

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Բարաջանյան Հայկ Ալեքսանդրի

**ԽԱՌԸ ԱԶԴԱՆՇԱՆԱՅԻՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ԱՂՄԿԱԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ
ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

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

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան 2023

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Бабаджян Айк Александрович

**РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ В
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ СО СМЕШАННЫМИ СИГНАЛАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

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

Ереван 2023

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

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ. Սուրիկ Խաչիկի Խուդավերդյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Աշոտ Գևորգի Հարությունյան,
տ.գ.թ. Արթուր Ստեփանի Սահակյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Երևանի կապի միջոցների
գիտահետազոտական ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2023թ. սեպտեմբերի 8-ին, ժամը 14⁰⁰ -ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046 Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան, փ., 105, 17 մասնաշենք): Ատենախոսությունը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում: Սեղմագիրն առաքված է 2023թ. հուլիսի 27-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. Сурик Хачикович Худавердян

Официальные оппоненты: д.т.н. Ашот Геворгович Арутюнян
к.т.н. Артур Степанович Саакян

Ведущая организация: Ереванский научно-исследовательский институт средств связи

Защита диссертации состоится 8-го сентября 2023 г. 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 27-го июля 2023 г.

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

Бениамин Феликсович Бадалян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Многие потребительские товары, такие как сотовые телефоны и портативные компьютеры, требуют как цифровых, так и аналоговых схем. Современные системы на чипах обычно имеют преимущества по энергопотреблению по сравнению с многокристальными системами. Изменение сигнала цифровых входов вызывает шум, который создается на кремниевой подложке. Этот шум известен как шум подложки и распространяется через подложку на другие цепи. В аналоговой схеме принимаемый шум подложки снижает производительность схемы. Эта проблема становится особенно серьезной при проектировании интегральных схем со смешанными сигналами.

В случае изменения сигнала многочисленных цифровых входов, когда работает цифровая схема, напряжения на большом количестве узлов мгновенно изменяются. Например, переходное напряжение может перейти от значения 0 к значению напряжения питания за десятки пикосекунд. Быстрое переключение вызывает большие токи в линиях электроснабжения. Имеются паразитные емкости и индуктивности от микросхемы к межсоединениям. От переключенного чипа до чипа, подключенного к межсоединениям, существуют паразитные импедансы и индуктивности из-за печатной платы. Имеются также паразитные сопротивления в линиях питания микросхемы. Скачкообразные изменения тока источника питания приводят к колебаниям напряжения на линиях питания микросхем. Эти колебания напряжения известны как шумы одновременного переключения. В цифровых схемах шумы одновременного переключения могут привести к снижению производительности или неисправности.

Существует ряд методов уменьшения шума в интегральных схемах со смешанными сигналами. Разработка новых методов, а также возможных путей решения данной задачи помогут разработчику производить ИС, в которых риски образования шума будут максимально снижены. Эти методы, в основном, касаются уменьшения шумов возникающих из-за ошибок структуры схемы и его размещения. После завершения внутренних работ проектировщики должны обратить внимание на расположение цепи, выбор межсоединений, заземления и источника питания.

Диссертация посвящена разработке средств повышения помехоустойчивости смешанных ИС, благодаря которым результаты работы схемы будут более точными.

Разработка средств повышения помехоустойчивости ИС смешанных сигналов актуальна как с точки зрения решения задач, представляющих научный интерес, так и с точки зрения оптимизации электронных устройств, имеющих практическое значение.

Объект исследования. Создание возможных способов повышения помехоустойчивости ИС со смешанными сигналами и выявление источников помех.

Цель работы. Разработка и исследование способов повышения помехоустойчивости интегральных схем со смешанными сигналами.

Методы исследования. В ходе исследования были использованы методы и способы шумоподавления цепей, теории эффективного использования устройств, повышающих помехоустойчивость, изучены проблемы, возникаемые из-за шума, даны решения проблем, вызванных шумами.

Научная новизна:

- Предложены способы повышения помехоустойчивости кольцевого и аудиочастотного генератора управляемого напряжением (ГУН). Показано, что в случае кольцевого ГУНа, с помощью добавления конденсаторов фильтрующих шумы и резисторов сохраняющих частоту сигнала в каждом инвертирующем слое, шумы уменьшаются на 51%, площадь схемы увеличивается на 18%, потеря энергии увеличивается на 4,4%, а в случае аудиочастотного ГУНа, с помощью замены выходного ОУ с триггером Шмидта в котором низкое и высокое напряжениями переключения соответствует диапазону напряжений входного сигнала выходного ОУ первой схемы для сохранения частоты сигнала, а также за счет добавления буфера для получения аккуратного выходного сигнала, шум уменьшается на 30%, площадь схемы снижается на 28%, а потеря энергии увеличивается на 17% ([2,7]).
- Предложены подходы повышения помехоустойчивости флэш аналого-цифрового преобразователя (флэш-АЦП) и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) с R-2R резисторной цепочкой. Показано, что в случае схемы флэш-АЦП, с помощью применения дополнительных компараторов и зеркал тока для получения по возможности малых входных переключений у энкодера, и таким образом достижения уменьшения шумов в общей схеме, шумы уменьшились на 63%, а площадь схемы увеличилась на 72%, а потеря энергии увеличивается на 37%; в случае ЦАПа с R-2R резисторной цепочкой, для уменьшения шумов появляющихся из за большого тока в обратной связи ОУ использовались транзистор подключенный в диодном режиме для проведения малого тока а также выходное зеркало тока, и в результате шумы уменьшились на 22%, площадь схемы увеличилась на 7%, а потеря энергии увеличивается на 15% ([3,6]).
- Предложены способы повышения помехоустойчивости ступенчатого преобразователя напряжения и мультиплексора. Показано, что в случае ступенчатого преобразователя напряжения, с помощью кратковременного замыкания переключателя, включенного между прямым и инвертирующим выходами за счет добавления конденсаторов и резисторов у входа, шумы уменьшились на 68%, площадь схемы увеличилась на 14%, а потеря энергии увеличивается на 7%; в случае мультиплексора, с помощью кратковременного замыкания выходных транзисторов p-типа, за счет добавления входных компараторов, шумы уменьшились на 59%, площадь схемы увеличилась на 28%, а потеря энергии увеличивается на 16% ([4,5]).

Практическая ценность работы. Предложенные способы и схемотехнические решения были реализованы в программном средстве (ПС) “Mixed Signal Noise Immunity”, которое внедрено в ЗАО “Синописис Армения” и используется для повышения помехоустойчивости ИС со смешанными сигналами. Испытания показали, что ПС “Mixed Signal Noise Immunity” позволяет сократить продолжительность процесса проектирования схемы в 8...12 раз, уменьшить погрешность выходного шума в среднем на 48%, вместе с тем обеспечив минимально возможное изменение времени нарастания/спада сигнала, времени задержки и частоты за счет повышения потребления энергии на 44% и увеличения площади поверхности на 13%.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- Предложен способ повышения помехоустойчивости кольцевого ГУНа с помощью добавления конденсаторов и резисторов в каждом инвертирующем слое.
- Предложен подход повышения помехоустойчивости аудиочастотного ГУНа с помощью замены выходного ОУ с триггером Шмидта и буфером.
- Предложен способ повышения помехоустойчивости мультиплексора с использованием выходных транзисторов.
- Предложен подход повышения помехоустойчивости ступенчатого преобразователя напряжения с использованием переключателя между прямым выходом и инверсным выходом.
- Предложен способ повышения помехоустойчивости флэш-АЦП с помощью применения дополнительных компараторов и зеркал тока.
- Предложен подход повышения помехоустойчивости ЦАП с R-2R резисторной цепочкой с помощью добавления выходных зеркал тока.
- Разработан программный инструмент Mixed Signal Noise Immunity для повышения помехоустойчивости интегральных схем со смешанным сигналом.

Достоверность научных положений подтверждена математическими и теоретическими обоснованиями, представленными в диссертации, и реализацией моделирования высокой точности.

Внедрение. ПС “Mixed Signal Noise Immunity” внедрено в ЗАО “Синопис Армения”. Оно используется для разработки ИС со смешанными сигналами и повышения их помехоустойчивости.

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

- научных семинарах кафедры «Микроэлектронные схемы и системы» НПУА (Ереван, Армения, 2020-2023 гг.);
- научных семинарах ЗАО “Синопис Армения” (Ереван, Армения, 2020 – 2023 гг.);
- ежегодной конференции НПУА (Ереван, Армения, 2022 г.).

Публикации. Основные положения диссертации представлены в семи научных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 106 наименований, и четырех приложений. В первом приложении представлен акт внедрения диссертации, во втором – отрывок Spice-описания оптимизированной схемы ЦАП с R-2R резисторной цепочкой, в третьем – отрывок QT-описания разработанного программного средства “Mixed Signal Noise Immunity”, в четвертом – списки рисунков, таблиц и сокращений. Основной объем диссертации составляет 118 страниц, а вместе с приложениями – 150 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи исследования, представлены методы исследования, научная новизна, практическое значение и основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе показана важность разработки методов повышения помехоустойчивости в ИС со смешанными сигналами.

