

ВЫСОКОУРОВНЕВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ ДИСКРЕТНЫХ СИГМА-ДЕЛЬТА МОДУЛЯТОРОВ

С.Е. Хальзов^{1,2}

sergey_khalzev@srisa.ru

В.В. Макаруч^{1,2}

vvmakar@bmstu.ru

И.В. Волков²

igor_volkov@srisa.ru

С.А. Морозов²

sergey_morozov@srisa.ru

В.А. Шахнов¹

shakhnov@bmstu.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН НИЦ «Курчатовский институт»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация

Интегральные схемы сигма-дельта аналого-цифровых преобразователей в сравнении с преобразователями на основе других архитектур находят широкое применение в приборах сбора и обработки информации благодаря более высокой эффективной разрядности. Важный функциональный блок в их составе — это сигма-дельта модулятор. Рассмотрены программные инструменты высокоуровневого проектирования аналоговых дискретных сигма-дельта модуляторов. Приведен маршрут высокоуровневого проектирования схем данного типа, описаны факторы, осложняющие его. Рассмотрены наиболее часто применяемые три программных средства автоматизированного высокоуровневого проектирования аналоговых дискретных сигма-дельта модуляторов, работающих на трех разных программных платформах. Для каждого подхода к проектированию показан пример работы с программой — расчет масштабирующих коэффициентов аналогового дискретного сигма-дельта модулятора с заданными исходными параметрами. Выполнен сравнительный анализ рассмотренных программных инструментов, отмечены особенности их использования, преимущества и недостатки. Исследование показало,

Ключевые слова

Сигма-дельта АЦП, модулятор, дискретный интегратор, высокоуровневое проектирование, САПР, MATLAB, Simulink

что для более эффективного достижения целей использования представленных программных средств следует комбинировать их в маршруте проектирования. Приведены рекомендации для разработчиков аналоговых дискретных сигма-дельта модуляторов по вариантам использования рассмотренных инструментов проектирования

Поступила 20.10.2023

Принята 27.11.2023

© Автор(ы), 2024

Введение. Аналоговый сигма-дельта модулятор (СДМ) наряду с цифровым фильтром-дециматором (ЦФ) является важным функциональным узлом сигма-дельта аналого-цифрового преобразователя (СДАЦП), определяющим основные функциональные параметры АЦП этого типа. За многолетнюю историю развития СДАЦП было предложено большое число архитектур СДМ, имеющих свои преимущества и недостатки.

Параллельно с разработкой новых архитектурных и схемотехнических решений развивались средства автоматизированного высокоуровневого (на уровне функциональных блоков) проектирования СДМ.

Цель настоящей работы — проведение сравнительного анализа преимуществ и недостатков существующих программных средств автоматизированного высокоуровневого проектирования аналоговых дискретных СДМ.

Высокоуровневое проектирование аналоговых дискретных СДМ. Существуют два типа аналоговых СДМ: дискретные и непрерывные. Дискретные (*Discrete-Time*) СДМ имеют в основе конструкции фильтры на переключаемых конденсаторах. Дискретные СДМ подходят, например, для обработки дискретных сигналов с датчиков, имеющих аналоговый выход. Непрерывные (*Continuous-Time*) СДМ строятся на базе непрерывных аналоговых фильтров и применяются для обработки высокочастотных непрерывных сигналов, например, в радиоприемных устройствах [1–3].

Проектирование аналогового СДМ начинается с выбора его типа. Затем, исходя из заданных технических характеристик аналогового СДМ, таких как отношение сигнал/шум (ОСШ) СДАЦП, тактовая и максимальная частоты входного сигнала, рассчитывается его передаточная функция.

Следующим этапом проектирования является выбор архитектуры СДМ, реализующей рассчитанную передаточную функцию. Структурная схема простейшей архитектуры аналогового дискретного СДМ порядка L , получившая название «цепочка интеграторов с распределенной обратной связью», приведена на рис. 1 [4, 5].

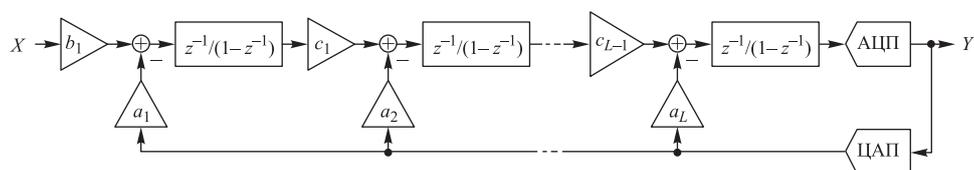


Рис. 1. Структурная схема простейшей архитектуры аналогового дискретного СДМ порядка L

Блоки (см. рис. 1), имеющие передаточную функцию вида $z^{-1}/(1 - z^{-1})$, являются дискретными интеграторами [6]. Коэффициенты $a_1, a_2, \dots, a_L, b_1, c_1, c_2, \dots, c_{L-1}$ имеют двойное функциональное назначение: они определяют характеристики СДМ как в частотной, так и во временной областях.

В частотной области эти коэффициенты определяют вид передаточной функции аналогового СДМ. В частности, с их помощью описывается шумовая передаточная функция (ШПФ, *Noise Transfer Function, NTF*), в соответствии с которой СДМ переносит шум квантования из рабочей полосы в область более высоких частот (явление передискретизации), и сигнальная передаточная функция (СПФ, *Signal Transfer Function, STF*), определяющая передачу входного сигнала модулятором без «завалов» и «подъемов» в рабочей полосе частот (единичная СПФ, *unity STF*) [1].

Во временной области указанные коэффициенты осуществляют масштабирование входного сигнала дискретных интеграторов (*dynamic-range scaling*), которые схемотехнически реализуются в виде интеграторов на переключаемых конденсаторах (ИПК), основу которых составляют операционные усилители (ОУ) [2, 3]. Выходное напряжение ОУ всегда находится в границах питания, поэтому масштабирующие коэффициенты необходимы для предотвращения выхода ИПК за эти границы, что исключает появление гармонических искажений на выходе СДМ [5, 7–9].

