

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,  
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

## **Աթանեսյան Արման Աշոտի**

**ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ԱՆԱԼՈԳԱԹՎԱՅԻՆ ԶԵՎԱՓՈՒՄԱՆ ԳԾԱՅՆՈՒԹՅԱՆ  
ԻՆՔՆԱԿԱՐԳԱԲԵՐՄԱՄԲ ԼԱՎԱՐԿՄԱՆ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ  
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

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

**ՄԵՂՄԱԳԻՐ**

Երևան 2021

---

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА  
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

**Атанесян Арман Ашотович**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ УЛУЧШЕНИЯ  
АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА С  
САМОКОРРЕКТИРУЮЩЕЙСЯ ЛИНЕЙНОСТЬЮ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

Ереван 2021

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտում:

Գիտական ղեկավար՝	տ.գ.դ. Վազգեն Շավարշի Մելիքյան
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝	տ.գ.դ. Օլեգ Հարությունի Պետրոսյան տ.գ.թ. Տիգրան Արայիկի Հախվերդյան
Առաջատար կազմակերպություն՝	Երևանի Պետական Համալսարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2021թ. հուլիսի 2-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 2021թ. մայիսի 22-ին:

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



Բենիամին Ֆելիքսի Բադալյան

---

Тема диссертации утверждена в Институте радиофизики и электроники НАН РА

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

Официальные оппоненты: д.т.н. Олег Арутюнович Петросян  
к.т.н. Тигран Араикович Ахвердян

Ведущая организация: Ереванский Государственный Университет

Защита диссертации состоится 2-го июля 2021 г. в 14<sup>00</sup> ч. на заседании Специализированного совета 046 — "Радиотехники и электроники", действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПУА), по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 22 мая 2021 г.

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



Бениамин Феликсович Бадалян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП) являются важнейшими составляющими современных интегральных схем (ИС), имеют широкую область применения и различные модификации. Параллельно с развитием современной полупроводниковой промышленности повышается и степень интеграции АЦП и ЦАП в ИС, а также ужесточаются требования к их техническим параметрам.

Степень интеграции и потребность в корректной работе часто приводят к снижению процента выхода продукции, поскольку в результате производственного процесса многие рабочие параметры ИС деградируют вплоть до окончательной неисправности. Неисправности ИС, которые носят случайный характер и не могут быть полностью предсказаны проектировщиком, появляются в основном из-за отклонений от проекта. Причины этого многочисленны: производственные ошибки, изъяны в технологической линии для изготовления полупроводниковых приборов и т.д.

АЦП и ЦАП также не являются исключениями, и зачастую в результате производственного процесса происходит значительное отклонение параметров. В отличие от дискретных элементов, электрические компоненты в ИС, такие как сопротивления, емкости, полупроводниковые приборы, имеют большие отклонения от номинального значения. В случае дискретных элементов отклонение электрических параметров в результате производственного процесса не превышает 1...2%, в то время как отклонение от номинального значения того же элемента в ИС может достигнуть 20...25%. Подобные отклонения недопустимы, поскольку вероятность получения неисправной схемы очень высока. Сложность проблемы в том, что последствия подобных отклонений выясняются после производственного процесса, а эти ошибки уже невозможно исправить. В результате получается низкий процент выхода продукции.

В АЦП и ЦАП подобные ошибки в основном приводят к росту нелинейности системы. Увеличение нелинейности в таких системах приводит к потере кода, что часто может стать причиной неисправности.

Диссертация посвящена разработке встроенных средств АЦП и ЦАП, которые позволят посредством систем самокоррекции уменьшить влияние ошибок после производственного процесса путем уменьшения нелинейности преобразователя. В результате применения описанных средств можно добиться снижения количества негодного продукта, а также улучшить технические параметры систем.

**Объект исследования.** Влияние отклонений, возникающих из-за производственного процесса в АЦП и ЦАП, на нелинейность общей системы и пути его снижения.

**Цель работы.** Разработка и исследование встроенных систем, позволяющих уменьшить ошибки и отклонения, возникающие из-за производственного процесса, а также разработка методов уменьшения нелинейности в аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователях и увеличение процента выхода пригодной продукции с одновременным улучшением технических параметров работающих систем.

**Методы исследования.** В ходе работы были использованы методы и подходы разработки аналого-цифровых и электронных устройств, инструментарий для проектирования ИС и некоторые языки программирования для проектирования программного обеспечения.

**Научная новизна:**

- Предложены принципы разработки средств улучшения линейности преобразования аналого-цифрового сигнала с помощью самокоррекции, которые, в отличие от известных решений, более эффективны с точки зрения снижения нелинейности. Внедренная обратная связь позволяет обеспечить достаточное уменьшение отклоненных параметров за счет увеличения площади на полупроводниковом кристалле и времени отладки в допустимых пределах.
- Разработана встроенная система улучшения линейности аналого-цифрового преобразователя прямого преобразования с помощью самокоррекции, благодаря которой за счет включения в обратную связь предусилителя и вспомогательных цифроаналоговых преобразователей параметры нелинейности были уменьшены примерно в 3 раза за счет увеличения времени отладки всего на 12%.
- Предложена встроенная система улучшения линейности цифроаналогового преобразователя тока с помощью самокоррекции, благодаря которой путем сравнения и отладки значения источников тока были уменьшены параметры нелинейности на 20...25% при росте занимаемой площади всего на 5%.
- Разработан метод улучшения линейности конвейерного аналого-цифрового преобразователя с помощью самокоррекции, благодаря которому за счет внедрения системы уменьшения ошибки отклонения напряжения усилителей параметры нелинейности были уменьшены примерно в 2,5 раза. По сравнению с ранее существующим методом, ошибка усиления не уменьшается.