Конструкции ИС со смешанными сигналами часто приводят к проблемам, связанным с шумами. Большое количество цифрового шума в сочетании с чувствительными аналоговыми цепями часто приводит к шуму межсоединений. Усложняет ситуацию тот факт, что соединения ИС моделируются некорректно. Это приводит к тому, что генерация сигнала в схеме выполняется правильно, но возникают проблемы с производительностью или функционированием из-за шумов на кремниевой подложке.

Цифровое переключение является основной причиной шума в устройствах со смешанными сигналами, таких как инвертор с транзисторами комплементарной структуры металл-оксид-полупроводник (КМОП). При переходе цифровых входов между низким и высоким состояниями затвор обеспечивает короткое замыкание между источником питания и землей (рис. 1).

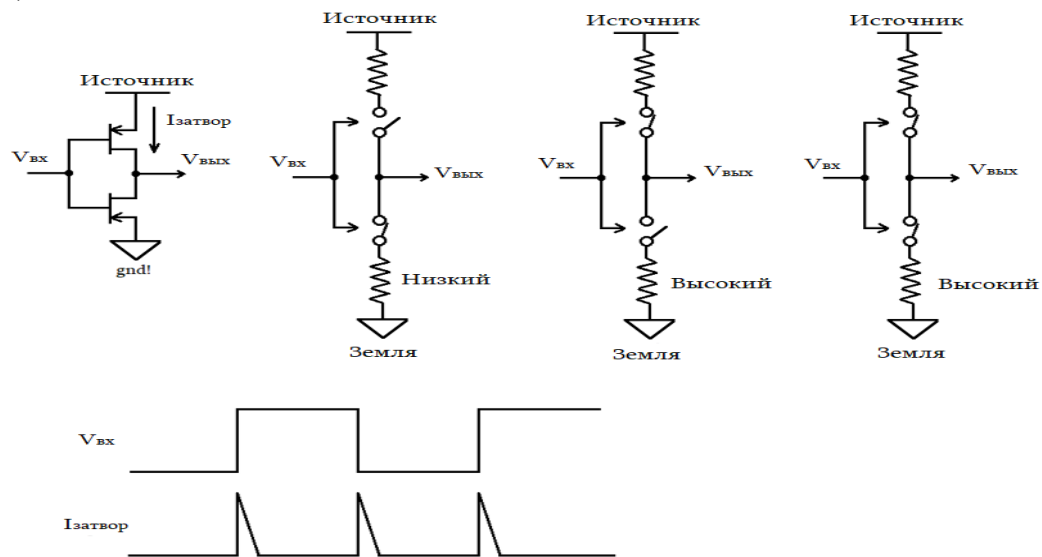


Рис. 1. Вид инвертора, его резистивный переход и характеристика входного-выходного сигнала

Нарастающие и спадающие переходы сигнала также вызывают широкополосный шум, который может передаваться на соседние цепи. Учитывая, что большинство ИС имеют большое количество входов с частотным регулированием, шум может существенно повлиять на работу схемы.

Спектральный состав переходных процессов, изображенных на рис. 1, расположен в высших гармониках периодичности. Следовательно, спектральный состав переходного процесса переключения становится проблемой радиочастотного шума.

Возможно, наиболее ценным инструментом снижения чувствительности к шуму является полная дифференциальная обработка сигналов в ИС (рис. 2). Исходя из этого, используются два сигнала с противоположной полярностью, и разница между ними определяет управляющий сигнал. Если сигналы обрабатываются и комбинируются, шум переключения и шум мощности являются синфазными сигналами. Усиление сигнала общего режима цепей составляет более 30 дБ. Следовательно, шум сигнала увеличивается по сравнению с шумом источника питания, базы и подложки из-за использования разных схем.

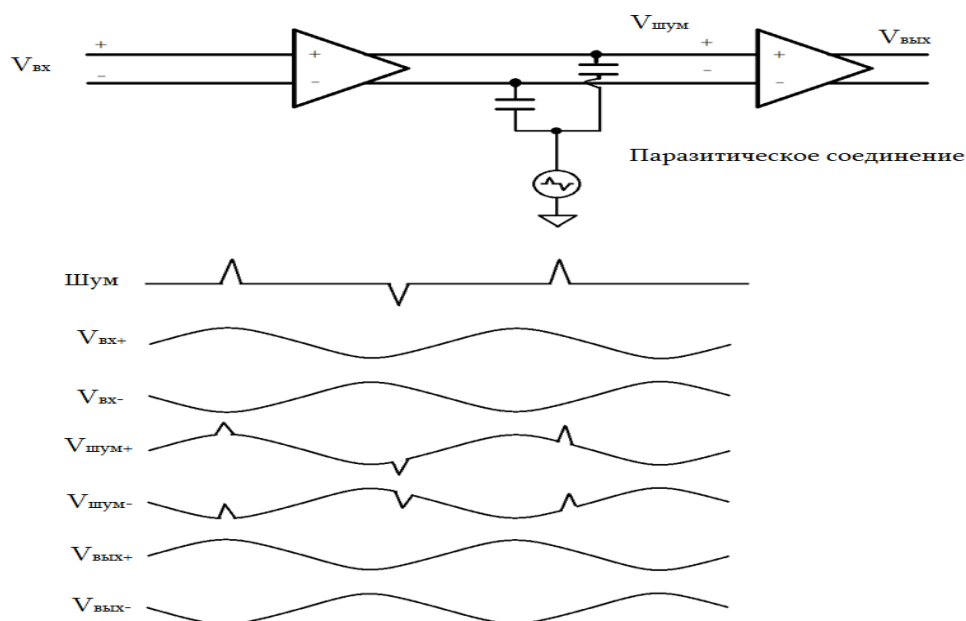


Рис.2. Разница между положительными и отрицательными узлами

Аналоговые сигналы могут допускать некоторые высокочастотные шумы, если цепи имеют узкую полосу пропускания. Таким образом, использование схем с минимальной полосой пропускания помогает избежать усиления коммутационного шума и повторной передачи. По возможности, следует избегать аналоговых цепей, которые соединяют большие переходы потока. Вместо того, чтобы включать и выключать токи, ими можно управлять с помощью метода управления током. Когда выключается один переключатель, должен включаться другой. Это позволяет уменьшить переходы потока при переключении (рис. 3).

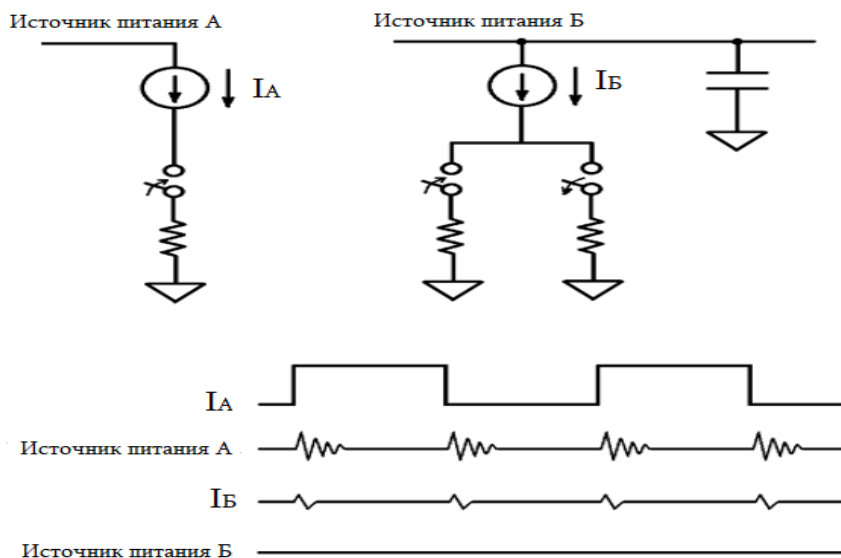


Рис. 3. Переходы потока одного переключателя (А) и двух переключателей (Б)

При включении или выключении источников питания схема с одним переключателем вызовет “ступеньки” потока в источнике питания. Эти две системы переключения будут иметь меньший переходный шум. Между двумя широко удаленными платформами на ИС есть некоторая разница. Сигнальная цепь между ними будет создавать шум сигнала из-за шума земли. В случае недифференциальных сигналов шум подложки несколько уменьшается, когда подложка близка к ее соединению (рис. 4).