Таким образом, необходимо оптимизировать значения масштабирующих коэффициентов при ИПК в целях обеспечения требуемых функциональных параметров аналогового СДМ в частотной и временной областях. Решение задачи осложняется тем, что, как следует из рис. 1, для оцифровки сигнала в аналоговом СДМ используется квантователь с разрядностью от одного до четырех, т. е. АЦП (в простейшем случае одноразрядный АЦП — компаратор), а для генерации сигнала обратной связи — цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) небольшой разрядности. Иными словами, в аналоговом СДМ имеются приборы с нелинейными ха-

раактеристиками, что не дает возможности описать аналоговый СДМ линейной системой алгебраических уравнений [10, 11].

Программные инструменты для проектирования аналоговых дискретных СДМ. В настоящее время существует несколько программных инструментов для проектирования аналоговых дискретных СДМ.

1. *Delta-Sigma Toolbox*¹ — библиотека функций для системы технических расчетов *MathWorks MATLAB*.

2. *Uni Ulm Sigma-Delta Synthesis Environment*² — интернет-сайт с интерактивным программным обеспечением для онлайн-расчетов.

3. *SIMSIDES (SIMulink-based SIGma-DELta Simulator)*³ — библиотека элементов и программ для среды графического моделирования технических систем *MathWorks Simulink*.

Сравнение упомянутых программных инструментов проведем на примере высокоуровневого проектирования с помощью аналогового дискретного одноразрядного СДМ 2-го порядка, имеющего архитектуру «цепочка интеграторов с распределенной обратной связью» с максимальными частотой входного сигнала 100 кГц, допустимой амплитудой 0,9 от напряжения питания, допустимой амплитудой промежуточных (на выходах ИПК) сигналов 0,8 от напряжения питания и коэффициентом передискретизации, равным 64. Максимальное ОСШ квантования (ОСШК, *Signal-to-Quantization-Noise Ratio, SQNR*) [1, 5] разрабатываемого СДМ при максимальной амплитуде входного сигнала приблизительно равно его динамическому диапазону (*Dynamic Range, DR*) и рассчитывается согласно следующему выражению [1, 5]:

$$SQNR \approx DR = 10 \lg \left(\frac{3}{2} (2^d - 1)^2 \frac{(2L + 1) M^{2L + 1}}{\pi^{2L}} \right), \quad (1)$$

где d — разрядность квантователя, которая в этом примере равна единице; M — коэффициент передискретизации. Расчет по формуле (1) с приведенными исходными данными этого примера дает максимальное значение ОСШК разрабатываемого СДМ, равное ~ 79 дБ.

Библиотека *Delta-Sigma Toolbox* содержит порядка сотни функций для системы технических расчетов *MathWorks MATLAB*, позволяющих

¹ <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19-delta-sigma-toolbox> (дата обращения: 07.11.2023).

² <https://www.sigma-delta.de> (дата обращения: 07.11.2023).

³ <http://www2.imse-cnm.csic.es/simsides> (дата обращения: 07.11.2023).

на системном уровне, начиная с выбора архитектуры и заканчивая расчетом масштабирующих коэффициентов при интеграторах, проектировать дискретные и непрерывные СДМ с одно- и многоразрядными квантователями, с низкочастотной и полосовой характеристиками, в том числе и квадратурные СДМ. Имеется возможность расчета также некоторых типов ЦФ и дециматоров. Документация к этой библиотеке и примеры использования функций приведены в [5].

При разработке аналогового дискретного СДМ его проектирование нужно начинать с расчета ШПФ, из которой затем выводится передаточная функция петлевого фильтра [1, 5], т. е. передаточная функция цепочки интеграторов СДМ, используя которую можно рассчитать масштабирующие коэффициенты. Задача расчета ШПФ решается с помощью функции *synthesizeNTF* из рассматриваемой библиотеки.

После расчета ШПФ можно построить теоретическую зависимость ОСШК проектируемого СДМ от его входного сигнала, чтобы оценить максимальное теоретическое значение ОСШК. Рассчитать значения для этого графика можно с помощью функции *simulateSNR* из указанной библиотеки. Теоретическая зависимость ОСШК СДМ от входного сигнала приведена на рис. 2. Видно, что максимальное значение ОСШК составляет порядка 77 дБ и оно близко к значению, рассчитанному по формуле (1).

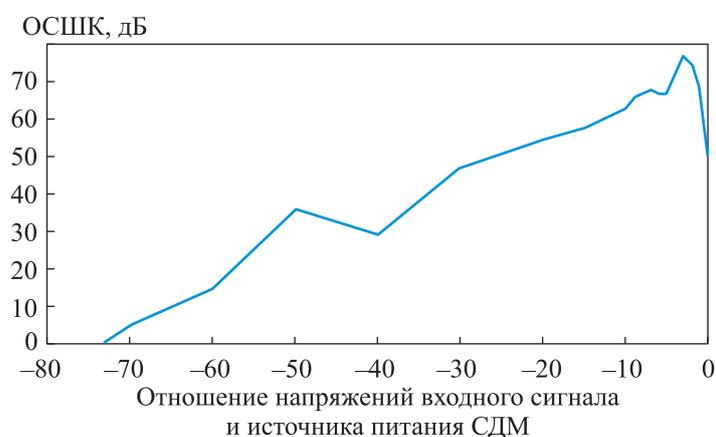


Рис. 2. Теоретическая зависимость ОСШК проектируемого СДМ от входного сигнала

Таким образом, можно реализовать рассчитанную ШПФ в выбранной архитектуре СДМ. Шаблон архитектуры СДМ «цепочка интеграторов с распределенной обратной связью» (*CIFB*), используемый в библиотеке *Delta-Sigma Toolbox*, приведен на рис. 3.

