

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԴՈՒԽՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Սահակյան Վահան Ապրեսի

ԲԱՐՁՐ ՃՇՏՈՒԹՅԱՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ԱՂԲՅՈՒՐՆԵՐԻ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ
ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

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

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան 2025

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Տաակյան Վաան Ապրեսովիչ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ИСТОЧНИКОВ ТОКА ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

АВТОРЕФЕРАТ

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

Ереван 2025

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի Հանրապետության գիտությունների ազգային ակադեմիայի Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտում (ՀՀԳԱՄ ՌՖԷԻ):

Գիտական ղեկավար՝

տ.գ.դ. Վազգեն Շավարշի Մելիքյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

տ.գ.դ. Միքայել Սերյոժայի Ալեքսանյան
տ.գ.թ. Կարեն Գազիկի Սկրյալյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

Երևանի կապի միջոցների
գիտահետազոտական ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2025թ. հունիսի 6-ին, ժամը 16⁰⁰-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046 մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2025թ. մայիսի 6-ին

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

Բենիամին Ֆելիքսի Բադալյան

Тема диссертации утверждена в Институте радиофизики и электроники Национальной академии наук Республики Армения (ИРЭ НАН РА).

Научный руководитель:

д.т.н. Вазген Шаваршович Меликян

Официальные оппоненты:

д.т.н. Микаел Сережаевич Алексанян
к.т.н. Карен Гагикович Мкртчян

Ведущая организация:

Ереванский научно-исследовательский
институт средств связи

Защита диссертации состоится 6-го июня 2025 г. в 16⁰⁰ ч. на заседании Специализированного совета 046 — "Радиотехники и электроники", действующего при Национальном политехническом университете Армении, по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 6-го мая 2025 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета 046 к.т.н.

Бениамин Феликсович Бадалян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Интегральные схемы (ИС) широко используются в различных областях, включая бытовую технику, сложные электронные системы, компьютеры, а также авиационное и космическое оборудование. Одной из технических характеристик современных комплементарных металл-оксидных-полупроводниковых (КМОП) ИС является обеспечение высокой точности основных параметров независимо от температуры окружающей среды, напряжения питания и отклонений в технологическом процессе. Малые физические размеры, а также уменьшение толщины оксида вентили МОП-транзисторов - с одной стороны, технические требования по снижению энергопотребления - с другой, являются основой процесса снижения напряжения питания, которое может достигать нескольких сотен милливольт. Эти факторы привели к снижению точности внутрикристаллических источников тока. Новые методы и разработки значительно повысили точность источников тока, однако по-прежнему существуют проблемы, которые остаются до сих пор актуальными и требуют новых подходов и идей. Применение этих инноваций в современных ИС позволит обеспечить повышение точности источников тока в ключевых узлах, что, в свою очередь, увеличит верооятность бесперебойной работы.

Объект исследования. Факторы, негативно влияющие на точность источников тока в интегральных схемах, методы, способы и схемотехнические решения по снижению их влияния.

Цель работы. Разработка и исследование методов, способов и средств повышения точности источников тока ИС за счет занимаемой площади на полупроводниковом кристалле и минимального увеличения энергопотребления независимо от отклонений в технологическом процессе, колебаний приложенного напряжения и внешней температуры.

Методы исследования. Диссертация разработана на основе современных подходов и методов проектирования аналоговых и аналогово-цифровых схем, включая принципы моделирования ИС, технику скриптитрования и использование объектно-ориентированных программных средств (ПС).

Научная новизна:

- Предложены подходы к повышению точности источников тока, используемых в ИС, которые позволяют удовлетворить требования к схемами, в соответствии с современными требованиями, за счет снижения влияния изменений технологического процесса на работу системы управления. Последние также дают возможность с большей точностью прогнозировать поведение системы при различных значениях технологического процесса, напряжения питания и температуры.
- Разработано схемотехническое решение источника тока, используемого в ИС, согласно которому в результате совместного использования источника напряжения с положительным температурным коэффициентом (ПТК) и транзистора КМОП в триодном режиме погрешность величины тока приемно-передающих узлов не превысила $\pm 7\%$ за счет увеличения

площади, занимаемой на полупроводниковом кристалле, не более чем на $3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$.

- Создан способ регулировки внутрикристаллического сопротивления, благодаря которому за счет совместного использования генератора базовой частоты и конденсатора КМОП погрешность сопротивления снижена до 4,5% путем увеличения площади поверхности, занимаемой на полупроводниковом кристалле, всего на $3,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$.
- Разработан способ построения схемы внутрикристаллического источника тока, благодаря которому за счет совместной работы генератора постоянного тока и предложенной системы регулировки погрешность величины тока приемно-передающих узлов составила 7% путем увеличения площади, занимаемой полупроводниковым кристалле, на $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$.
- Предложено схемотехническое решение высокоточного, защищенного от старения внутрикристаллического источника тока, согласно которому за счет совместного использования источников постоянного напряжения и напряжения с ПТК погрешность определения величины тока приемно-передающих узлов составляет $\pm 5\%$ путем увеличения площади, занимаемой на полупроводниковом кристалле, на величину, не превышающую $5,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$.

Практическая ценность работы. Разработанные в диссертации методы, методики и схемотехнические решения послужили основой предлагаемого программного средства FARADYIC для повышения точности источников тока. ПС было внедрено в ЗАО «СИНОПСИС АРМЕНИЯ» и использовалось при проектировании высокоточных источников тока для различных ИС. Разработки многочисленных источников тока показали высокую эффективность программного обеспечения, так как погрешность внутрикристаллического источника тока снижена до 7% за счет увеличения площади поверхности, занимаемой на полупроводниковом кристалле, на $5,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$.