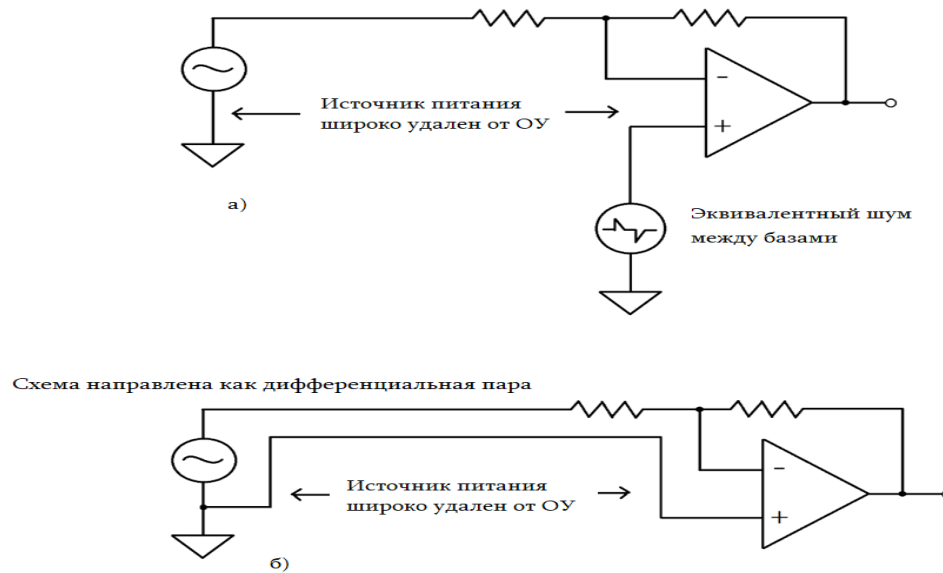


Рис.4. Схемы с добавленными к выходному сигналу фоновыми шумами (а) и без фоновых шумов (б)

В схеме рис.4а к сигналу на выходе операционного усилителя (ОУ) добавляется основной шум. В схеме рис. 4б необходимо уменьшить влияние фундаментальных шумов. Дополнительным преимуществом схемы рис.4б является синфазное соединение шума с сигнальным трактом. Таким образом, шум снижается за счет степени сжатия синфазного сигнала ОУ.

Разделение соединений источника питания и подложки на цифровую и аналоговую секции улучшает изоляцию источника питания. Аналоговые ячейки, которые используют большие переходы тока, должны быть рассмотрены для независимого соединения питания/земля. Чтобы, по возможности, избежать переходов пускового тока на источнике питания, необходимо рассмотреть метод управления током при проектировании этих цепей.

На рис. 5 показаны возможные ситуации взаимосвязей. В схеме рис.5а показана стабилизация мощности. Любой переходный ток напрямую преобразуется в шум. Это связано с сопротивлением межсоединения, сопротивлением корпуса и соединительных проводов. Улучшенная компоновка представлена в схеме рис.5б. Таким образом, устраняется внутреннее межблочное сопротивление как часть подключения источника питания аналоговой схемы. Дополнительные схемы представлены схемами на рис. 5в и г. Переключение с источника аналоговой схемы на цифровой переключатель не обеспечивает пути для шума. Необходимо учитывать независимые соединения для любых аналоговых цепей, вызывающих переходные процессы.

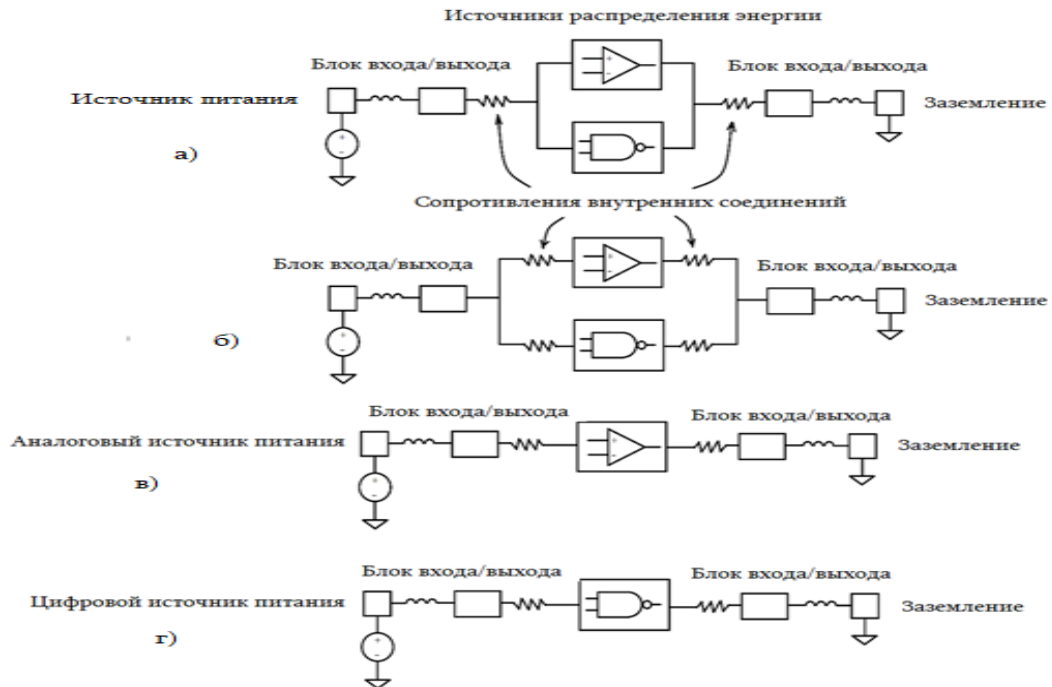


Рис. 5. Разделение соединений аналоговых и цифровых схем: а – схема стабилизации мощности, б - улучшенная компоновка, в,г – дополнительные схемы

На высоких частотах индуктивность межсоединений снижает эффективность любого внешнего фильтра. На рис. 6 показана сеть, включающая высокочастотную модель для межблочных сопротивлений и внешних конденсаторов.

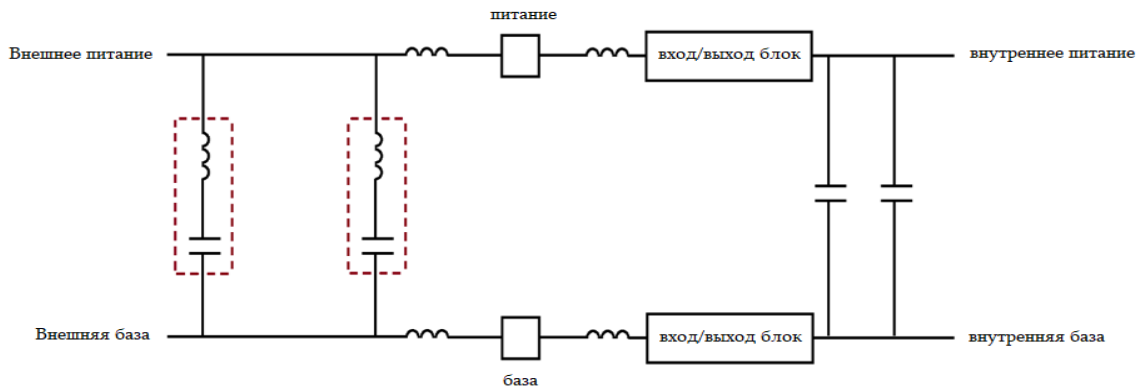


Рис.6. Высокочастотная модель конденсаторно-индуктивной сети

Конденсаторы необходимы для фильтрации высоких частот, их внутренняя емкость необязательно должна быть большой. Но и они должны служить фильтром таким образом, чтобы не было необходимости вставлять межблочную индуктивность. Наличие активных цепей и межсоединений означает наличие некоторой внутренней фильтрации между цепями тока из-за паразитных явлений.

Во второй главе представлены разработанные способы и даются решения проблем, описанных в первой главе.

Способ повышения помехоустойчивости кольцевого ГУНа. Эксперименты проводились на кольцевом ГУН. Основным компонентом этого генератора являются инверторы. Причиной возникающих шумов являются вторичные эффекты, вызванные изменением входного сигнала инвертора во время увеличения/уменьшения выходного сигнала. На сигнал также влияет паразитная способность транзисторов. Кроме того, поскольку каждый слой кольцевого ГУН имеет транзисторы-источники тока (транзистор р-типа, подключенный к источнику питания, и транзистор n-типа, подключенный к земле), то проходящий через них ток также может вызвать нежелательные искажения сигнала (чем больше ток, проходящий через транзисторы, тем сильнее будут искажения). Исходная схема закольцованного ГУН показана на рис 7.

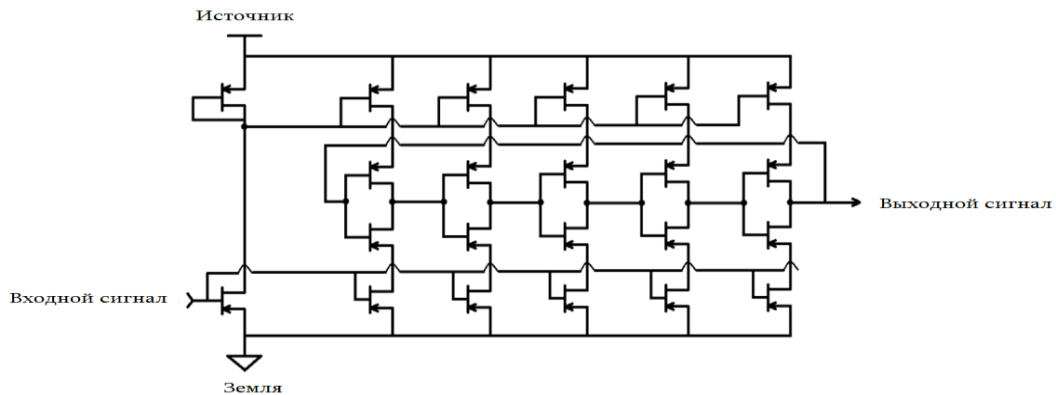


Рис.7. Первичная схема кольцевого ГУН

Принцип данного способа заключается в добавлении резисторов и конденсаторов вблизи всех слоев ГУН. Модифицированный циркуляционный слой ГУНа изображен на рис 8.