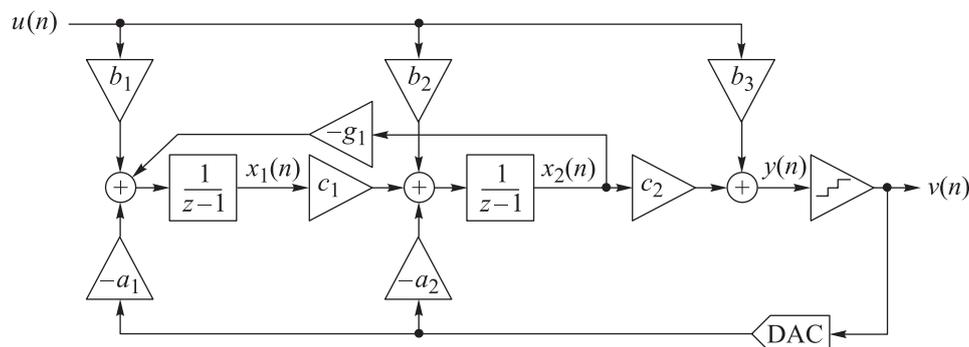


Рис. 3. Шаблон архитектуры СДМ «цепочка интеграторов с распределенной обратной связью», используемый в библиотеке *Delta-Sigma Toolbox*

Наложить ШПФ на выбранную архитектуру СДМ можно с помощью функции *realizeNTF*, которая рассчитывает масштабирующие коэффициенты СДМ без учета максимальных значений входного и промежуточных сигналов. Для корректировки масштабирующих коэффициентов в соответствии с этим требованием необходимо воспользоваться функцией *scaleABCD*. Дополнительно эта функция вычисляет максимальное значение входного сигнала. Если оно оказывается меньше значения, указанного в техническом задании на разработку СДМ, то необходимо пересмотреть его архитектуру. Рассчитанные для указанного примера значения масштабирующих коэффициентов следующие: $a_1 = 0,18$, $a_2 = 0,29$, $b_1 = 0,18$, $c_1 = 0,45$, $c_2 = 2,65$. При этом $b_2 = b_3 = g_1 = 0$.

Для проверки правильности расчета СДМ необходимо промоделировать его работу во временной и частотной областях с использованием функции *simulateDSM*. Расчет ОСШК СДМ на основе результатов моделирования его работы в частотной области выполнен с помощью функции *calculateSNR*. Результаты моделирования приведены на рис. 4.

Амплитуды сигналов на выходах интеграторов не превышают заданных значений, а плотность импульсов на выходе СДМ пропорциональна амплитуде входного сигнала (рис. 4, а). Работа СДМ по переносу значительной части спектров сигналов, отличных от спектра тестового сигнала, т. е. шума квантования, за пределы рабочей полосы частот приведена на рис. 4, б, в ней доминирует частотная составляющая тестового сигнала. По спектру выходного сигнала СДМ также можно определить его динамический диапазон, свободный от искажений (*Spurious-Free Dynamic Range, SFDR*) [1, 5]. У рассчитанного СДМ он приблизительно равен 80 дБ. Кроме того, значение ОСШК, вычисленное с помощью функции *calculateSNR*, составляет 72,4 дБ, что приблизительно равно значению,

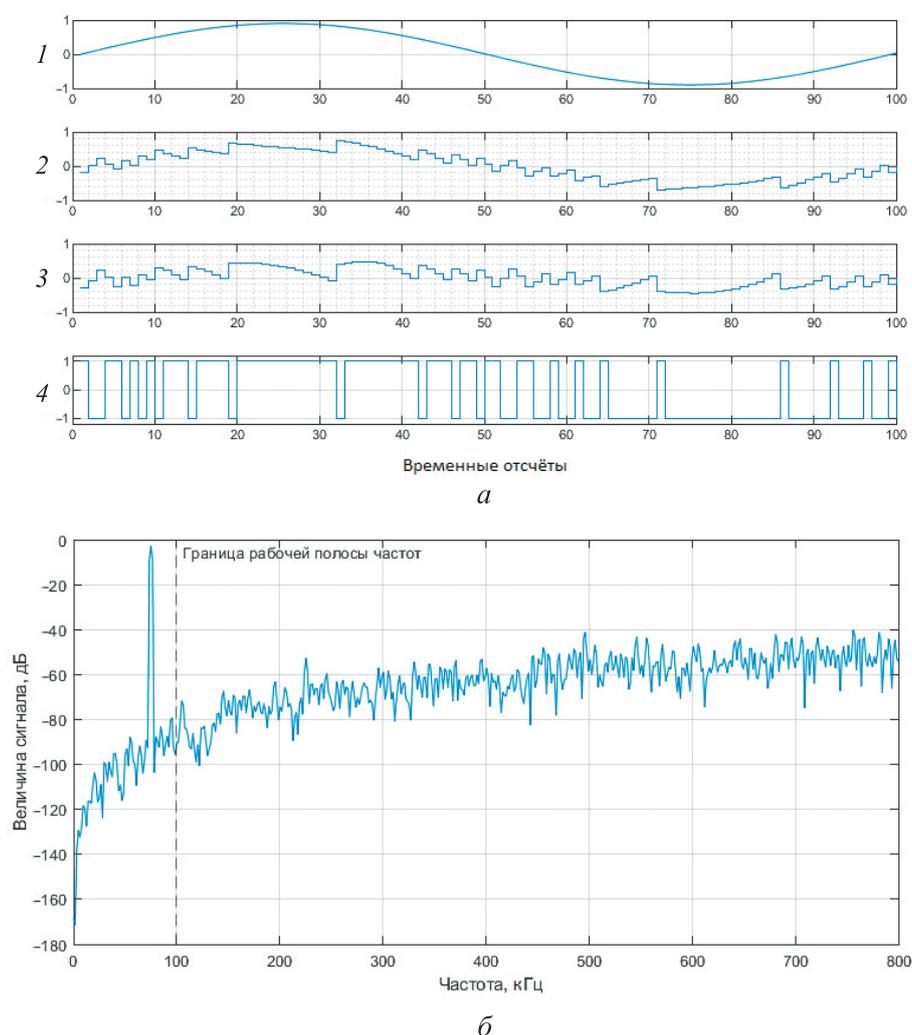


Рис. 4. Скриншот результатов моделирования работы спроектированного СДМ:
 а — временные диаграммы (1, 4 — входной и выходной сигналы;
 2, 3 — выходные сигналы первого и второго интеграторов);
 б — спектр выходного сигнала

полученному по формуле (1). Это означает, что применение библиотеки *Delta-Sigma Toolbox* позволило разработать СДМ, удовлетворяющий приведенным выше требованиям.

Интерактивная система проектирования, содержащаяся в открытом доступе в Интернете (*Uni Ulm Sigma-Delta Synthesis Environment*, далее *Sigma-Delta Synthesis Environment*), позволяет задать структуру в графическом интерфейсе и выполнить расчет и моделирование аналоговых дискретных и непрерывных СДМ, имеющих порядок вплоть до 4-го вклю-

чительно. Система позволяет проектировать дискретные СДМ с низкочастотной характеристикой, в то время как для непрерывных СДМ доступен расчет модуляторов, имеющих еще и полосовую характеристику. В данной системе также доступно проектирование инкрементальных СДАЦП (ИСДАЦП, ИАЦП, *Incremental ADC, IADC*) [12–16] как дискретного, так и непрерывного типов.