**Практическая ценность работы.** Разработанные методы улучшения линейности преобразования аналого-цифрового сигнала с помощью самокоррекции были реализованы в программно-инструментальном средстве “Linearity self-calibration designer”. Программный инструмент был внедрен в ЗАО “Синопсис Армения” и используется для проектирования аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей. Реализация предложенных методов на программном инструменте “Linearity self-calibration designer” позволила сократить срок проектирования в 5...7 раз, уменьшить на практике ошибки нелинейности на 20...25% по сравнению с предыдущими результатами, а энергопотребление - на 20...25%, увеличив расход площади на полупроводниковом кристалле на 10...15%.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

- Принципы разработки средств улучшения линейности преобразования аналого-цифрового сигнала с помощью самокоррекции.
- Система улучшения линейности АЦП прямого преобразования с помощью самокоррекции.

- Система улучшения линейности цифро-аналогового преобразователя тока с помощью самокоррекции.
- Метод улучшения линейности конвейерного аналого-цифрового преобразователя.

**Достоверность научных положений.** Научные результаты подтверждены математическими, теоретическими обоснованиями, представленными в диссертации, и реализацией моделирования высокой точности.

**Внедрение.** Программно-инструментальное средство “Lineairy self-calibration designer” было внедрено в ЗАО “Синописис Армения” и используется для проектирования аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей.

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

В первом приложении представлен акт внедрения, во втором - отрывок QT описания программно-инструментального средства, в третьем - отрывок описания схемы ЦАП, в четвертом - список рисунков, таблиц и сокращений. Основной объем диссертации составляет 104 страниц, а вместе с приложениями - 124 страницы. Диссертация написана на армянском языке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** рассмотрены основные причины ухудшения линейности АЦП и ЦАП систем, а также обоснованы важность и необходимость их устранения. АЦП и ЦАП причинами нелинейности являются случайные отклонения параметров электрических компонентов от номинальных значений в ходе производственного процесса.

Главными параметрами, описывающими нелинейность АЦП и ЦАП, являются дифференциальная (ДНЛ) и интегральная (ИНЛ) нелинейность:

$$\text{ДНЛ} = \frac{v_{i+1} - v_i}{\text{НЗБ}} - 1, \text{ИНЛ} = \frac{v_i - v_0}{\text{НЗБ}}, \quad (1)$$

где  $v_i$  - напряжение  $i$ -го кода;  $v_0$  - напряжение при нулевом коде; НЗБ –наименьший значимый бит.

В случаях, когда значения ДНЛ и ИНЛ больше чем 1НЗБ, в системе происходит потеря кода (рис. 1). Следовательно, параметры нелинейности по абсолютной величине не должны превышать 1НЗБ.

В диссертации рассмотрены причины нелинейности в АЦП прямого преобразования. Неточности в процессе изготовления схемы в основном отражаются на отклонении от номинального значения сопротивлений, а также на линейности компараторов. Ухудшение линейности компараторов связано с ошибкой напряжения смещения. Компараторы обычно проектируются таким образом, чтобы ошибка напряжения смещения была минимальной, и даже если нет ошибки линейности, значения ДНЛ или ИНЛ не превышают 1НЗБ, чтобы избежать потери кода, но при этом случайные отклонения после производственного процесса

приводят к немонотонной передаточной функции. Исправление таких отклонений невозможно без встроенных систем самокоррекции.

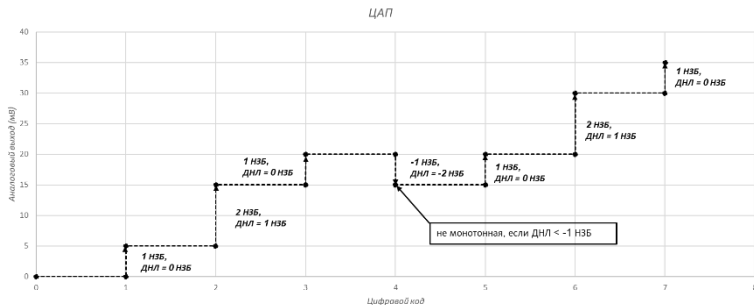


Рис. 1. Детали дифференциальной нелинейности ЦАП

Рассмотрена принципиальная схема ЦАП тока (рис. 2). Преобразователь состоит из источников тока с разными весами, которые подключаются к выходу, управляемому кодом и обеспечивают соответствующий ток на выходе.

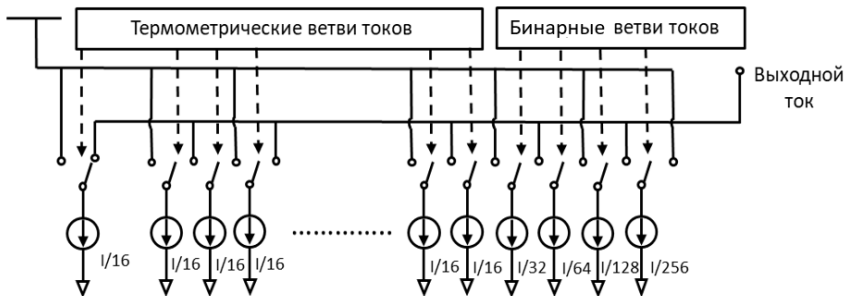


Рис. 2. ЦАП тока

В этом преобразователе причиной ошибок нелинейности является отклонение источников тока от номинальных значений. В случае, когда на этапе физического проектирования транзисторы источников тока не согласованы должным образом, токи отличаются от значений, спланированных в начале проектирования. Отклонение тока от номинального значения можно представить как параллельный источник тока, подключенный к основному. Такой ток отклонения приведет к нелинейности указанного ЦАП; таким образом, уменьшение тока отклонения в аналогичных преобразователях с помощью самокоррекции приведет к улучшению линейности всей системы.