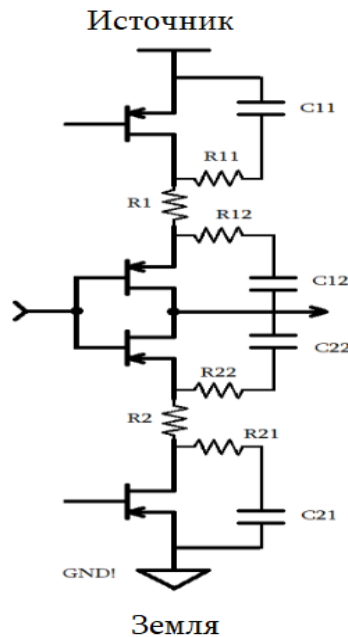


Рис. 8. Один слой кольцевого ГУНа с шумоподавляющими резисторами и конденсаторами

Конденсаторы C11, C12, C21 и C22 используются для малого увеличения времени нарастания/спада сигнала и предотвращения шума. Высокоомные резисторы R11, R12, R21 и R22 используются для подавления способности конденсаторов сдвигать частоту сигнала и помогают поддерживать точную частоту. Резисторы R1 и R2 имеют небольшое сопротивление, чтобы обеспечить малое падение напряжения. Это также помогает избежать шума.

Инвертор используется для получения прямоугольного сигнала, но, поскольку он также может влиять на выходную частоту, значения конденсаторов и резисторов учитываются и для этого фактора. Предлагаемая общая схема показана на рис 9.

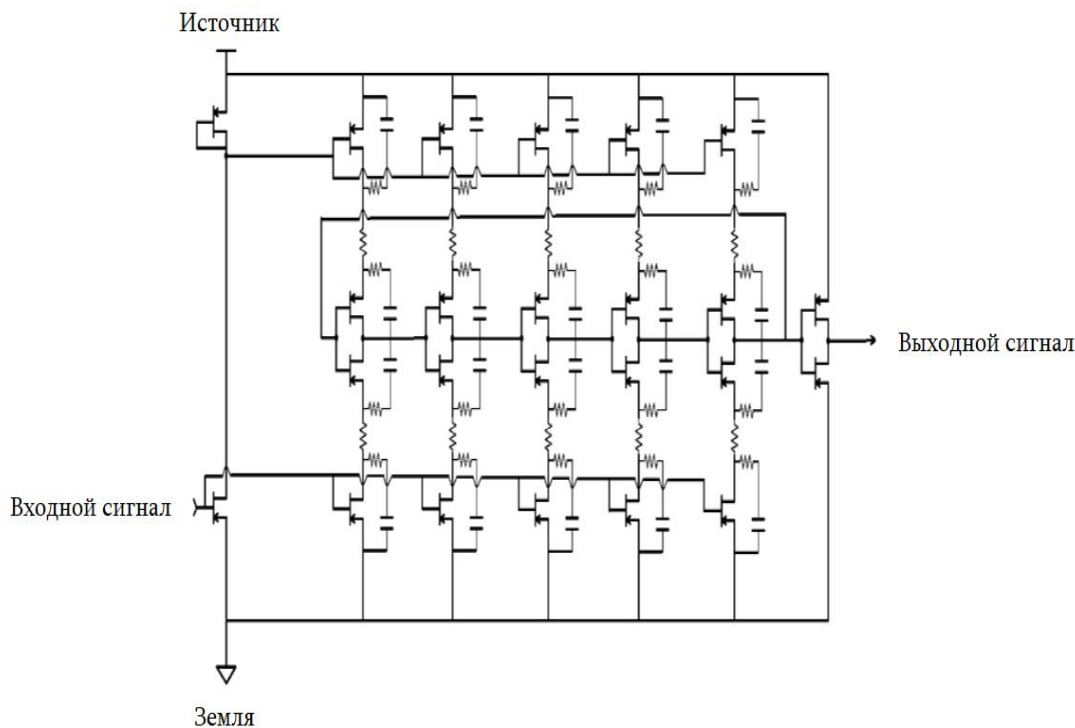


Рис.9. Оптимизированная схема кольцевого ГУН

Напряжение питания кольцевого ГУН, разработанного по 32-нанометровой технологии, составляет 2,5 В. Представленные результаты получены симуляциями проведенных в температуре 25⁰С.

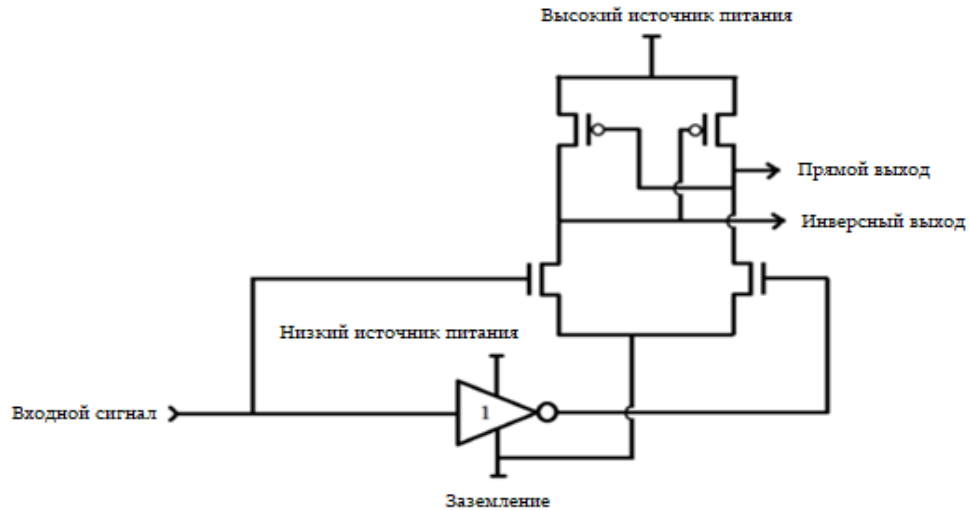
В первичной схеме выходной сигнал больше напряжения питания на определенную величину. Ошибка амплитуды из-за шума составляет 4% - при входном напряжении 0,9 В и 8,5% -при входном напряжении 2,5 В.

В оптимизированной схеме ошибка амплитуды из-за шума составляет 0% - при входном напряжении 0,9 В и 3,1% - при входном напряжении 2,5 В. Выходная частота изменяется от 200 МГц до 1,22 ГГц, в зависимости от входного напряжения. Таким образом, в новой схеме шумы снижаются на 51% в худшем случае.

Выходные характеристики исходного и улучшенного кольцевого ГУН отличаются всего на 0,009%. При использовании данного способа площадь схемы увеличивается на 18%, а потеря энергии увеличивается на 4,4%.

Способ повышения помехоустойчивости ступенчатого преобразователя напряжения от низкого до высокого источника питания. Схема преобразователя низкого напряжения в высокое имеет некоторые компоненты, создающие шум на выходе, величина которого увеличивается по мере увеличения амплитуды напряжения на выходе. Чем сложнее схема повышающего преобразователя, тем больше будет выходной шум. Таким образом, необходимо использовать подход, который будет создавать бесшумные выходные сигналы в преобразователе низкого напряжения в высокое.

Эксперименты проводились на схеме ступенчатого преобразователя, представленной на рис.10.



*Рис.10. Первичная схема повышающего преобразователя низкого напряжения в высокое
(1 - инвертор)*

Подход, который поможет получить бесшумные выходные сигналы, заключается в использовании переключателя между прямым и инвертирующим выходами, чтобы он размыкался на очень короткое время при переключении входа и компенсировал шумы прямого и инвертирующего выходов короткими замыканиями. Ключ должен быть закрыт во время поступления постоянного сигнала.

На вход подключены две цепочки с конденсатором и резистором. Одноконтурный резистор подключен к земле, и переход между конденсатором и резистором кратковременно достигает высокого напряжения, когда входной сигнал изменяется от 0 до низкого напряжения. Этот узел подключен к транзистору n-типа передаточного ключа, который, входя в режим триода, компенсирует шумы прямого и инверсного выходов при нарастании сигнала.