Проектирование СДМ на сайте *Sigma-Delta Synthesis Environment* начинается с выбора типа на заглавной странице. При выборе проектирования дискретного СДМ открывается окно *Create new modulator*, в котором предлагается выбрать, будет ли разработчик проектировать СДМ с низкочастотной характеристикой (*Lowpass*) или ИАЦП (*Incremental*), а также ввести исходные данные для расчета. Окно с полями, заполненными исходными данными нашего примера, приведено на рис. 5, а, сформированная структура СДМ — на рис. 5, б.

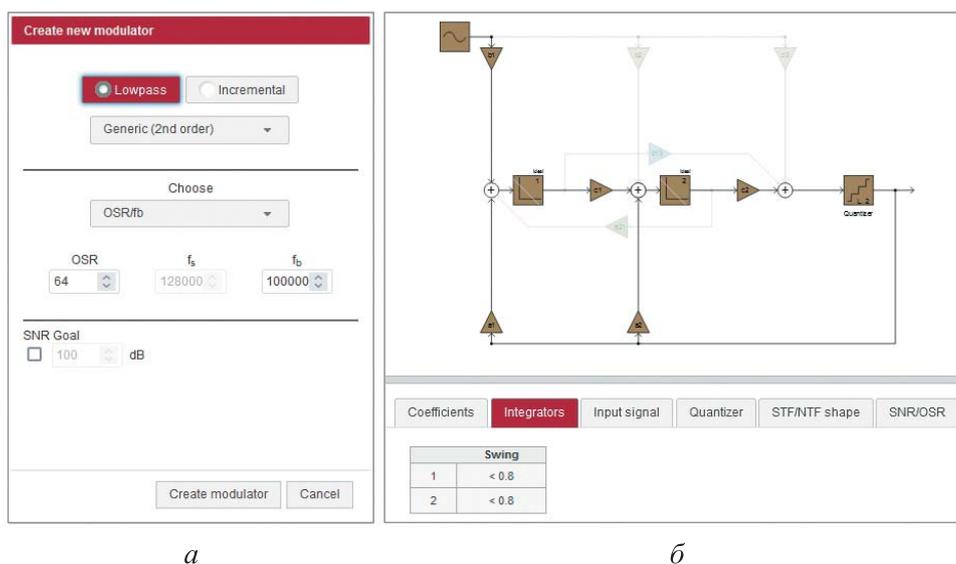


Рис. 5. Окно ввода исходных данных для расчета СДМ (а) и сконфигурированная архитектура «цепочка интеграторов с распределенной обратной связью» (б)

В нижней части окна проектирования СДМ (см. рис. 5, б) находятся вкладки, которые позволяют настроить требуемые по техническому заданию выходные параметры оптимизации СДМ, такие как диапазон перестройки значений масштабирующих коэффициентов в процессе оптимизации, диапазон допустимых значений выходных сигналов интеграторов СДМ и др.

После задания параметров оптимизации разработчик может запустить этот процесс, нажав кнопку *Optimize*. По окончании оптимизации на экране появляется окно *Results* с результатами оптимизации масштабирующих коэффициентов СДМ. Некоторые его вкладки приведены на рис. 6.

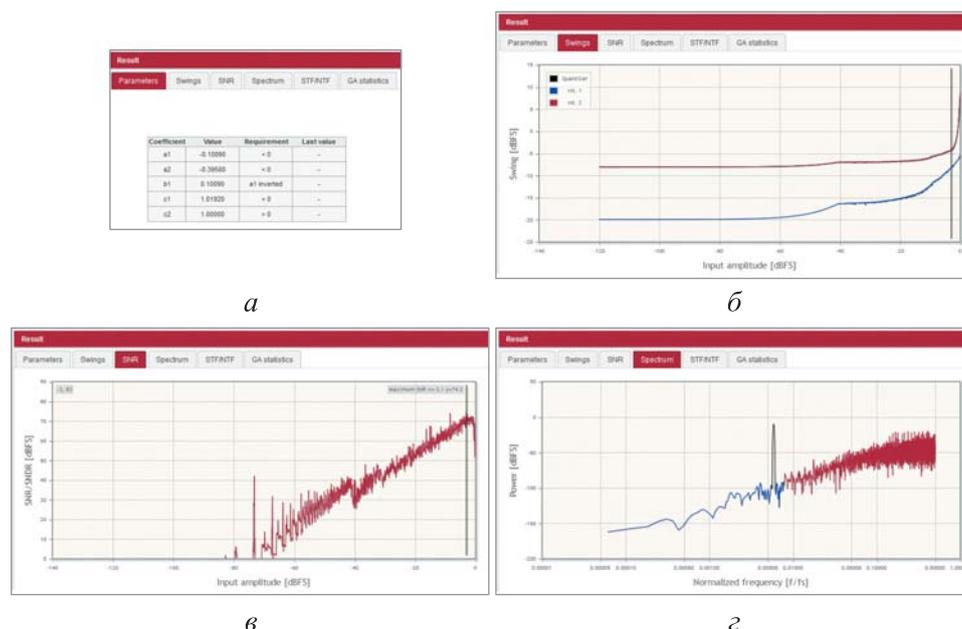


Рис. 6. Скриншоты результатов оптимизации масштабирующих коэффициентов СДМ:

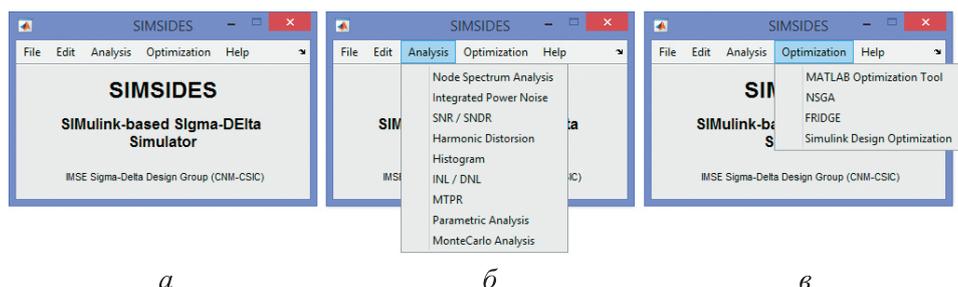
а — рассчитанные значения коэффициентов; *б* — зависимости максимальных выходных значений интеграторов рассчитанного СДМ от значения входного сигнала; *в* — зависимость ОСШ рассчитанного СДМ от значения входного сигнала; *г* — спектр выходного сигнала рассчитанного СДМ