Еще один широко применяемый в современных ИС преобразователь - конвейерный АЦП. В данном преобразователе причинами неточности могут быть

отклонения устройства выборки и хранения (В/Х), напряжения смещения операционного усилителя. АЦП и ЦАП малого разрешения имеют некоторую нелинейность и другие отклонения.

Таким образом, после производственного процесса невозможно исправить параметры ИС, поэтому отклонение параметров нелинейности также не может быть исправлено без встроенных систем самокоррекции.

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

**Метод улучшения линейности аналого-цифрового преобразователя прямого преобразования с помощью самокоррекции.** Для уменьшения напряжения смещения компаратора была предложена схема (рис. 3), основная идея которой заключается в использовании одного входного предусилителя вместо нескольких, что позволит снизить смещение входного напряжения компаратора за счет обратной связи.

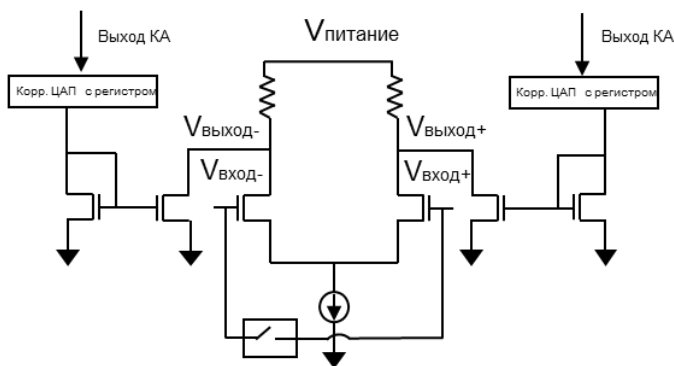


Рис. 3. Предусилитель с калибровочными ЦАП

Предусилитель с калибровочными ЦАП имеет два режима работы: режим коррекции и основной рабочий режим. В режиме конфигурации входы схемы подключаются ключом друг к другу. Коррекция выполняется с помощью алгоритма последовательного приближения и калибровочных ЦАП. Алгоритм осуществляется с помощью конечного автомата (КА).

Калибровочный ЦАП состоит из бинарно взвешенных источников тока, к которым подключен регистр (рис. 4). Регистр позволяет сохранять текущие значения тока, полученные в результате настройки.

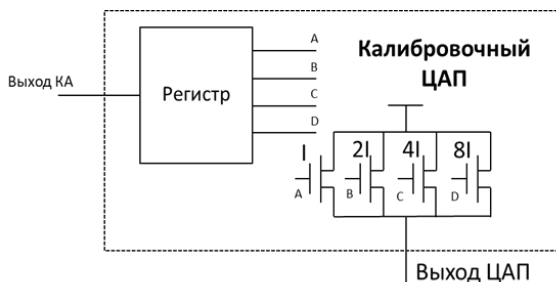


Рис. 4. Калибровочный ЦАП с регистром

Во время фазы коррекции напряжения посредством калибровочного ЦАП с регистром на выходе предусилителя входное напряжение смещения компаратора уменьшается до степени, допускаемой калибровочным ЦАП. Затем схема переводится в исходный режим работы, при котором входное напряжение смещения уже уменьшено. КА подключается к следующему компаратору; аналогичный процесс выполняется до тех пор, пока ошибка напряжения смещения всех компараторов не уменьшится до минимума. Таким образом, линейность общей системы возрастает. Широкий диапазон напряжений в системе создает необходимость использования двух типов предусилителей. Представленная схема используется для напряжений до  $V_{пит}/2$ , а для остального диапазона используется схема с входными транзисторами металл-оксид-полупроводник p-типа (p-МОП) (рис. 5).

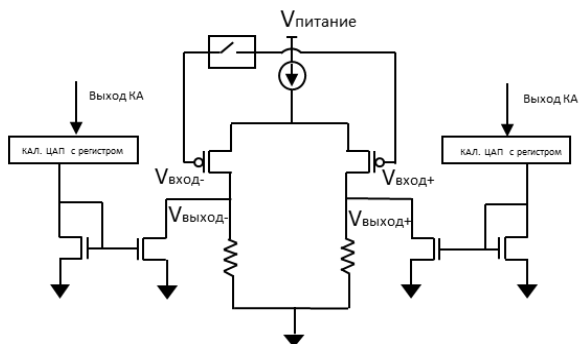


Рис. 5. Предусилитель с калибровочными ЦАП и структурой p-МОП

В случае обеих схем калибровочные ЦАП имеют одинаковую структуру. Единственное отличие - изменение типа входной пары транзисторов. Представлен полный вид схемы системы коррекции напряжения смещения компаратора и обратной связи (рис. 6).



