длительность фронта роста без предложенной системы (пс)	Длительность фронта снижения с предложенной системой (пс)
Типовой-типовой (55 °С)	41,4	40,87
Быстрый-быстрый (-40 °С)	20,85	20,15
Медленный- медленный (125 °С)	90,91	90,23

При внедрении предлагаемого подхода система передачи данных готова к дальнейшему увеличению скорости, обеспечивая диаграмму глаза с широким раскрытием. Кроме того, в настоящее время, на разработку системы передачи

тратится много времени, так как необходимо удовлетворить требованиям во всем диапазоне отклонений ПНТ, в то время как в случае внедрения предложенной архитектуры необходимо удовлетворить требованиям только в типовом случае. Таким образом, уменьшая время на проектирование снижается себестоимость ИС.

**В третьей главе** представлено программное средство, разработанное для реализации предлагаемых решений и архитектур, которое позволит упростить работу разработчика и сократит время на разработку.

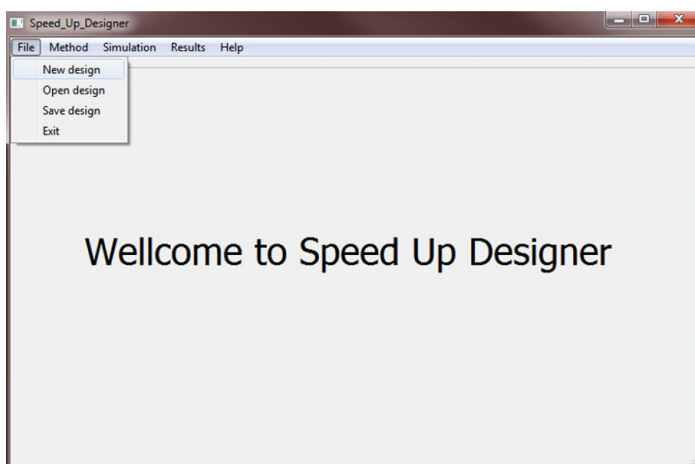
Для проектирования предложенных методов и архитектур, представленных во второй главе диссертации, создано ПО "Speed Up Designer", которое повышает эффективность процесса проектирования смешанных сигнальных ИС.

Программное обеспечение дает возможность выполнить проектирование предложенных методов в соответствии с заданными требованиями.

ПО "Speed Up Designer" предназначено для процесса разработки и проектирования. Кроме того, оно имеет удобный для разработчика интерфейс. В течение маленького промежутка времени можно ввести необходимые входные данные и выполнить моделирование.

ПО "Speed Up Designer" имеет пять окон (рис. 10):

- File – раздел для открытия проекта
- Method – раздел для выбора методов
- Simulation – раздел для симуляции.
- Results – раздел анализа результатов
- Help – раздел для документации



*Рис. 10. Основное окно программы "Speed Up Designer"*

В разделе "Simulation" выполняются ввод и симуляция исходных данных. Поле "Select the method" позволяет выбрать нужную архитектуру. Затем процесс импортируется в Spice описание поля "Select the process"-поля "Netlist", а описание параметров, необходимых для оптимизации и симуляции, - в подполях "Browse ... " поля "Deck". Типовые значения уровней температуры и напряжения вводятся в поля "Temperature", "Supply" и "Supply (high) " соответственно. После ввода исходных данных необходимо выбрать инструмент симуляции и вариант выпуска (рис. 11).

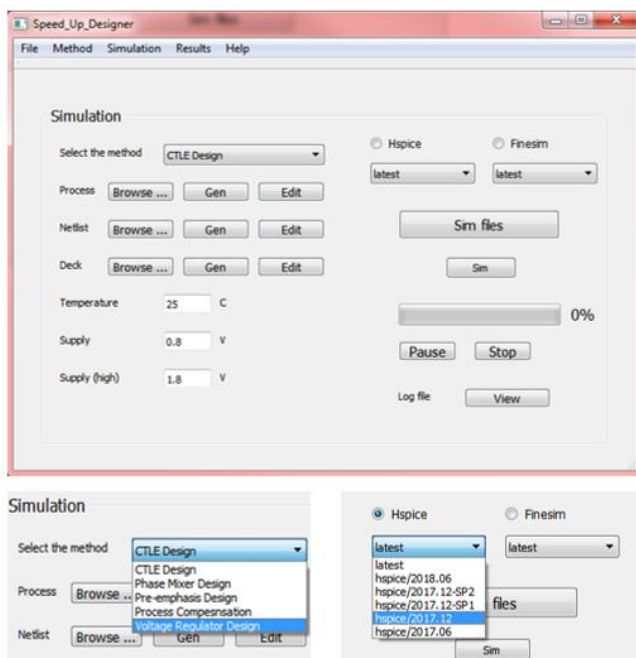


Рис. 11. Окно "Simulation" программы "Speed Up Designer"

При использовании ПО "Speed Up Designer" на этапе проектирования системы время, затрачиваемое на подготовку и ввод данных, сокращается более чем на 70%.



## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Предложены принципы повышения быстродействия смешанных сигнальных интегральных схем, позволяющие построение решений, отвечающих современным требованиям [1-6].
2. Предложена архитектура быстродействующего фазового миксера, которая благодаря встроенному синхронизатору и стабилизатору напряжения обеспечивает снижение детерминированного колебания на 80%, что способствует увеличению быстродействия на 50% за счет четырехкратного повышения энергопотребления. Четырехкратное увеличение энергопотребления фазового миксера приводит к увеличению энергопотребления общей системы всего на 0,1% [1].
3. Разработан метод эквализации на передающем узле, генерируемый в соответствии с частотой сигнала. Последний, в отличие от существующих подходов, обеспечивает при такой же эффективности, более высокий уровень эквализации, в более широких частотных полосах, т.е. применим в случае повышения быстродействия более чем на 50%, за счет увеличения энергопотребления всего до 5% [2].
4. Разработан метод линейной эквализации на приемном узле, согласно которому, кроме усиления соответствующих частотных полос сигнала данных, выполняется подавление шумов, что приводит к увеличению горизонтального и вертикального раскрытия диаграммы глаза на 19% и 13% соответственно за счет увеличения площади на 3% [3].
5. Создана система поддержки передающей единицы, которая обеспечивает независимость от вариаций ПНТ, в худшем случае отклоняясь от типового на 2,5%, что примерно в 40 раз меньше известной архитектуры. В результате частотная полоса системы увеличивается более чем на 50% и вдвое сокращается время, затрачиваемое на проектирование, за счет увеличения энергопотребления всего до 5% и занимаемой площади – приблизительно на 10% [4].
6. Предложенные методы были внедрены в программное обеспечение "Speed Up Designer", которое применяется в ЗАО "Синописис Армения" и используется для проектирования подузлов смешанных сигнальных ИС и осуществления различных опытов. Данное ПО, благодаря встроенным алгоритмам, дает возможность сократить время, затрачиваемое на проектирование более чем в 10 раз за счет уменьшения максимальной рабочей частоты, в худшем случае, на 400 МГц [1-4].

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. **Մարտիրոսյան Ա.Ա.** Արագագործ փուլային խառնիչի աղմկակայունության բարձրացման մեթոդ. // Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի «Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու. – Երևան, 2017. – էջ 352 – 356:
2. **Martirosyan A.A.** High speed transmitter dynamic equalization method for serial links // Proc. Of NPUA: Information Technologies, Electronics, Radio Engineering. – 2018. – No 1. – P. 108 – 115.
3. High quality factor 5.0 Gbps CTLE circuit for SERDES serial links / **V. Melikyan, A. Petrosyan, K. Khachikyan, A. Trdatyan, A. Martirosyan** // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Kazan, Russia, Sep 14, 2018. – 2018. – P. 641–644.
4. Process Variation Detection and Self-Calibration Method for High-Speed Serial Links / **V. Melikyan, A. Martirosyan, A. Sahakyan, Z. Avetisyan, et al** // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Kazan, Russia, Sep 14, 2018. – 2018. – P. 681–684.
5. Դիմադրությունների համաձայնեցման մեթոդ / **Օ.Հ. Պետրոսյան, Ա.Ա. Մարտիրոսյան, Ա.Ա. Տրդատյան, և ուր.** // Հայաստանի ճարտարագիտական ակադեմիայի Լրաբեր. – Երևան, 2018. – Հ. 15, No 3. – էջ 475-479:
6. **Մարտիրոսյան Ա.Ա.** Լարամաբր դեկավարվող գեներատորի ճշտության մեծացման մեթոդ // Հայաստանի գիտությունների ազգային ակադեմիայի և Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի տեղեկագիր. – Տեխն. Սերիա, Երևան, 2018. – Հ. 71, No 4. – էջ 456–464:

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ներկայումս խառը ազդանշանային ինտեգրալ սխեմաներն (ԻՄ) իրենց լայն տարածումն են գտել տվյալների հաղորման և ընդունման համակարգերում: Խառը ազդանշանային ԻՄ-երի առանձնահատկությունը կայանում է թվային և անալոգային ենթահանգույցների համատեղ կիրառության մեջ, որն առաջացնում է բազում խնդիրներ՝ կապված արագագործության բարձրացման, աղմկակայունության, ազդանշանային շեղումների, տվյալների կորուստների և ժամանակային պաշարի հետ:

Բացի այդ, տարեցտարի փոքրանում է տրանզիստորների հոսքուղու երկարությունը՝ հասնելով մի քանի նմ-ի և, համաձայն Մուրի օրենքի, կիսահաղորդչային բյուրեղի միավոր մակերեսին ընկնող տրանզիստորների քանակը կրկնապատկվում է յուրաքանչյուր 18 ամիսը մեկ, որի հետևանքով առաջանում են խառը ազդանշանային ԻՄ-երը բնութագրող պարամետրերի էական շեղումներ: Պարամետրական շեղումները պայմանավորված են տրանզիստորների երկրորդային երևույթների ազդեցությունների մեծացմամբ:

Ժամանակակից խառը ազդանշանային ԻՄ-երի նախագծման գործընթացը օրեցօր բարդանում է, որը բացատրվում է մուտք/ելք հանգույցների շուկայի առաջատար ընկերությունների կողմից առաջադրվող պահանջների խստացմամբ: Մասնավորապես, շարունակաբար մեծանում է խառը ազդանշանային ԻՄ-երի աշխատանքային հաճախությունները, որի արդյունքում համակարգը դառնում է ավելի զգայուն աղմուկների և ազդանշանային շեղումների նկատմամբ:

Վերոնշյալ երևույթներից գատ, խառը ազդանշանային ԻՄ-երի մուտք/ելք հանգույցների արագագործության աճը հանգեցնում է համակարգում որոշիչ ենթահանգույցների կարևորագույն պարամետրերի կախվածության աստիճանի բարձրացմանը սնման լարումից, արտաքին ջերմաստիճանից և տեխնոլոգիական գործընթացից:

Այսպիսով, խառը ազդանշանային ԻՄ-երի արագագործության բարձրացման միջոցների մշակումը ներկայումս չափազանց արդիական է, քանի որ դրա հետևանքով առաջացած խնդիրների գրականությունից հայտնի լուծման մոտեցումները բավարար չափով չեն ապահիվում տվյալների փոխանցման արդյունավետության ավելացում, ինչը թելադրում է առկա խնդիրների նոր սկզբունքներով լուծման անհրաժեշտություն:

Ատենախոսությունը նվիրված է խառը ազդանշանային ԻՄ-երի արագագործության բարձրացման սկզբունքների ստեղծմանը, որոնք լիովին բավարարում են ժամանակակից մարտահրավերներին:

Աշխատանքի ընթացքում, մշակվել են խառը ազդանշանային ինտեգրալ սխեմաների արագագործության բարձրացման մոտեցումներ, որոնք կիրառելի են արդի համակարգերում:

Առաջարկվել են խառը ազդանշանային ինտեգրալ սխեմաների արագագործության բարձրացման սկզբունքներ, որոնք թույլ են տալիս ժամանակակից մարտահրավերները լիովին բավարարող լուծումների կառուցումը:

Առաջարկվել է արագագործ փուլային խառնիչի ճարտարապետություն, որը, ներդրված համընկեցնող շղթայի և լարման կայունարարի շնորհիվ ապահովում է կանխորոշելի թրթռոցի 80%-ով փոքրացում, ինչը նպաստում է արագագործության 50%-ով բարձրացմանը՝ էներգասպառման քառակի մեծացման հաշվին: Փուլային խառնիչի էներգասպառման քառակի մեծացումը հանգեցնում է ընդհանուր համակարգի էներգասպառման ընդամենը 0,1% աճին:

Ստեղծվել է հաղորդիչ հանգույցում կատարվող համահարթեցման եղանակ, որը կատարվում է ըստ տվյալների ազդանշանի հաճախության: Վերջինս ի տարբերություն գոյություն ունեցող մոտեցումների, նույնպիսի արդյունավետության պարագայում ապահովում է ավելի բարձր համահարթեցման մակարդակ՝ ավելի մեծ հաճախականային տիրույթներում, այսինքն՝ կիրառելի է արագագործության ավելի քան 50%-ով բարձրացման դեպքում՝ ի հաշիվ էներգասպառման ընդամենը մինչև 5%-ով մեծացման:

Մշակվել է ընդունիչ հանգույցում կատարվող գծային համահարթեցման մեթոդ, որի դեպքում, տվյալների ազդանշանի համապատասխան հաճախականային տիրույթի ուժեղացումից բացի, կատարվում է աղմուկների ճնշում, որը հանգեցնում է աչքի հորիզոնական և ուղղահայաց ավելի մեծ բացվածքների՝ համապատասխանաբար 19%-ով և 13%-ով՝ զբաղեցրած, մակերեսի 3%-ով մեծացման հաշվին:

Ստեղծվել է հաղորդող միավորին աջակցող համակարգ, որն ապահովում է անկախություն ԳԼՋ շեղումներից, վատագույն դեպքում՝ 2,5%-ով շեղմամբ տիպայինից, ինչը մոտավորապես 40 անգամ փոքր է հայտնի ճարտարապետությունից: Արդյունքում մեծանում է համակարգի հաճախականային տիրույթը ավելի քան 50%-ով, և կրճատվում է նախագծման վրա ծախսվող ժամանակը ավելի քան 2 անգամ՝ ի հաշիվ ընդամենը մինչև 5%-ով էներգասպառման և մոտավորապես 10%-ով զբաղեցրած մակերեսի մեծացման:

Առաջարկված մեթոդները ներդրվել են Speed Up Designer ծրագրային գործիքում, որը կիրառվում է «Մինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ-ում և օգտագործվում է խառը ազդանշանային ԻՄ-երի ենթահանգույցների նախագծման և տարատեսակ փորձեր իրականացնելու նպատակով: Այն՝ շնորհիվ ներդրված ալգորիթմների, հնարավորություն է տալիս կրճատել նախագծման վրա ծախսվող ժամանակը ավելի քան 10 անգամ՝ ի հաշիվ աշխատանքային առավելագույն հաճախության, վատագույն դեպքում՝ 400 ՄՀց-ով փոքրացման:

## ARMEN ARAYIK MARTIROSYAN

### RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MEANS OF OPERATION SPEED IMPROVEMENT IN MIXED SIGNAL INTEGRAL CIRCUITS

#### SUMMARY

Currently, mixed signal integrated circuits (ICs) are widely distributed in data receiving and transmitting systems. A feature of mixed signal ICs is the combined use of digital and analog sub-nodes, which causes many problems such as high performance, noise immunity, signal rejection, data loss, and time margin.

In addition, from year to year the length of transistor channels decreases to several nm, and, according to Moore's law, the number of transistors per unit area of the semiconductor crystal surface doubles every 18 months, which leads to significant deviations of parameters characterizing the mixed signal ICs. The parametric deviations are due to the increasing influence of the transistor secondary effects.

The process of designing modern mixed signal ICs is becoming more complex day-by-day, which is explained by the tightening of the requirements established by leading companies in the market for the production of input/output (I/O) nodes in mixed signal ICs. In particular, the frequency of mixed signaling ICs is continuously increasing, as a result of which the system becomes more sensitive to noise and signal deviations. On the other hand, one of the conditions for being competitive in the field of mixed signal ICs is a small power consumption, but within high productivity increase, the power consumption also increases in parallel.

In addition to the above-mentioned phenomena, an increase in the high-performance of mixed signal ICs leads to an increase in the degree of dependence of the critical parameters of the most important sub nodes of the system on the supply voltage, external temperature and technological process.

Accordingly, nowadays, the development of methods for increasing the high-performance of mixed signaling ICs is extremely relevant, since the known literature approaches resulting from this problem do not sufficiently increase the efficiency of data transmission, which dictates the need for fundamentally new solutions to existing problems.

The thesis is dedicated to the creation of principles for improving the operation speed of mixed signal ICs that will fully meet modern requirements.

During the investigation developed the principles of improving the operation speed of mixed signal integrated circuits, which are applicable for modern systems.

The architecture of the high-frequency phase mixer is proposed, which, thanks to the built-in synchronizer and voltage stabilizer, reduces the deterministic oscillation by 80%, due to a fourfold increase in power consumption. The fourfold increase in the energy consumption of the phase mixer increases the overall energy consumption by 0.1%

An equalization method has been created that is performed on the transmitting node, generated in accordance with the frequency of the data signal. The latter has the same efficiency compared to the known method, but unlike the existing approaches, it provides a higher level of equalization in the wider frequency bands, i.e., is applicable in

case of a performance increase of more than 50% due to the increase in energy consumption to 5%.

A linear equalization method has been developed that is performed at the receiving node, in which, in addition to amplifying the corresponding frequency bands of the data signal, noise is suppressed, which leads to an increase in the horizontal and vertical clearance of the eye diagram by 19% and 13%, respectively, by increasing the area by 3%.

A support block for the transmitting unit has been created, which provides independence from variations of process, voltage and temperature. In the worst case, it provides a deviation of 2.5% from the standard one, which is about 40 times less than the known architecture, as a result of which the frequency band of the system increases by more than 50% and the time spent on design is halved by increasing energy consumption by up to 5% and occupied area - about 10%.

The proposed methods were implemented in the Speed Up Designer software, which has found its application in Synopsys Armenia CJSC and is used to design mixed signal IC sub nodes and in order to carry out various experiments.

The proposed software, thanks to built-in algorithms, makes it possible to reduce the time spent on design by more than 10 times, by reducing the maximum operating frequency, in the worst case, by 400 MHz.