Таблица с коэффициентами рассчитанного СДМ приведена на рис. 6, *а*. Зависимости максимальных выходных значений интеграторов рассчитанного СДМ от его входного сигнала (рис. 6, *б*) позволяют оценить максимально возможное значение входного сигнала, при котором СДМ остается стабильным: это то значение размаха, при котором графики пересекают линию «0 dBFS». Зависимость ОСШ рассчитанного СДМ от его входного сигнала приведена на рис. 6, *в*. Можно заметить, что максимальное ОСШ рассчитанного СДМ составляет 74,2 дБ при амплитуде входного сигнала -3 дБ относительно напряжения питания. Это значение приблизительно равно как значению, полученному по формуле (1), так и значению, полученному с помощью *Delta-Sigma Toolbox*. Спектр выходного сигнала рассчитан-

ного СДМ приведен на рис. 6, з. Спектр рабочей полосы частот показан синим цветом (левая часть графика). Здесь поведение рассчитанного СДМ аналогично поведению, приведенному на рис. 4, б для СДМ, спроектированного в библиотеке *Delta-Sigma Toolbox*, а динамический диапазон, свободный от искажений, также равен ~ 80 дБ.

Таким образом, библиотека *Delta-Sigma Toolbox* и программный инструмент *Sigma-Delta Synthesis Environment* при одинаковых входных данных синтезируют аналоговые дискретные СДМ с приблизительно равными характеристиками.

Программный инструмент *SIMSIDES* содержит библиотеку функциональных блоков и набор аналитических программ для среды *MathWorks Simulink*. Он позволяет проектировать модели различных архитектур аналоговых СДМ, дискретных и непрерывных, низкочастотных и полосовых, имеющих разные порядок и каскадность [17–19]. Меню программного инструмента *SIMSIDES* приведено на рис. 7.



а

б

в

Рис. 7. Меню программного инструмента *SIMSIDES*:

а — главное; б — выбора типа анализа; в — выбора инструмента оптимизации

Особенностью программного инструмента *SIMSIDES* является то, что он, в отличие от рассмотренных, позволяющих работать как во временной, так и в частотной областях (моделировать работу СДМ на основе комплексных передаточных функций), позволяет моделировать работу СДМ только во временной области. Из этого следует, что с помощью *SIMSIDES* нельзя синтезировать и оптимизировать СПФ и ШПФ СДМ. Поэтому начинать работу по проектированию СДМ с помощью *SIMSIDES* необходимо с синтеза его СПФ, ШПФ и масштабирующих коэффициентов.

Несмотря на то, что программный инструмент *SIMSIDES* не работает с комплексными передаточными функциями, он позволяет проводить большое число различных видов анализов: спектральный анализ выходного сигнала СДМ, расчет ОСШ, анализ гармонических искажений и др. Список вариантов анализов в меню *SIMSIDES* приведен на рис. 7, б.

Кроме того, *SIMSIDES* дает возможность задать эффекты неидеальностей реальных функциональных узлов СДМ, такие как конечный коэффициент усиления и конечная крутизна ОУ ИПК, их напряжение смещения, максимальные выходной ток и размах выходного сигнала, рассогласование емкостей конденсаторов ИПК, гистерезис компараторов, значение шума и др. Программный инструмент *SIMSIDES* позволяет оценить влияние этих неидеальностей на характеристики СДМ в процессе моделирования во временной области. Дополнительно с помощью алгоритмов оптимизации, как встроенных в MATLAB и Simulink, так и реализованных в самом инструменте *SIMSIDES*, можно привести определенные параметры СДМ к требуемым значениям за счет изменения других параметров. Меню выбора алгоритма оптимизации приведено на рис. 7, в.

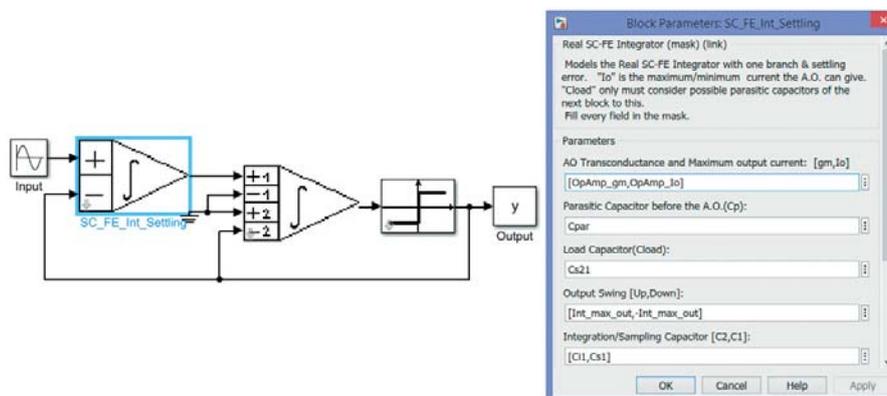
В целях демонстрации работы с программным инструментом на основе функциональных блоков из его библиотеки была построена модель аналогового дискретного СДМ 2-го порядка, имеющего архитектуру «цепочка интеграторов с распределенной обратной связью» и масштабирующие коэффициенты (см. рис. 3). Данная модель и окно настройки ИПК приведены на рис. 8, а, результат параметрического анализа СДМ в *SIMSIDES*, показывающий зависимость ОСШ СДМ от крутизны ОУ ИПК, — на рис. 8, б.

Согласно рис. 8, б, начиная с крутизны приблизительно 0,5 мСм, кривая асимптотически приближается к значению 72 дБ. Это значит, что для максимизации ОСШ модулятора с рассчитанными коэффициентами необходимо ОУ, имеющий значение крутизны не менее 0,5 мСм.