Резистор во второй цепочке также подключен к источнику высокого напряжения, и напряжение перехода между резистором и конденсатором ненадолго падает ниже высокого напряжения, когда входной сигнал падает с низкого напряжения до 0. Этот переход подключен к p-транзистору ключа, и транзистор, появляясь в режиме триода, компенсирует шумы прямого и инверсного выходов при уменьшении сигнала. Использование этого способа приводит к более тихому выходному сигналу без увеличения времени задержки. Оптимизированная схема повышающего преобразователя напряжения показана на рис. 11.

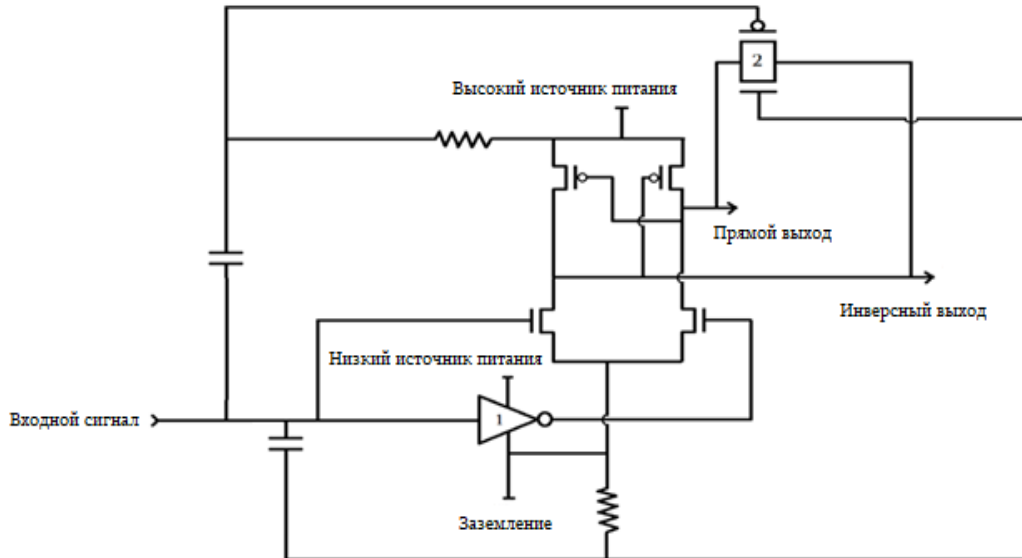


Рис. 11. Оптимизированная схема повышающего преобразователя низкого напряжения в высокое (1 – инвертор, 2 – переключатель)

Повышающий преобразователь низкого напряжения питания в высокое, разработанный по 32-нанометровой технологии, имеет высокий источник питания - 3,3 В и низкий источник питания - 1,2 В. Частота сигнала составляет 1 ГГц. При использовании данного способа шумы уменьшились на 68%, площадь схемы увеличилась на 14%, а потеря энергии увеличивается на 7%. Представленные результаты получены симуляциями проведенных в температуре 25⁰С.

Способ повышения помехоустойчивости ЦАП с резисторной цепочкой. Способ был протестирован на ЦАП с 4-разрядной резисторной цепочкой R-2R. Исходная схема ЦАП показана на рис.12. Когда первые входы имеют высокое значение, ток, идущий на выходной резистор корпуса, мал, и дефекты ОУ очень мало влияют на выходной сигнал, и поэтому шум на выходе незначителен.

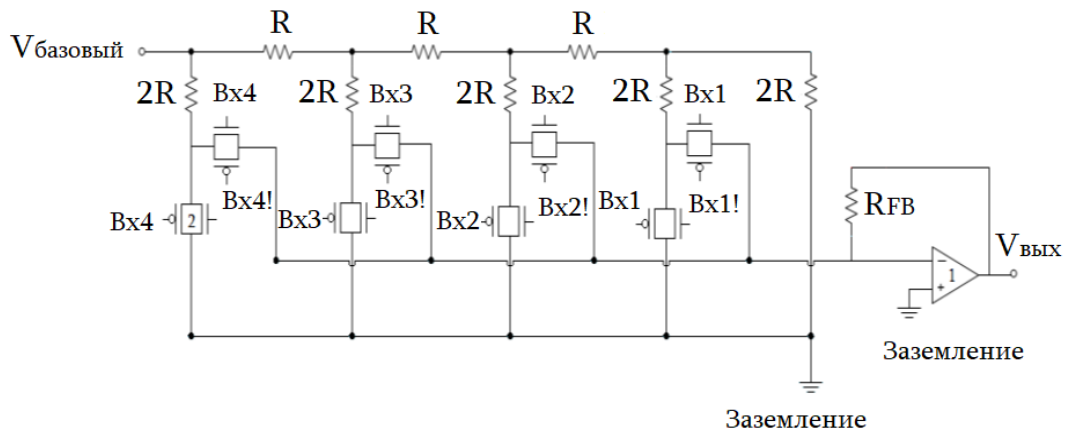


Рис. 12. Первичная схема 4-разрядного ЦАП с R-2R резисторной цепочкой (1 – ОУ, 2 - переключатель)

Но мгновенное увеличение тока в резисторной цепочке вызывает небольшое изменение отрицательного входа ОУ, и выходной сигнал будет иметь ошибку интегральной нелинейности (ОИН) при низких напряжениях. В случае когда входы с высокой скоростью передачи данных получают высокие значения, высокое выходное напряжение, создаваемое большим током, который индуцируется, может иметь несоответствие со значением напряжения, которое генерировалось бы с помощью ОУ, и, таким образом, высокое выходное напряжение будет иметь проблемы с шумом.

Выходная характеристика первичной схемы ЦАП с R-2R резисторной цепочкой показана на рис.13.

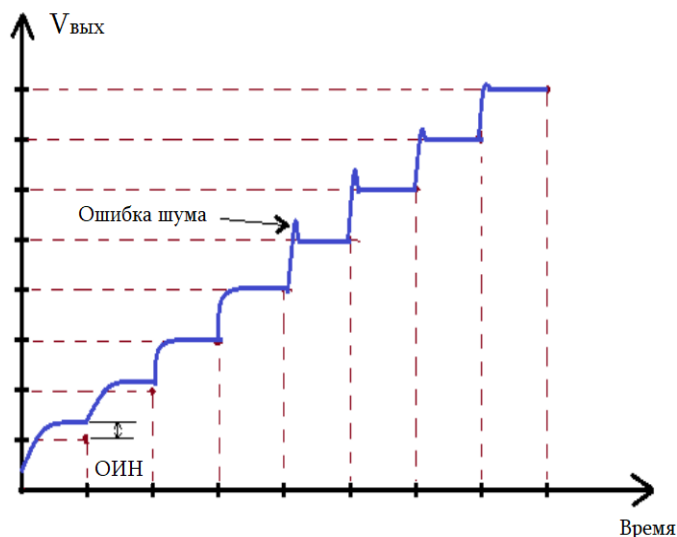


Рис.13. Выходная характеристика первичной схемы ЦАП с R-2R резисторной цепочкой

Для получения точного выходного сигнала в ЦАП с R-2R резисторной цепочкой необходимо избегать наличия большого тока в контуре обратной связи ОУ. Для этого вместо резистора в цепи обратной связи используется транзистор n-типа с диодным включением. Отрицательный вход ОУ подключен к другому транзистору n-типа, который зеркально соединен с первым транзистором, кроме того, он имеет гораздо больший размер W , чем первый транзистор. Итак, ток, поступающий от цепочки R-2R, распределяется между двумя транзисторами. Ток через второй транзистор намного больше, чем ток через первый транзистор, из-за его больших размеров, но ток через него прямо пропорционален току через транзистор, включенный через диод, по закону токового зеркала. Второй транзистор n-типа подключен к другому токовому зеркалу, состоящему из транзисторов p-типа, которые создают точное выходное напряжение на выходном резисторе. Транзисторы p-типа также имеют разницу в размерах и умножают ток, поступающий от транзистора n-типа, на такой коэффициент, чтобы выходное напряжение формировалось в той же амплитуде напряжения, что и у первичной схемы. Усовершенствованная схема 4-разрядного R-2R ЦАП показана на рис.14.

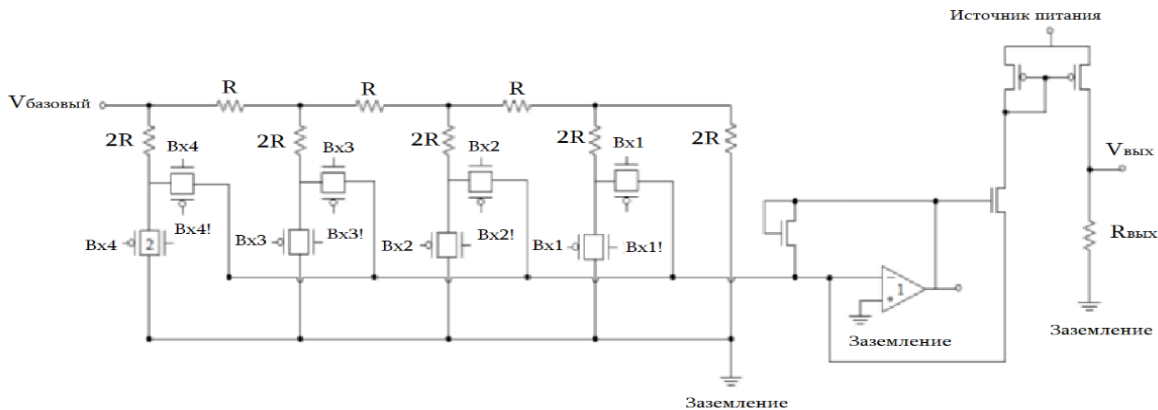


Рис.14. Оптимизированная схема 4-разрядного ЦАП с R-2R резисторной цепочкой (1 – ОУ, 2- переключатель)

Выходная характеристика оптимизированной схемы ЦАП с R-2R резисторной цепочкой показана на рис.15.