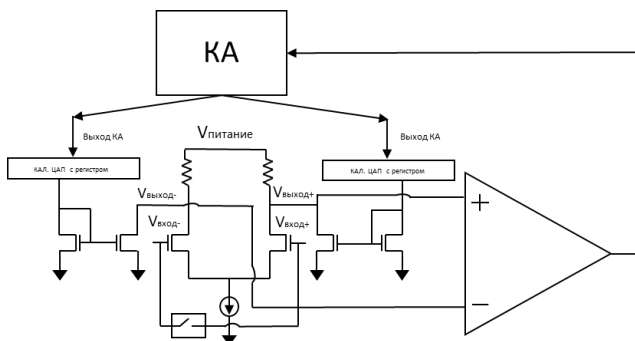


Рис. 6. Схема самокоррекции с обратной связью

Значения источников тока в ЦАП устанавливались в соответствии с максимальным значением для устранения возможного напряжения смещения с запасом в 10%.

Были измерены параметры нелинейности ДНЛ и ИНЛ до и после коррекции для оценки эффективности предложенной системы. ИНЛ снизилась примерно на 70%, а ДНЛ - на 73%. Ошибка нелинейности меньше 1НЗБ, потери кода не наблюдалось (табл. 1,2).

Таблица 1

Результаты имитации для разработанных АЦП прямого преобразования ДНЛ(НЗБ)

Температура(°C)	Типичный процесс	Медленный процесс	Быстрый процесс
-40	0,35	0,60	0,48
25	0,42	0,54	0,37
125	0,51	0,62	0,58

Таблица 2

Результаты имитации для разработанных АЦП прямого преобразования ИНЛ(НЗБ)

Температура(°C)	Типичный процесс	Медленный процесс	Быстрый процесс
-40	0,45	0,63	0,49

(продолжение таблицы 2)

25	0,36	0,54	0,32
125	0,42	0,68	0,52

**Метод улучшения линейности цифроаналогового преобразователя тока с помощью самокоррекции.** Для улучшения линейности ЦАП тока был предложен встроенный метод самокоррекции. По характеристикам снижения нелинейности предложенный метод превышает существующие решения. Для решения проблемы в предыдущих схемах в основном проводятся сравнения между калибровочным и суммарным током бинарно взвешенных ветвей ЦАП. В результате сравнения и калибровки значение термометрического источника тока будет равняться суммарному токам бинарно взвешенных источников. Суть этого метода заключается в том, что токи всех термометрических ветвей равняются номинальному значению, в результате чего передаточная функция становится более монотонной в термометрической части ЦАП. Отдельные отклонения от номинальных значений токов бинарной части ЦАП являются менее значимыми, а их сумма приблизительно равна номинальному значению термометрического источника тока. Схема обладает следующим недостатком: в случае, когда у бинарно взвешенных транзисторов отклонение тока происходит в одну сторону, смещение суммарного тока источников также происходит в одну сторону и, следовательно, имеется отклонение от номинального значения. Предложен способ, который позволяет избежать этой проблемы (рис. 7).

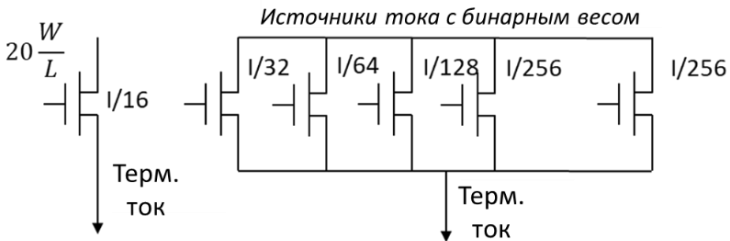


Рис. 7. Сравнение смещения токов

Известно, что чем больше физические размеры электрического компонента, тем меньше его параметры подвержены изменению. Учитывая вышесказанное, в качестве калибровочного источника тока можно использовать транзистор с большими физическими размерами, ток которого будет в большей степени равен номинальному значению. Для оценки отклонений суммы тока бинарных транзисторов и одного большого источника тока была выполнена симуляция методом Монте-Карло. Источник тока с большими физическими размерами

отклоняется от номинала на  $\pm 10\%$ , а суммарный ток транзисторов с бинарным весом - на  $\pm 25\%$ . Следовательно, в процессе калибровки термометрических источников тока номинальным источником тока выбирается большой транзистор, а не сумма бинарно взвешенных источников тока, вследствие чего возрастет линейность термометрической части ЦАП. По сравнению с предыдущим методом, ошибка ИНЛ будет меньше, так как ток термометрических ветвей будет меньше отклоняться от номинального значения, что вытекает из представленных результатов.

Сравнение и выравнивание токов были выполнены с использованием однобитной АЦП и КА, где алгоритм КА представляет собой алгоритм последовательного приближения. Однобитный ЦАП уже сам по себе является линейным, поэтому он не может быть источником неточностей. Кроме того, для регулирования термометрических токов подключаются калибровочные ЦАП, которые находятся в обратной связи с КА, и выравнивают токи термометрических ветвей до значения номинального источника тока (рис. 8).

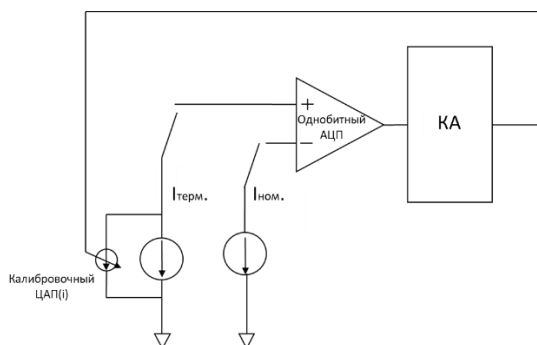


Рис. 8. Схема самокоррекции с обратной связью

Для оценки эффективности метода были измерены параметры нелинейности ДНЛ и ИНЛ (табл. 3,4).