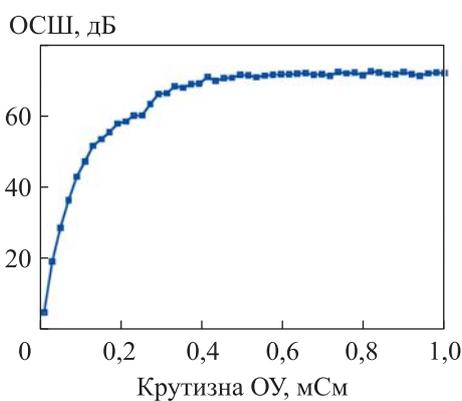
Таким образом, можно отметить, что программный инструмент *SIMSIDES* позволяет провести анализ работы СДМ на более глубоком иерархическом уровне, чем рассмотренные инструменты. Такой подход может частично заменить анализ СДМ в схемотехнических САПР, выигрывая у них в скорости работы в силу применения численного моделирования.

Сравнение программных инструментов для проектирования аналоговых дискретных СДМ. Рассмотренные инструменты для проектирования СДМ работают на разных уровнях абстракции и, следовательно, могут применяться в разных маршрутах проектирования.

Если начинать процесс проектирования СДМ так, как описано выше, т. е. с синтеза его передаточной функции, то можно использовать библиотеку *Delta-Sigma Toolbox* и программный инструмент *Sigma-Delta Synthesis Environment*. Главные их различия состоят в том, что библиотека не имеет графического интерфейса, для работы требует установки MATLAB и позволяет работать с ограниченным числом архитектур СДМ, а инструмент



а



б

Рис. 8. Модель СДМ 2-го порядка в Simulink и окно настройки ИПК (а); зависимость ОСШ рассчитанного СДМ от крутизны ОУ ИПК (б)

выполняет вычисления на интернет-сайте, имеет графический интерфейс и позволяет конфигурировать произвольную архитектуру СДМ. Здесь можно

отметить, что библиотека *Delta-Sigma Toolbox* проигрывает инструменту *Sigma-Delta Synthesis Environment* в удобстве использования, однако *Delta-Sigma Toolbox* — это открытая библиотека, т. е. функции этой библиотеки доступны для редактирования: пользователь имеет возможность изменить существующую архитектуру СДМ путем редактирования функции *realizeNTF* и добавить новую архитектуру, включая и многокаскадный СДМ (*Multi-stage noise-Shaping modulator, MASH modulator*) [1, 5, 18, 19], характеристики которого не могут быть рассчитаны на сайте *Sigma-Delta Synthesis Environment*. Дополнительно имеется возможность добавить новый функционал в библиотечные функции. Например, в функцию *synthesizeNTF* можно добавить возможность моделирования конечного коэффициента усиления ОУ в ИПК.

Следует отметить, что *Delta-Sigma Toolbox* и *Sigma-Delta Synthesis Environment* имеют в своей основе различный математический аппарат синтеза и оптимизации передаточных функций. В библиотеке *Delta-Sigma*

Toolbox используется детерминированный алгоритм синтеза и оптимизации СПФ и ШПФ [20], т. е. результат работы алгоритма однозначно зависит от входных данных. Инструмент проектирования *Sigma-Delta Synthesis Environment* основан на статистическом алгоритме. Для синтеза ШПФ и СПФ и масштабирования коэффициентов СДМ *Sigma-Delta Synthesis Environment* использует метод эвристического поиска на основе генетического алгоритма (*Genetic Algorithm, GA*), а также облачные параллельные вычисления на основе графических процессоров [12, 20]. Следовательно, результаты работы системы, в частности, комбинация масштабирующих коэффициентов СДМ, изменяются при запусках алгоритма с одними и теми же входными данными. Это происходит так, чтобы удовлетворить целевому критерию проектирования СДМ (максимизация значения ОСШК) при заданных ограничениях оптимизации (максимально допустимых значениях промежуточных сигналов). Приведенная библиотека *Delta-Sigma Toolbox* и программный инструмент *Sigma-Delta Synthesis Environment* при одинаковых входных данных дают приблизительно одинаковый результат, т. е. проектируют СДМ с приблизительно равными значениями ОСШК.

Тот факт, что *Delta-Sigma Toolbox* и *SIMSIDES* работают в средах MATLAB и Simulink, дает возможность объединить их в рамках единого маршрута проектирования [21]. В случае проведения, например исследовательской работы, написав соответствующий скрипт на языке MATLAB, с помощью библиотеки *Delta-Sigma Toolbox* можно синтезировать некоторый набор модуляторов с различными исходными данными. В результате можно изучить влияние различных комбинаций исходных данных на характеристики СДМ. Затем параметры одного или нескольких из синтезированных вариантов СДМ с удовлетворяющими исходным данным характеристиками можно передать в модель СДМ, построенную в среде Simulink, для моделирования на более низком иерархическом уровне с помощью программного инструмента *SIMSIDES*, т. е. с учетом неидеальностей реальных элементов. Если моделирование в среде Simulink дает результаты, удовлетворяющие необходимым требованиям, то можно переходить к окончательной верификации проекта в САПР с возможностью схемотехнического моделирования.

Отметим, что библиотечные элементы инструмента *SIMSIDES*, описывающие функциональные блоки СДМ, закрыты для редактирования — разработчиком они поставляются в виде скомпилированных файлов в двоичном коде. Однако данное ограничение компенсируется обилием уже заложенных в этих элементах настроек.

Различия описанных инструментов проектирования приведены в таблице.

Различия инструментов проектирования СДМ

Критерий	<i>Delta-Sigma Toolbox</i>	<i>Sigma-Delta Synthesis Environment</i>	<i>SIMSIDES</i>
Платформа	MATLAB	Интернет-сайт	MATLAB, Simulink
Графический интерфейс	Нет	Есть	Есть
Возможность запуска с помощью скрипта	Есть	Нет	Есть
Проектирование СДМ с произвольной архитектурой	Есть (с доработкой)	Нет	Есть
Синтез СПФ и ШПФ	Есть	Есть	Нет
Моделирование неидеальностей функциональных блоков	Есть (с доработкой)	Нет	Есть

Таким образом, можно сделать вывод, что, если у разработчика аналогового дискретного СДМ есть доступ к системам технических расчетов в средах MATLAB и Simulink, самым подходящим вариантом для него будет воспользоваться маршрутом проектирования, включающим библиотеку *Delta-Sigma Toolbox* и программный инструмент *SIMSIDES*. В том случае, если разработчик не имеет такие средства расчетов, его выбором может стать инструмент проектирования *Sigma-Delta Synthesis Environment*, размещенный в свободном доступе в сети Интернета. Разработчик потратит больше времени на верификацию СДМ, поскольку эффекты неидеальностей придется моделировать в схемотехнической САПР на уровне электрических схем, а не в численном виде.