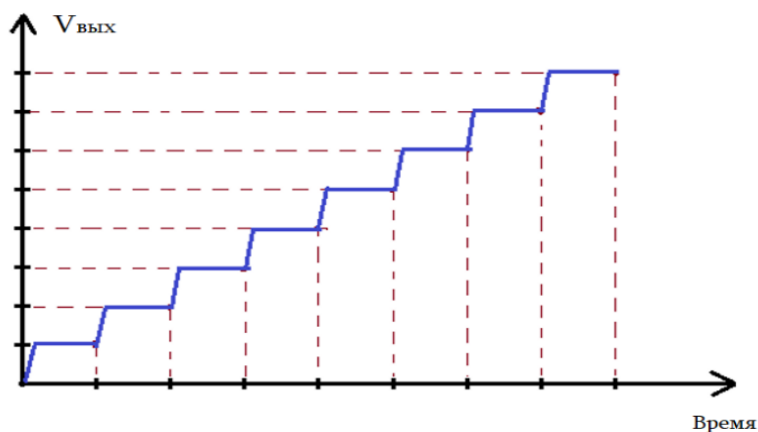


Рис.15. Выходная характеристика оптимизированной схемы ЦАП с R-2R резисторной цепочкой

В 4-разрядном ЦАП, разработанном по 32-нанометровой технологии, базовое напряжение составляет - 1 В, а источник питания - 2,5 В. В первичной схеме ОИН составляет 0,2 В, а ошибка шума - 0,065 В. В оптимизированной схеме ОИН составляет 0,02 В, а ошибка шума - 0,005 В. Площадь схемы увеличивается на 7%, шумы уменьшаются на 22%, а потеря энергии увеличивается на 15%. Таким образом, способ не только уменьшает выходные шумы, но и корректирует ошибку интегральной нелинейности. Представленные результаты получены симуляциями проведенных в температуре 25⁰С.

В третьей главе представлено разработанное программно-инструментальное средство “Mixed Signal Noise Immunity”, которое позволяет повысить помехоустойчивость простыми решениями или выбрать способ уменьшения выходных шумов для соответствующей ИС.

На начальном этапе выбираются стандарты передачи данных, технические параметры которых должна соблюдать ИС (рис. 16).

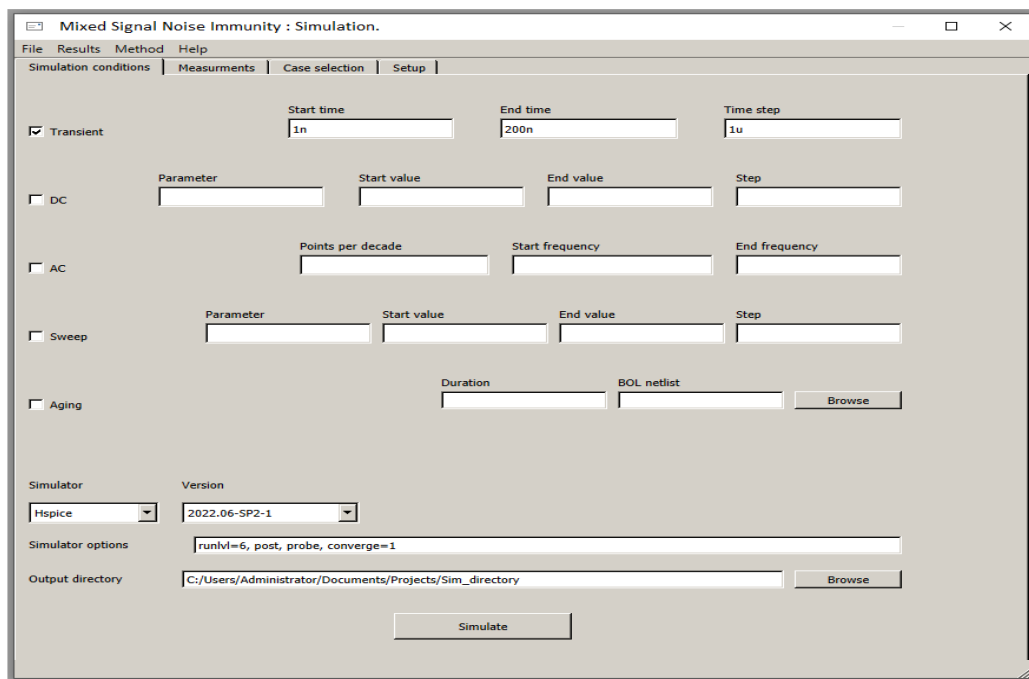


Рис.16. Окно ввода данных

Принцип программы заключается в том, что для повышения помехоустойчивости используются два подраздела. В первом можно использовать обычные способы для уменьшения шума, например, выходной конденсатор или буфер. Эти устройства выбираются для всех выходов данной схемы. Второй подраздел представляет собой набор способов повышения помехоустойчивости для шести разных схем. В случае, если схема, полученная из взятого схемотехнического описания, совпадает с соответствующей схемой одного из этих способов, то этот способ можно использовать для минимизации схемы. Проверка того, совпадает ли схемотехническое описание с одной из схем, делается с помощью идентификации взятого схемотехнического описания и схем, соответствующих доступным способам. Представленные способы разработаны для кольцевых и аудиочастотных ГУН, для схем ЦАП с R-2R резисторной цепочкой и флеш-АЦП, для мультиплексора и повышающего преобразователя низкого напряжения в высокое.

Схема мультиплексора 8:1 использовалась для оценки эффективности ПС “Mixed Signal Noise Immunity”. Разработка и моделирование были выполнены с использованием 32-нанометрового технологического процесса.

В случае одновременной коммутации двух или трех входных сигналов выходные шумы невелики, но в случае коммутации всех входов погрешность выходных шумов значительно возрастает. Было проведено сравнение результатов исходной схемы, схемы, измененной общими подходами, и схемы, измененной способом, разработанным для мультиплексора (табл. 1). Все проекты были реализованы с помощью программных средств, принадлежащих ЗАО «Синописис Армения».

Моделирование проводилось не только в температуре 25°C, но и в температурах 125°C и - 40°C. Помимо технологии 32 нм, схемы также разрабатывались по технологии 14 нм с использованием ПС. Результаты показали, что процентное увеличение уровня помехоустойчивости почти не меняется.

Таблица 1

Сравнение полученных результатов с применением особенных решений и подходов, разработанных с помощью ПС

Схемы \ Результаты	Первичная схема	Схема, оптимизированная конденсаторами	Схема, оптимизированная буферами	Схема, оптимизированная разработанным подходом
Ошибка выходного шума (%)	36	7	4	2.6
Время нарастания/спада сигнала (пс)	4	40	5	5
Время задержки сигнала (пс)	27	60	51	28,5
Потребление энергии (мВт)	10	10.4	11.8	14.4
Площадь (мкм ²)	426.2	426.9	440.6	481.7

Эти результаты можно сравнить со значениями параметров которые получились в результате применения 6-и различных подходов, разработанных для высокоскоростных схем с целью повышения помехоустойчивости в технологии 0,35 мкм (табл. 2).