Таблица 3

Результаты имитации для разработанных ЦАП тока  
ДНЛ (НЗБ)

Температура(°C)/процесс	Типичный процесс	Медленный процесс	Быстрый процесс
-40	0,24	0,29	0,18

(продолжение таблицы 3)

25	0,2	0,24	0,23
125	0,22	0,25	0,28

Таблица 4

Результаты имитации для разработанных ЦАП тока  
ИНЛ (НЗБ)

Температура(°C)	Типичный процесс	Медленный процесс	Быстрый процесс
-40	0,28	0,39	0,4
25	0,22	0,35	0,33
125	0,31	0,38	0,36

**Метод улучшения линейности конвейерного аналого-цифрового преобразователя с помощью самокоррекции.** Тремя основными причинами нелинейности конвейерных АЦП является ошибка усиления усилителя, напряжения смещения усилителя, нелинейности под-ЦАП и под-АЦП.

В предыдущих работах погрешность усиления усилителей в основном исправлялась, а две остальные ошибки игнорировались. В предлагаемом способе напряжение смещение усилителя корректируется с помощью обратной связи (рис. 9).

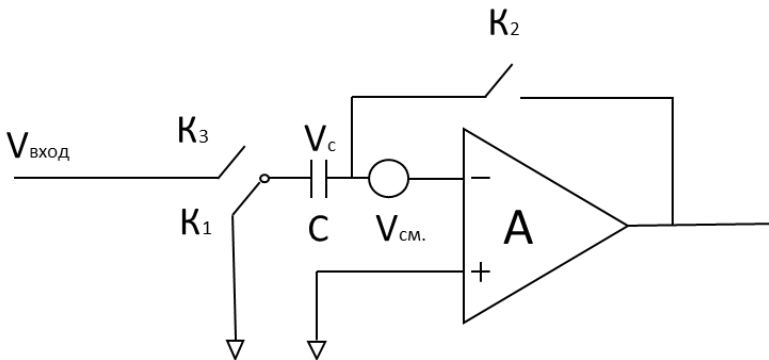


Рис. 9. Схема коррекции погрешности напряжения смещения

Исправление ошибки напряжения смещения осуществляется во время двух фаз переключения. На первом этапе  $K_1$  и  $K_2$  подключают емкость, а  $K_3$  отключает вход от выхода. Напряжение на емкости будет равно напряжению смещения усилителя:

$$V_c = \left( \frac{A}{A+1} V_{н.с} \right), \quad (2)$$

где  $A$  - усиление усилителя;  $V_c$  - напряжение компаратора; а  $V_{н.с}$  - напряжение смещения.

На втором этапе  $K_3$  подключается к емкости, а  $K_1$  и  $K_2$  отключаются от емкости. Когда на вход усилителя подается сигнал, к нему добавляется напряжение  $V_c$ , равное входному напряжению смещения.

Таким образом, устраняется ошибка напряжения смещения, соответственно линейность усилителя увеличивается. Метод применяется ко всем каскадам АЦП, что увеличивает линейность всей системы (табл. 5).

Таблица 5

Результаты имитации для разработанного АЦП  
ИНЛ(НЗБ)

Температура(°C)	Типичный процесс	Медленный процесс	Быстрый процесс
<b>-40</b>	0,41	0,5	0,39
<b>25</b>	0,4	0,45	0,42
<b>125</b>	0,48	0,52	0,47

**В третьей главе** представлено разработанное программно-инструментальное средство “Linearity self-calibration designer”, позволяющее проектировать системы ЦАП и АЦП, в которых внедрены разработанные методы, изложенные во второй главе.

Разработанное средство позволяет сократить время проектирования, одновременно улучшая характеристики вышеуказанных систем.

Для начала работы требуется ввести необходимые для проектирования параметры, такие как проектируемая система, технологический процесс, температурный диапазон и рабочие напряжения (рис. 10).

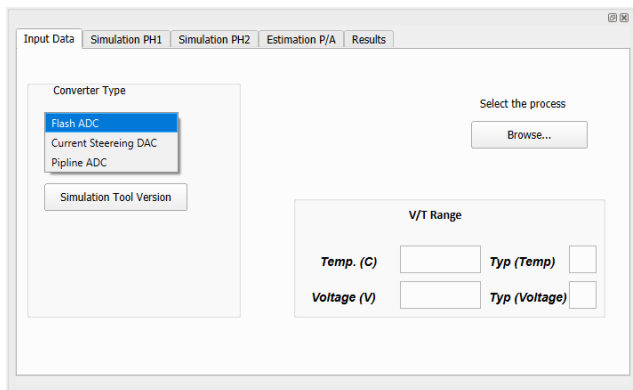


Рис. 10. Окно ввода данных

После правильного заполнения данных в первом окне проектировщик переходит к следующим этапам проектирования, где выполняется дальнейшее моделирование. В конце проектирования проектировщик уже может рассмотреть параметры спроектированной системы в удобном для него формате, включая суммарные таблицы и графики (рис. 11).