Заключение. Проведен сравнительный анализ существующих программных инструментов для проектирования аналоговых дискретных СДМ *Delta-Sigma Toolbox*, *Sigma-Delta Synthesis Environment* и *SIMSIDES*. Показаны примеры работы с ними, отмечены их преимущества и недостатки. По результатам проведенного сравнительного анализа рассмотренных программных инструментов определено, что наиболее практичный маршрут высокоуровневого проектирования аналоговых дискретных СДМ можно создать путем взаимодополняющего комбинирования библиотек *Delta-Sigma Toolbox* и *SIMSIDES*.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] De la Rosa J.M. Sigma-delta converters: practical design guide. Hoboken, John Wiley & Sons, 2018.
- [2] Волков И.В., Новосёлов А.С. Особенности реализации операционного усилителя для 12-разрядного конвейерного АЦП, изготовленного в рамках технологического процесса с топологическими нормами 0,35 мкм. *Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы*, 2023, № 2, с. 61–75.
- [3] Волков И.В., Фокин Ю.М., Хальзев С.Е. Быстродействующий активный дифференциатор с низким уровнем нелинейных искажений. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2017, № 6 (117), с. 40–53.
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-6-40-53>
- [4] Самонов А.А. Проектирование универсального аналогового ядра сигма-дельта АЦП звукового диапазона. В кн.: Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем–2005. М., ИППМ РАН, 2005, с. 366–373.
- [5] Pavan S., Schreier R., Temes G.C. Understanding delta-sigma data converters. Hoboken, John Wiley & Sons, 2017.
- [6] Деменков Н.П., Микрин Е.А. Управление в технических системах. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
- [7] Razavi B. Design of analog CMOS integrated circuits. New York, McGraw-Hill Education, 2017.
- [8] Baker R.J. CMOS circuit design, layout, and simulation. Hoboken, John Wiley & Sons, 2019.
- [9] Sansen W. Analog design essentials. New York, Springer Science & Business Media, 2006.
- [10] Вонг Б.П., Миттал А., Цао Ю. и др. Нано-КМОП-схемы и проектирование на физическом уровне. М., Техносфера, 2014.
- [11] Эннс В.И., Кобзев Ю.М. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем. М., Горячая линия–Телеком, 2005.
- [12] Wagner J., Vogelmann P., Ortmanns M. On the optimization of DT incremental sigma-delta modulators in combination with CoI reconstruction filters. *Proc. NGCAS*, 2018, pp. 82–85. DOI: <https://doi.org/10.1109/NGCAS.2018.8572108>
- [13] Сатышев В.И. Современные подходы к проектированию многоканальных дельта-сигма АЦП. *Информатика, телекоммуникации и управление*, 2022, т. 15, № 2, с. 25–31. DOI: <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15202>
- [14] Márkus J., Silva J., Temes G.C. Design theory for high-order incremental converters. *IEEE Int. Symp. Intelligent Signal Processing*, 2003, pp. 3–8.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISP.2003.1275804>
- [15] Márkus J., Silva J., Temes G.C. Theory and applications of incremental $\Sigma\Delta$ converters. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 2004, vol. 51, no. 4, pp. 678–690.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2004.826202>

- [16] Tan Z., Chen C.-H., Chae Y., et al. Incremental delta-sigma ADCs: a tutorial review. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 2020, vol. 67, no. 12, pp. 4161–4173. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.3033458>
- [17] Ruiz-Amaya J., de la Rosa J.M., Fernandez F.V., et al. High-level synthesis of switched-capacitor, switched-current and continuous-time $\Sigma\Delta$ modulators using SIMULINK-based time-domain behavioral models. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 2005, vol. 52, no. 9, pp. 1795–1810. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2005.852479>
- [18] Лаврентьев М.В., Круглов Ю.В. Выбор архитектуры многокаскадного сигма-дельта модулятора на основе оценки «просачивающегося» шума квантования и физического шума. *Известия высших учебных заведений. Электроника*, 2005, № 3, с. 40–45.
- [19] Del Río R., Medeiro F., Pérez-Verdú B., et al. CMOS cascade sigma-delta modulators for sensors and telecom. New York, Springer Science & Business Media, 2006.
- [20] Brückner T., Zorn C., Anders J., et al. A GPU-accelerated web-based synthesis tool for CT sigma-delta modulators. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 2014, vol. 61, no. 5, pp. 1429–1441. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2013.2289408>
- [21] Wagner J., Ortmanns M., de la Rosa J.M. Man or machine — design automation of delta-sigma modulators. *IEEE ISCAS*, 2018, pp. 4229–4232. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2018.8351706>

Хальзев Сергей Евгеньевич — аспирант кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); инженер ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН НИЦ «Курчатовский институт» (Российская Федерация, 117218, Москва, Нахимовский пр-т, д. 36, корп. 1).

Макарчук Владимир Васильевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); старший научный сотрудник ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН НИЦ «Курчатовский институт» (Российская Федерация, 117218, Москва, Нахимовский пр-т, д. 36, корп. 1).

Волков Игорь Владимирович — руководитель группы ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН НИЦ «Курчатовский институт» (Российская Федерация, 117218, Москва, Нахимовский пр-т, д. 36, корп. 1).

Морозов Сергей Алексеевич — заведующий отделом ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН НИЦ «Курчатовский институт» (Российская Федерация, 117218, Москва, Нахимовский пр-т, д. 36, корп. 1).