Таблица 2

Результаты применения ускоренных и обычных алгоритмов в технологии 0,35 мкм в случае трех переходов (справа налево, слева направо и двунаправленный)

Алгоритм \ Результаты	Площадь (мкм ²)	Потребление энергии (мВт)	Время задержки сигнала (нс)
Справа налево	8600	350	12.7
Слева направо	16200	600	9.6
Двунаправленный	13300	550	6.2
Ускоренно справа налево	10700	400	5.9
Ускоренно слева направо	17700	760	4.9
Ускоренно двунаправленный	14500	590	3.4

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

- Предложены способы повышения помехоустойчивости интегральных схем со смешанными сигналами, отвечающие современным требованиям. Учитываются требования при уменьшении шумов не создавать других искажений сигнала и важность изменения площади в допустимых пределах. Пути подходов основаны на повышении помехоустойчивости схемы за счет обхода проблем нестабильностей из-за больших токов, шумового эффекта больших входных комбинаций и чувствительности сигнала.
- Предложены способы повышения помехоустойчивости кольцевого и аудиочастотного ГУНа. Показано, что в случае кольцевого ГУНа, с помощью добавления конденсаторов фильтрующих шумы и резисторов сохраняющих частоту сигнала в каждом инвертирующем слое, шумы уменьшаются на 51%, площадь схемы увеличивается на 18%, потеря энергии увеличивается на 4,4%, а в случае аудиочастотного ГУНа, с помощью замены выходного ОУ с триггером Шмидта в котором низкое и высокое напряжения переключения соответствует диапазону напряжений входного сигнала выходного ОУ первой схемы для сохранения частоты сигнала, а также за счет добавления буфера для получения аккуратного выходного сигнала, шум уменьшается на 30%, площадь схемы снижается на 28%, а потеря энергии увеличивается на 17% ([2,7]).
- Предложены подходы повышения помехоустойчивости флэш-АЦП и ЦАП с R-2R резисторной цепочкой. Показано, что в случае схемы флэш-АЦП, с помощью применения дополнительных компараторов и зеркал тока для получения по возможности малых входных переключений у энкодера, и таким образом достижения уменьшения шумов в общей схеме, шумы уменьшились на 63%, а площадь схемы увеличилась на 72%, а потеря энергии увеличивается на 37%; в случае ЦАПа с R-2R резисторной цепочкой, для уменьшения шумов появляющихся из-за большого тока в обратной связи ОУ использовались транзистор подключенный в диодном режиме для проведения малого тока а также выходное зеркало тока, и в результате шумы уменьшились на 22%, площадь схемы увеличилась на 7%, а потеря энергии увеличивается на 15% ([3,6]).
- Предложены способы повышения помехоустойчивости ступенчатого преобразователя напряжения и мультиплексора. Показано, что в случае ступенчатого преобразователя напряжения, с помощью кратковременного замыкания переключателя, включенного между прямым и инвертирующим выходами за счет добавления конденсаторов и резисторов у входа, шумы уменьшились на 68%, площадь схемы увеличилась на 14%, а потеря энергии увеличивается на 7%; в случае мультиплексора, с помощью кратковременного замыкания выходных транзисторов n-типа, за счет добавления входных компараторов, шумы уменьшились на 59%, площадь схемы увеличилась на 28%, а потеря энергии увеличивается на 16% ([4,5]).
- Предложенные подходы и схемотехнические решения были реализованы в программном средстве (ПС) Mixed Signal Noise Immunity, которое внедрено в ЗАО «Синописис Армения» и используется для повышения помехоустойчивости

интегральных схем со смешанными сигналами. Испытания показали, что ПС Mixed Signal Noise Immunity позволяет сократить продолжительность процесса проектирования схемы в 8...12 раз, уменьшить погрешность выходного шума в среднем на 48%, вместе с тем обеспечив минимально возможное изменение времени нарастания/спада сигнала, времени задержки и частоты за счет повышения потребления энергии на 44% и площади поверхности на 13%.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. On the unusually high photosensitivity of two barrier structures / **A.K. Vaseashta, S.Kh. Khudaverdyan, G.E. Ayvazyan, L.A. Matevosyan, S.H. Tsaturyan, H.A. Babajanyan** // Applied Physics B: Lasers and Optics. - May 21, 2023. – P. 101-106.
2. **Babajanyan H.A.** The Output Noise Reduction of Ring Voltage-Controlled Oscillator // Bulletin of National Polytechnical University of Armenia: Collection of Scientific Papers.- Radio Engineering and Connection. - 2022. – Part 1.- P. 298 - 305.
3. **Babajanyan H.A.** The output noise reduction of a Flash Analog-Digital Converter // Proceedings of the Republic of Armenia National Academy of Sciences and National Polytechnic University of Armenia. Series of Technical Sciences. - 2022.- V. 75, No 2. – P. 283 - 293.
4. **Babajanyan H.A., Khudaverdyan S.Kh.** The output noise reduction of the Multiplexer // Proceedings of National Polytechnical University of Armenia: Information Technologies, Electronics, Radio Engineering.- 2022.- No 2. - P. 99 - 108.
5. **Babajanyan H.A., Khudaverdyan S.Kh.** The output noise reduction of a low-to-high supply voltage level-shifter // Proceedings of the Republic of Armenia National Academy of Sciences and National Polytechnic University of Armenia. Series of Technical Sciences. – 2022.- V. 75, No 4. - P. 539 – 547.
6. **Babajanyan H.A.** The output noise reduction of the R-2R resistor ladder Digital-Analog Converter // Proceedings of the Republic of Armenia National Academy of Sciences and National Polytechnic University of Armenia. Series of Technical Sciences. - 2023.- V. 76, No 1. - P. 67-76.
7. **Бабаджанян А.А., Худавердян С.Х.** Улучшение аудиочастотного генератора, управляемого напряжением // Известия Высших учебных заведений. Электроника // МИЭТ.- 2023. – No 4. - С. 1-12.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Բազմաթիվ սպառողական ապրանքների, օրինակ՝ բջջային հեռախոսների և ձեռքի համակարգիչների համար պահանջվում են ն՝ թվային, և՛ անալոգային սխեմաներ: Արդի չիպերում տեղակայված համակարգը, ընդհանուր առմամբ, բազմաչիպային համակարգերի հետ համեմատած, ունի էլեկտրասպառման առավելություններ: Թվային մուտքերի ազդանշանի փոփոխությունն առաջացնում է աղմուկ, որը հայտնի է որպես հիմնային աղմուկ և հիմքի միջոցով տարածվում է այլ սխեմաներում: Անալոգային սխեմայում ստացված հիմնային աղմուկը խանգարում է սխեմայի պատշաճ աշխատանքին: Դա լրջագույն խնդիր է բազմաթիվ խառը-ազդանշանային ինտեգրալ սխեմաներում:

Բազմաթիվ թվային մուտքերի ազդանշանային փոփոխությունների ժամանակ, մեծ թվով հանգույցներում ազդանշանի լարումները փոխվում են ակնթարթորեն: Օրինակ, տվյալ հանգույցում ազդանշանի լարումը 0 արժեքից տասնյակ պիկովայրկյաններում կարող է փոխվել սնուցման լարման արժեքին: Արագ փոխանջատումը սնման դողերի գծերում առաջացնում է մեծ հոսանքներ: Միջմիացումներն իրենց մեջ ներառում են բազմաթիվ մակաբուծային ունակություններ և ինդուկտիվություններ: Մակաբուծային ունակություններ կան նաև չիպի սնման դողերի գծերում: Ընթացիկ թռիչքաձև փոփոխությունները միջմիացումների դիմադրության հետ միասին հանգեցնում են միկրոսխեմաների ազդանշանի հաղորդման գծերում լարման տատանումների: Այդ լարման տատանումները հայտնի են որպես միաժամանակյա անջատման աղմուկներ (ՄԱԱ): Թվային նմուշներում ՄԱԱ - ը կարող է հանգեցնել անսարքության:

Առկա են խառը ազդանշանային ինտեգրալ սխեմաներում աղմուկի նվազեցման մի շարք մեթոդներ: Խնդիրը, ինչպես նաև հնարավոր լուծումները կօգնեն նախագծողին՝ մշակելու ինտեգրալ սխեմաներ, որոնցում աղմուկի առաջացման վտանգները հնարավորինս նվազեցված կլինեն: Արդի մեթոդներով հիմնականում նվազեցվում են այն աղմուկի աղբյուրները, որոնք առաջանում են սխեմայի կառուցվածքի և տեղաբաշխման թերությունների պատճառով: Այդ խնդիրները լուծելուց հետո նախագծողները պետք է ուշադրություն դարձնեն սխեմայի տարրերի տեղաբաշխմանը, միջմիացումների սնման աղբյուրի և հիմքի ընտրությանը:

Ատենախոսությունը նվիրված է խառը-ազդանշանային ինտեգրալ սխեմաների աղմկակայունության բարձրացման միջոցների մշակմանը, որոնց միջոցով սխեմայի աշխատանքային գործընթացը կլինի ավելի անթերի:

Խառը ազդանշանային ինտեգրալ սխեմաների աղմկակայունության բարձրացման միջոցների մշակումը արդիական է թե՛ գիտական հետաքրքրություն ներկայացնող խնդիրների լուծման և թե՛ կիրառական նշանակություն ունեցող էլեկտրոնային սարքերի լավարկման տեսանկյունից:

Մշակվել են խառը ազդանշանային ինտեգրալ սխեմաների աղմկակայունության բարձրացման եղանակներ, որոնք բավարարում են ժամանակակից պահանջները: Հաշվի

են առնվել աղմուկների նվազեցմամբ այլ ազդանշանային աղավաղումներ չառաջանալու պահանջը և սխեմայի մակերեսը թույլատրելի սահմաններում փոփոխելու կարևորությունը: Մոտեցումների ուղիները հիմնված են մեծ հոսանքներից առաջացած անկայունության, մուտքային մեծ կոմբինացիայով փոխանջատումների և ազդանշանային զգայունության խնդիրների շրջանցմամբ սխեմայի աղմկակայունության բարձրացման վրա:

Մշակվել են աղմկակայունության բարձրացման եղանակներ օղակավոր և աուդիո-հաճախականային ԼՂԳ-ի սխեմաների համար: Օղակաձև օսցիլատորի սխեմայում շրջիչ շերտերում աղմուկները ֆիլտրող կոնդենսատորների և ազդանշանի հաճախությունը պահպանող ռեզիստորների ավելացման շնորհիվ՝ աղմուկները նվազում են 51%-ով, մակերեսը մեծանում է 18%-ով, էներգասպառումը աճել է 4.4%-ով, իսկ աուդիո-հաճախականային սխեմայում, որտեղ ազդանշանի հաճախության պահպանման համար էլքային օպերացիոն ուժեղարարը փոխարինվել է Շմիդտի տրիգերի հետ, որը իր ցածր և բարձր փոխանջատման լարումներով համապատասխանում է առաջին սխեմայի էլքային օպերացիոն ուժեղարարի մուտքային ազդանշանի լարման տիրույթին, ինչպես նաև անաղմուկ էլքային ազդանշան ստանալու համար կրկնիչի ավելացման շնորհիվ աղմուկները նվազել են 30%-ով, սխեմայի մակերեսը փոքրացել է 28%-ով, էներգասպառումը աճել է 17%-ով:

Առաջարկվել են ֆլեշ ԱԹՓ-ի և R-2R ռեզիստորային սանդուղքով ԹԱՓ-ի համար աղմկակայունության բարձրացման մոտեցումներ: Ֆլեշ ԱԹՓ-ի սխեմայում էնկոդերի մուտքային փոխանջատումները նվազեցնելու և ըստ այդմ աղմուկները նվազեցնելու համար ավելացված լրացուցիչ համեմատիչների և հոսանքի հայելու շնորհիվ էլքային աղմուկները նվազել են 63%-ով, մակերեսը մեծացել է 72%-ով, էներգասպառումը աճել է 37%-ով, իսկ R-2R ռեզիստորային սանդուղքով ԹԱՓ-ի սխեմայում օպերացիոն ուժեղարարի հետադարձ կապում մեծ հոսանքների պատճառով առաջացած աղմուկների նվազեցման համար փոքր հոսանք անցկացնող դիոդային ռեժիմով միացված տրանզիստորի և նրան միացված հոսանքի հայելու ավելացման շնորհիվ էլքային աղմուկները նվազել են 22%-ով, մակերեսը մեծացել է 7%-ով, էներգասպառումը աճել է 15%-ով:

Ստացվել են աղմկակայունության բարձրացման եղանակներ ԼՄՓ-ի և մուլտիպլեքսորի համար: ԼՄՓ-ի սխեմայում մուտքային փոխանջատման ժամանակ մուտքին միացված կոնդենսատորների և ռեզիստորների միջոցով ուղիղ և ինվերս էլքերի միջև միացված փոխանջատիչի կարճատև բացման շնորհիվ՝ աղմուկները նվազել են 68%-ով, մակերեսը մեծացել է 14%-ով, իսկ էներգասպառումը աճել է 7%-ով: Մուլտիպլեքսորի դեպքում մուտքային փոխանջատման ժամանակ մուտքերին միացված համեմատիչների միջոցով էլքում ավելացած ո-տիպի տրանզիստորների կարճատև բացման շնորհիվ աղմուկները նվազել են 59%-ով, մակերեսը մեծացել է 28%-ով, իսկ էներգասպառումը աճել է 16% -ով:

Առաջարկվող մոտեցումները և սխեմատեխնիկական լուծումներն իրագործվել են Mixed Signal Noise Immunity ծրագրային միջոցում, որը ներդրվել է «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ-ում և կիրառվում է խառը ազդանշանային ինտեգրալ սխեմաների աղմկակայունության բարձրացման նպատակով: Փորձարկումները ցույց են տվել, որ Mixed Signal Noise Immunity ծրագրային միջոցը թույլ է տալիս 8...12 անգամ նվազեցնել սխեմատեխնիկական նախագծման գործընթացի տևողությունը, փոքրացնել ելքային աղմուկների սխալանքը միջին չափով 48%-ով՝ ապահովելով ազդանշանի բարձրացման/իջեցման, ուշացման ժամանակների և հաճախության հնարավորինս քիչ փոփոխությունը՝ էներգասպառման 44% և մակերեսի 13% աճի հաշվին:

HAYK ALEKSANDRI BABAJANYAN

**DEVELOPMENT OF MEANS TO INCREASE THE NOISE RESISTANCE OF
MIXED-SIGNAL INTEGRATED CIRCUITS**

SUMMARY

Many consumer products, such as cell phones and handheld computers, require both digital and analog circuits. Modern system-on-chips generally have power consumption advantages compared to multi-chip systems. Switching off the digital circuits causes noise, which is created on the silicon board. This noise is known as platform noise and is propagated through the platform to other circuits. In an analog circuit, received platform noise degrades the performance of the circuit. It is a major design problem in mixed-signal circuits.

When a digital circuit operates, voltages across a large number of nodes change rapidly. For example, the junction voltage can go from the 0 level to the supply voltage level in tens of picoseconds. Fast switching causes large currents in power supply lines. There are parasitic impedances and inductances due to the printed circuit board from on-chip to off-chip at the interconnects. There are also parasitic impedances in the power supply lines of the chip. Current hopping changes along with power supply resistance lead to voltage fluctuations on the power lines of the microcircuits. These voltage fluctuations are known as simultaneous switching noises (SNOs). In digital samples, the SNO can cause poor performance or malfunction.

There are a number of methods for reducing noise in circuits. The problem, as well as the possible solutions, will help the designer to produce integrated circuits in which the risks of noise generation will be reduced as much as possible. The methods mainly deal with the reduction of the noises that arise due to circuit structure and placement defects. After completing the internal work, designers should pay attention to the location of the circuit, the selection of interconnections, ground and power.

The dissertation is devoted to the development of means of increasing noise resistance of mixed-signal integrated circuits, through which the working results of the circuit will be more accurate.

The development of means of increasing the noise resistance of mixed signal integrated circuits is relevant both from the point of view of solving problems of scientific interest, and from the point of view of optimization of electronic devices of practical importance.

The means of increasing the noise immunity of mixed signal integrated circuits, which meet the modern requirements, have been proposed. The requirement of not causing other signal distortions with the reduction of noises and the importance of changing the surface of the circuit within the permissible limits are taken into account. Approaches are based on increasing the noise immunity of the circuit by circumventing the problems coming from big currents, switching with large input combinations, and signal sensitivity.

Means of increasing the noise immunity have been proposed for the circuits of the ring-oscillator VCO and audio-frequency VCO. In case of the ring oscillator, by adding noise filtering capacitors and resistors that maintain the frequency of the signal on each inverting block of the circuit, the noises are reduced by 51%, the area has increased by 18% and the power consumption has increased by 4.4%, and in case of the audio-frequency circuit, where for maintaining the signal frequency the output operational amplifier (OPAMP) is replaced with Schmitt trigger which has low

and high switching voltages corresponding to the voltage range of the input signal of the output OPAMP in the first scheme and also due to the addition of a buffer to obtain an accurate output signal, the noise is reduced by 30%, the area has reduced by 28% and the power consumption has increased with 17%.

Approaches of increasing the noise immunity for the flash ADC and the R-2R resistor ladder DAC have been proposed. By using additional comparators and current mirrors to reduce the input switching of the encoders and thus keep reduced noises in the Flash-ADC, the noises have decreased by 63%, the area has increased by 72%, and the power consumption has increased with 37%, and in case of the R-2R resistor ladder DAC, in order to reduce the noise caused by large currents in the feedback of the OPAMP, due to the addition of a diode-mode transistor carrying a small current and adding current mirror connected to it the noises have decreased by 22%, the area has increased by 7%, and the power consumption has increased 15%.

Means of increasing the noise immunity for the level-shifter and multiplexer have been proposed. In case of the level-shifter, by having a short switch in the transmission gate (TG) connected between the direct and inverting outputs with using capacitors and resistors connected to the input, the noises have decreased by 68%, the area has increased by 14%, and the power consumption has increased by 7%. In case of the multiplexer, by having a short switch in the output n-type transistors connected to the output with using XNOR cells connected to the inputs, the noises decreased by 59%, the area has increased by 28%, and the power consumption has increased by 16%.

The proposed approaches and circuit-technical solutions were implemented in the Mixed Signal Noise Immunity software tool, which was implemented in Synopsis Armenia CJSC and is used to increase the noise immunity of mixed signal integrated circuits. Tests have shown that the “Mixed Signal Noise Immunity” software tool allows to reduce the duration of the schematic design process by 8...12 times, reduce the output noise error by an average of 48%, ensuring the smallest possible change in signal rise/fall, delay times and frequency. due to a 44% increase in energy consumption and a 13% increase in surface area.