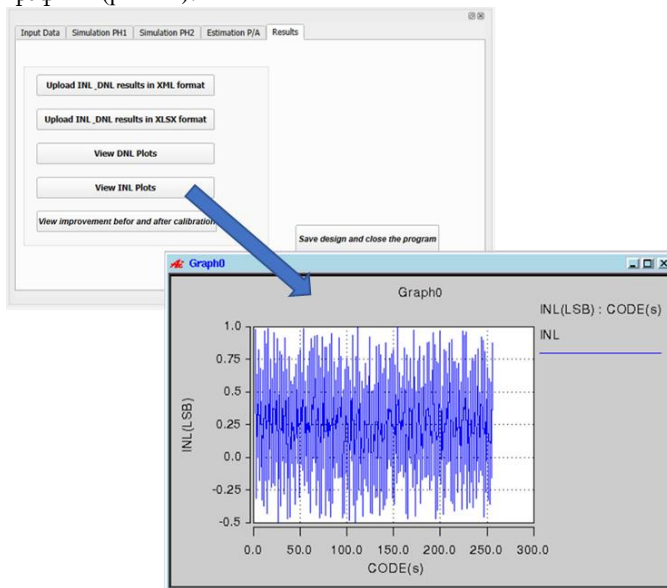


Рис. 11. Возможность просмотра полученных результатов

Исследования показывают, что с помощью программно-инструментального средства “Linearity self-calibration designer” можно сократить время проектирования систем ЦАП и АЦП в 5...7 раз. Результаты проектирования с использованием программно-инструментального средства представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты проектирования с использованием программно-инструментального средства “Linearity self-calibration designer”

Параметр	АЦП прямого преобразования Сущ./предлож./прог.	ЦАП тока Сущ./предлож./прог.	Конвейерный АЦП Сущ./предлож./прог.
ДНЛ, (НЗБ)	1,3/0,62/0,45	0,5/0,28/0,2	0,7/0,51/0,42
ИНЛ, (НЗБ)	1,1/0,68/0,47	0,5/0,4/0,32	0,9/0,54/0,4
Частота сигнала, (МГц)	1300	5	128
Частота квантования, (МС/с)	1250	50	320
Разрядность	8	12	12
Ток потребления, (мА)	230/98/112	110/52/65	47/25/32
Площадь, (мм <sup>2</sup> )	0,66/0,42/0,48	0,14/0,15/0,2	0,21/0,12/0,17

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Предложены принципы разработки средств улучшения линейности преобразования аналого-цифрового сигнала с помощью самокоррекции, которые, в отличие от известных решений, более эффективны с точки зрения снижения нелинейности. Внедренная обратная связь позволяет обеспечить достаточное уменьшение отклоненных параметров за счет

- увеличения площади на полупроводниковом кристалле и времени отладки в допустимых пределах [1-5].
2. Разработана встроенная система улучшения линейности аналого-цифрового преобразователя прямого преобразования с помощью самокоррекции, благодаря которой за счет включения в обратную связь предусилителя и вспомогательных цифроаналоговых преобразователей параметры нелинейности были уменьшены примерно в 3 раза за счет увеличения времени отладки всего на 12% [1,2,4].
  3. Предложена встроенная система улучшения линейности цифроаналогового преобразователя тока с помощью самокоррекции, благодаря которой путем сравнения и отладки значения источников тока были уменьшены параметры нелинейности на 20...25% при росте занимаемой площади всего на 5% [3].
  4. Разработан метод улучшения линейности конвейерного аналого-цифрового преобразователя с помощью самокоррекции, благодаря которому за счет внедрения системы уменьшения ошибки отклонения напряжения усилителей параметры нелинейности были уменьшены примерно в 2,5 раза. По сравнению с ранее существующим методом, ошибка усиления не уменьшается [4,5].
  5. Разработанные методы улучшения линейности преобразования аналого-цифрового сигнала с помощью самокоррекции были реализованы в программно-инструментальном средстве “Linearity self-calibration designer”. Программный инструмент был внедрен в ЗАО “Синопис Армения” и используется для проектирования аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей. Реализация предложенных методов на программном инструменте “Linearity self-calibration designer” позволила сократить срок проектирования в 5...7 раз, уменьшить на практике ошибки нелинейности на 20...25% по сравнению с предыдущими результатами, а энергопотребление - на 20...25%, увеличив расход площади на полупроводниковом кристалле на 10...15% [1-5].

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

1. **Atanesyan A.A.** An On-Chip Self-Calibration Method For 8-Bit Flash ADC // Proceedings of the Republic of Armenia National Academy of Sciences and National Polytechnic University of Armenia: Series of Technical Sciences. - Yerevan, 2021. – V. 74, N 1. - P. 75–82.
2. Duty-Cycle Correction Circuit for High Speed Interfaces / **V.Sh. Melikyan, A.A. Atanesyan, M.T. Grigoryan, H.T. Kostanyan, et al** // IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO - 2019). – Kyiv, 2019. – P. 42-45.
3. Method of increasing current DAC linearity with considering its random variables for modeling risk or uncertainty / **A.A. Atanesyan, M.T. Grigoryan, H.V. Margaryan, H.A. Aghayan, et al** // Вестник РАУ. -2020. - № 2. – P. 64-70.



4. **Atanesyan A.A.** The CMOS Negative Capacitance with Improved AC Performance // Вестник РАУ. -2019. - № 2. – P. 49-58.
5. **Grigoryan M.T., Atanesyan A.A., Hakobyan G.H., Harutyunyan S.S.** Two Stage CTLE For High Speed Data Receiving. // IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO - 2020). – Kyiv, 2020. – P. 374-377.