Шахнов Вадим Анатольевич — член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хальзев С.Е., Макаrchук В.В., Волков И.В. и др. Высокоуровневое проектирование аналоговых дискретных сигма-дельта модуляторов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 2 (147), с. 125–144. EDN: RASAFQ

HIGH-LEVEL DESIGN OF THE ANALOG DISCRETE-TIME SIGMA-DELTA MODULATORS

S.E. Khalzev^{1,2}

sergey_khalzev@srisa.ru

V.V. Makarchuk^{1,2}

vvmakar@bmstu.ru

I.V. Volkov²

igor_volkov@srisa.ru

S.A. Morozov²

sergey_morozov@srisa.ru

V.A. Shakhnov¹

shakhnov@bmstu.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² SRISA NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation

Abstract

Integrated circuits of the sigma-delta analog-to-digital converters are widely used in data acquisition and processing devices due to their higher effective bit capacity compared to converters based on the other architectures. A sigma-delta modulator is an important functional unit in their composition. The paper considers software tools for high-level design of the analog discrete sigma-delta modulators. It provides a route for high-level design of the circuits of this type and describes the factors complicating it. Three most commonly used software tools for automated high-level design of the analog discrete sigma-delta modulators operating on three different software platforms are considered. For each design approach, an example is presented of working with the program, i.e., computation of the scaling coefficients of the analog discrete sigma-delta modulator with the given initial parameters. The considered software tools are being comparatively analyzed; features of their use, advantages and disadvantages are noted. It is revealed that in order to more effectively achieve the goals of using the presented software tools, it is required to combine them in the design route. Recommendations are provided for developers of the analog discrete sigma-delta modulators on options for using the considered design tools

Keywords

Sigma-delta ADC, modulator, discrete integrator, high-level design, CAD, MATLAB, Simulink

Received 20.10.2023

Accepted 27.11.2023

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] De la Rosa J.M. Sigma-delta converters: practical design guide. Hoboken, John Wiley & Sons, 2018.
- [2] Volkov I.V., Novoselov A.S. Features of implementation of operational amplifier for 12-bit conveyor ADC manufactured within the technological process with 0.35 μm topological norms. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic Engineering. Ser. 2. Semiconductor Devices], 2023, no. 2, pp. 61–75 (in Russ.).
- [3] Volkov I.V., Fokin Yu.M., Khalzev S.E. Fast active differentiator featuring low non-linear distortions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2017, no. 6 (117), pp. 40–53 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-6-40-53>
- [4] Samonov A.A. Proektirovanie universalnogo analogovogo yadra sigma-delta ATsP zvukovogo diapazona. V kn.: Problemy razrabotki perspektivnykh mikroelektronnykh sistem–2005 [Designing of universal analog core of sigma-delta ADC for audio band. In: Development Issues of Prospective Microelectronic Systems–2005]. Moscow, IPPM RAS Publ., 2005, pp. 366–373 (in Russ.).
- [5] Pavan S., Schreier R., Temes G.C. Understanding delta-sigma data converters. Hoboken, John Wiley & Sons, 2017.
- [6] Demenkov N.P., Mikrin E.A. Upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh [Control in technical systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2017.
- [7] Razavi B. Design of analog CMOS integrated circuits. New York, McGraw-Hill Education, 2017.
- [8] Baker R.J. CMOS circuit design, layout, and simulation. Hoboken, John Wiley & Sons, 2019.
- [9] Sansen W. Analog design essentials. New York, Springer Science & Business Media, 2006.
- [10] Wong B., Mittal A., Cao Y., et al. Nano-CMOS circuit and physical design. Hoboken, John Wiley & Sons, 2004.
- [11] Enns V.I., Kobzev Yu.M. Proektirovanie analogovykh KMOP-mikroskhem [Design of analogue CMOS Microchips]. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2005.
- [12] Wagner J., Vogelmann P., Ortmanns M. On the optimization of DT incremental sigma-delta modulators in combination with CoI reconstruction filters. *Proc. NGCAS*, 2018, pp. 82–85. DOI: <https://doi.org/10.1109/NGCAS.2018.8572108>
- [13] Satyshev V.I. Modern approaches to design of multi-channel delta-sigma ADCs. *Informatika, telekommunikatsii i upravlenie* [Computing, Telecommunications and Control], 2022, vol. 15, no. 2, pp. 25–31 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15202>
- [14] Márkus J., Silva J., Temes G.C. Design theory for high-order incremental converters. *IEEE Int. Symp. Intelligent Signal Processing*, 2003, pp. 3–8.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISP.2003.1275804>

- [15] Márkus J., Silva J., Temes G.C. Theory and applications of incremental $\Sigma\Delta$ converters. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 2004, vol. 51, no. 4, pp. 678–690.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2004.826202>
- [16] Tan Z., Chen C.-H., Chae Y., et al. Incremental delta-sigma ADCs: a tutorial review. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 2020, vol. 67, no. 12, pp. 4161–4173.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.3033458>
- [17] Ruiz-Amaya J., de la Rosa J.M., Fernandez F.V., et al. High-level synthesis of switched-capacitor, switched-current and continuous-time $\Sigma\Delta$ modulators using SIMULINK-based time-domain behavioral models. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 2005, vol. 52, no. 9, pp. 1795–1810.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2005.852479>
- [18] Lavrentyev M.V., Kruglov Yu.V. Multistage sigma-delta modulator choice based on estimation of quantization noise leakage and physical noise. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2005, no. 3, pp. 40–45 (in Russ.).
- [19] Del Río R., Medeiro F., Pérez-Verdú B., et al. CMOS cascade sigma-delta modulators for sensors and telecom. New York, Springer Science & Business Media, 2006.
- [20] Brückner T., Zorn C., Anders J., et al. A GPU-accelerated web-based synthesis tool for CT sigma-delta modulators. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 2014, vol. 61, no. 5, pp. 1429–1441. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2013.2289408>
- [21] Wagner J., Ortmanns M., de la Rosa J.M. Man or machine — design automation of delta-sigma modulators. *IEEE ISCAS*, 2018, pp. 4229–4232.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2018.8351706>

Khalzev S.E. — Post-Graduate Student, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Engineer, SRISA NRC “Kurchatov Institute” (Nakhimovskiy prospekt 36, korp. 1, Moscow, 117218 Russian Federation).

Makarchuk V.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); SRISA NRC “Kurchatov Institute” (Nakhimovskiy prospekt 36, korp. 1, Moscow, 117218 Russian Federation).

Volkov I.V. — Head of Group, SRISA NRC “Kurchatov Institute” (Nakhimovskiy prospekt 36, korp. 1, Moscow, 117218 Russian Federation).

Morozov S.A. — Head of Department, SRISA NRC “Kurchatov Institute” (Nakhimovskiy prospekt 36, korp. 1, Moscow, 117218 Russian Federation).

Shakhnov V.A. — Corresponding Member of the RAS, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Khalzev S.E., Makarchuk V.V., Volkov I.V., et al. High-level design of the analog discrete-time sigma-delta modulators. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 2 (147), pp. 125–144 (in Russ.). EDN: RASAFQ