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Անալոգաթվային ձևափոխիչները (ԱԹՁ) և թվաանալոգային ձևափոխիչները (ԹԱՁ) լայնորեն կիրառվում են ժամանակակից էլեկտրոնային սարքերում և կախված գործածության ոլորտից՝ ունեն գանազան մոդիֆիկացիաներ: Ժամանակակից կիսահաղորդչային արդյունաբերության զարգացմանը զուգընթաց՝ աճում է ԱԹՁ-ների և ԹԱՁ-ների ներդրման աստիճանը ինտեգրալ սխեմաներում (ԻՄ): Ինտեգրման աճին զուգընթաց՝ աճում է նաև ձևափոխիչների տեխնիկական պարամետրերին ներկայացվող պահանջները, ինչը հանգեցնում է տվյալ դասի ԻՄ-երի կառուցվածքի բարդացմանը:

Կառուցվածքային փոփոխությունները և համակարգի բարդության աճը հանգեցնում են արտադրանքի ելքի տոկոսի նվազման, քանզի պատահական սխալների քանակն աճում է ինտեգրման աստիճանին զուգահեռ: Արտադրական գործընթացի արդյուքում հիմնականում շեղվում են ԻՄ-ի այնպիսի տարրերի էլեկտրական պարամետրերը, ինչպիսիք են՝ դիմադրությունները, ունակությունները և կիսահաղորդչային տարրերը: Դիսկրետ էլեկտրական տարրերի դեպքում վերջիններիս պարամետրերի շեղումը չի գերազանցում 1...2%-ը, այնինչ ԻՄ-ում նույն տարրերի շեղումները նույնիսկ կարող են հասնել 20...25%-ի: Նման շեղումները հաճախ հանգեցնում են ԻՄ-ի տեխնիկական պարամետրերի վատթարացման, ընդհուպ մինչև վերջնական անսարքության:

ԱԹՁ-ներում և ԹԱՁ-ներում նման արտադրական սխալները հիմնականում հանգեցնում են համակարգի ոչ գծայնության աճին: Ոչ գծայնության մեծացումը ձևափոխիչներում ինֆորմացիայի կորստի պատճառ է դառնում, և հետևաբար՝ նման սխալներն անթույլատրելի են:

Խնդրի բարդությունն այն է, որ նման շեղումների հետևանքները պարզվում են արտադրական գործընթացից հետո, և հնարավոր չէ շտկել այդ սխալները: Արդյունքում ստացվում է պիտանի արտադրանքի ելքի ցածր տոկոս:

Նման սխալների ուղղման համար անհրաժեշտ է ունենալ ներդրված համակարգեր, որոնք ինքնակարգաբերման միջոցներով թույլ կտան լավարկել ձևափոխիչների գծայնությունը: Ինքնակարգաբերման միջոցների ներդրումը ԱԹՁ-ներում և ԹԱՁ-ներում թույլ կտա մեծացնել արտադրանքի ելքի տոկոսը, նվազեցնելով ֆինանսական կորուստները:

Նման համակարգերի մշակումը հեշտ խնդիր չէ: Շատ դժվար է, եթե ոչ անհնարին, ԻՄ-ում ունենալ բարդ թեստավորման և չափման համակարգեր հաշվի առնելով մակերես/էներգասպառում հարաբերակցությունը:

Ճարտարագետների կողմից բազմաթիվ հետազոտություններ են կատարվում նման համակարգերի նախագծման և ներդրման համար: Այնուամենայնիվ, առկա լուծումները ամոռոջությամբ չեն բավարարում

Ժամանակակից պահանջները: Այդ պատճառով նոր միջոցների մշակումը արդիական է և կարևոր:

Ատենախոսությունը նվիրված է ԱԹՁ-ների և ԹԱՁ-ների համար այնպիսի ներդրված միջոցների մշակմանը, որոնք թույլ կտան արտադրական գործընթացից հետո ինքնակարգաբերման համակարգերի միջոցով նվազեցնել սխալների ազդեցությունը՝ փոքրացնելով ձևափոխիչի ոչ գծայնությունը:

Առաջարկվել են ազդանշանի անալոգաթվային ձևափոխման գծայնության ինքնակարգաբերմամբ լավարկման միջոցների մշակման սկզբունքներ, որոնք ի տարբերություն հայտնի լուծումների՝ ավելի արդյունավետ են ոչ գծայնության նվազեցման տեսանկյունից: Ներդրված հետադարձ կապով համակարգերը թույլ են տալիս ապահովել շեղված պարամետրերի բավարար չափով փոքրացում՝ թույլատրելի սահմաններում կիսահաղորդչային բյուրեղի վրա զբաղեցրած մակերեսի և կարգաբերման ժամանակի մեծացման պարագայում:

Մշակվել է զուգահեռ անալոգաթվային ձևափոխիչի գծայնության ինքնակարգաբերմամբ լավարկման ներդրված համակարգ, որում, հետադարձ կապի նախաուժեղարարի և կարգաբերման օժանդակ թվաանալոգային ձևափոխիչների ընդգրկման շնորհիվ, ոչ գծայնության պարամետրերը նվազեցվել են մոտավորապես 3 անգամ՝ կարգաբերման ժամանակի ընդամենը 12% մեծացման հաշվին:

Առաջարկվել է հոսանքի թվաանալոգային ձևափոխիչի գծայնության ինքնակարգաբերմամբ լավարկման ներդրված համակարգ, որում հոսանքի աղբյուրների հոսանքների համեմատման և կարգաբերման հաշվին փոքրացվել են ոչ գծայնության պարամետրերը 20...25%-ով՝ զբաղեցրած մակերեսի ընդամենը 5% աճի պարագայում:

Մշակվել է կոնվեյերային անալոգաթվային ձևափոխիչի գծայնության ինքնակարգաբերմամբ լավարկման միջոց, որում, ուժեղարարների լարման շեղման սխալի փոքրացման համակարգի ներդրման շնորհիվ, ոչ գծայնության պարամետրերը նվազեցվել են մոտավորապես 2.5 անգամ: Նախկինում առկա մեթոդի համեմատ չի փոքրանում ուժեղացման սխալը:

Ատենախոսությունում մշակված ազդանշանի անալոգաթվային ձևափոխման գծայնության ինքնակարգաբերմամբ լավարկման միջոցներն իրագործվել են Linearity self-calibration designer ծրագրային գործիքում: Ծրագրային գործիքը ներդրվել է «ՄԻՆՈՓՄԻՍ ԱՐՄԵՆԻԱ» ՓԲԸ-ում ու օգտագործվում է անալոգաթվային և թվաանալոգային ձևափոխիչների նախագծման համար: Առաջարկված մեթոդների իրագործումը Linearity self-calibration designer ծրագրային գործիքում թույլ է տվել փոքրացնել նախագծման ժամկետը 5...7 անգամ, գործնականում նվազեցնել ոչ գծայնության սխալները՝ ստացված արդյունքների համեմատ միջինում 20...25%-ով, էներգասպառման 20...25% և կիսահաղորդչային բյուրեղի վրա զբաղեցվող մակերեսի 10...15% մեծացման հաշվին:

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF METHODS FOR MIXED SIGNAL  
CONVERSION IMPROVEMENT WITH LINEARITY SELF-CALIBRATION**

**SUMMARY**

Analog-to-digital converters (ADC) and digital-to-analog converters (DAC) are widely used in modern electronic devices and have various modifications depending on the field of use. Along with the growth of the modern semiconductor industry, the level of integration of ADCs and DACs into integrated circuits (IC) is also increasing. The increase of integration and of the requirements for the technical parameters of the ADCs and DACs complicate the structure of the ICs in this class.

Structural changes and the increase in complexity leads to a decrease of a yield, as the number of random faults increases with integration level. Because of the production process, the electrical parameters of IC elements, such as resistances, capacities and semiconductor elements, are mainly deviated from expected values. In the case of discrete electrical elements, the deviation of the parameters does not exceed 1...2%, meanwhile the deviations of the same element in IC can reach 20...25% from the nominal. Such deviations often lead to degradation of the technical parameters of the IC, leading to a final malfunction.

Such production faults in ADCs and DACs mainly lead to an increase of the non-linearity of the system. The increase of the non-linearity in such systems leads to information loss and therefore such errors are inadmissible.

The complexity of the problem is that the consequences of such deviations are revealed after the production process, and it is impossible to correct these errors. As a result, a low percentage of yield is obtained. To correct such errors, it is necessary to have an embedded system, which will allow improving the linearity of the converters by means of self-correction. The implementation of such methods in ADCs and DACs will increase percentage of yield, also reduce financial losses.

A lot of effort has been suggested by designers to design and implement such systems. However, existing solutions do not fully meet modern requirements. That is why the development of new means is urgent.

The dissertation is devoted to the development of embedded methods for ADCs and DACs, which will allow to reduce the impact of errors after the production process through self-calibration systems by reducing the non-linearity of the converter.

Principles for the development of methods of linearity improvement for mixed signal conversion by self-calibration have been proposed which, in contrast to known solutions, are more effective in reducing non-linearity. The built-in feedback systems allow for a sufficient reduction of the deflected parameters in the case of increasing the area on the semiconductor crystal and the adjustment time within the allowable limits.

An embedded system for linearity improvement by self-calibration of the flash analog-to-digital converter has been developed, in which, due to the inclusion of pre-amplifiers and calibration digital-to-analog converters in feedback, and the non-linearity parameters have been reduced almost three times, due to increasing the adjustment time by only 12%.

A built-in system for linearity improvement by self-calibration for the digital-to-analog converter has been proposed, in which the non-linearity parameters have been reduced by 20...25% due to the comparison and adjustment of current sources, in case of only 5% increase of the occupied area.

A method of linearity improvement for a pipeline analog-to-digital converter has been developed, in which the non-linearity parameters have been reduced by approximately 2.5 times due to the introduction of an amplifier offset voltage reduction system. Compared to the previous method, the amplification error does not decrease.

Methods of linearity improvement for mixed signal conversion by self-calibration developed in the dissertation were implemented in the Linearity self-calibration designer software tool. The software tool was used in "SYNOPSISYS ARMENIA" CJSC, and it is used for the design of analog-to-digital and digital-to-analog converters. The implementation of the proposed methods in the Linearity self-calibration designer software tool allowed to reduce the design time by 5...7 times, in practice to reduce non-linearity errors by an average of 20...25% compared to the obtained results, due to 20...25% of energy consumption increase and 10...15% increase in the area occupied by a semiconductor crystal.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. Armut', written in a cursive style.