На защиту выносятся:

- схемотехническое решение высокоточного, стойкого к старению внутрикристаллического источника тока в аналоговых интегральных схемах;
- метод регулировки внутрикристаллического сопротивления в аналоговых интегральных схемах;
- метод построения схемы внутрикристаллического источника тока в аналоговых интегральных схемах;
- схемотехническое решение источников высокоточного тока, используемого в аналоговых интегральных схемах.

Достоверность научных положений. Научные результаты подтверждены представленными в диссертации математическими обоснованиями и экспериментальными результатами схемотехнического моделирования.

Внедрение. Программный инструмент проектирования FARADYIC внедрен в ЗАО «СИНОПСИС АРМЕНИЯ» и используется при проектировании аналоговых и смешанных ИС для повышения точности их статических и динамических параметров.

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

- Международной конференции "20th IEEE EAST-WEST DESIGN & TEST SYMPOSIUM (EWDTS)" (Ереван, Армения, 2024);
- научных семинаров кафедры "Микроэлектронные схемы и системы" НПУА (Ереван, Армения, 2024-2025);
- научных семинаров кафедры "Электротехника и электропотребление" НПУА (Ереван, Армения, 2021-2022).
- научных семинаров в Институте "Радиофизики и Электроники" (Аштарак, Армения, 2022-2025).
- научных семинаров ЗАО "Синописис Армения" (Ереван, Армения, 2021-2024).

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

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы из 127 наименований источников и 4-ех приложений. В первом приложении представлен акт внедрения диссертации; во втором - отрывок описания схемы внутрикристаллического источника тока с цифровым регулированием; в третьем - разделы, описывающие программное средство FARADEYIC; в четвертом - списки таблиц, рисунков и использованных сокращений. Объем диссертации составляет 141 страниц, вместе с приложениями - 182 страниц. 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 представлены требования к стабильности источников тока современных ИС, основные проблемы решения этих задач и результаты схемотехнического моделирования, показывающие основные недостатки существующих подходов. В настоящее время наиболее распространенными методами являются: метод повышения точности источников тока с использованием цифровых узлов управления, метод повышения точности с использованием источников опорного тока через токи с ПТК и отрицательным температурным коэффициентом (ОТК) независимо от изменения температуры и значений напряжения питания, метод повышения точности источников тока через источник постоянного опорного напряжения и внешние узлы. Схема повышения точности источников тока, основанная на использовании спроектированных цифровых узлов управления (рис. 1). Анализ проводился в температурном диапазоне $-10...70^{\circ}\text{C}$ и в диапазоне изменения напряжения питания от 1 В до 2,2 В (табл. 1). Для проведения температурного анализа было выбрано значение напряжения питания 1,8 В. Результаты анализа свидетельствуют о том, что величина опорного напряжения спроектированной схемы достаточно чувствительна к изменению температуры и технологического процесса. Учитывая погрешность значения опорного напряжения, изменения температуры и технологического процесса составляют $\pm 8,5\%$. Учитывая

погрешность значения опорного тока, изменения температуры и технологического процесса составляют $\pm 10\%$.

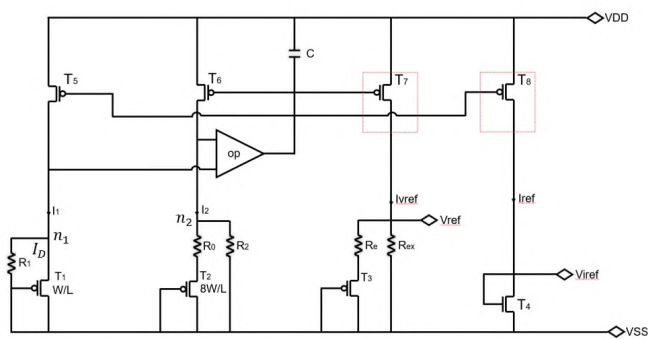


Рис.1. Схема источника внутрикристаллического тока-напряжения

Таблица 1

Обобщение полученных результатов спроектированного внутрикристаллического источника тока

Параметр	Единица измерения	Без внешнего регулирования	С внешним регулированием
Выходной ток	мкА	17	17,18
Технология	мкм	0,18	0,18
Минимальное напряжение питания	В	1	1
Зависимость опорного тока от питания	ppm/V	1,800	-
Температурный диапазон	°C	0...70	0...70
Температурная зависимость	ppm/°C	54	53
Площадь	мм ²	0,0025	-
Потребление тока	мкА	160	140...200

Схема повышения точности опорного тока, основанная на использовании источников опорного тока через спроектированные токи с ПТК и ОТК, независимо от изменения температуры и значений напряжения питания (рис. 2). Основным недостатком спроектированной схемы внутрикристаллического источника тока является существенная зависимость величины опорного тока от изменения температуры и технологического процесса. Основной причиной изменения значения

опорного тока является изменение сопротивления R_T . Результаты анализов представлены также в виде таблицы. Ток проектируемого внутрикристаллического источника тока составляет 10,45 мкА, тогда как схема потребляет 70 мкА. Коэффициент полезного действия (КПД) источника опорного питания составляет около 14%, что указывает на его низкую эффективность (табл. 2).

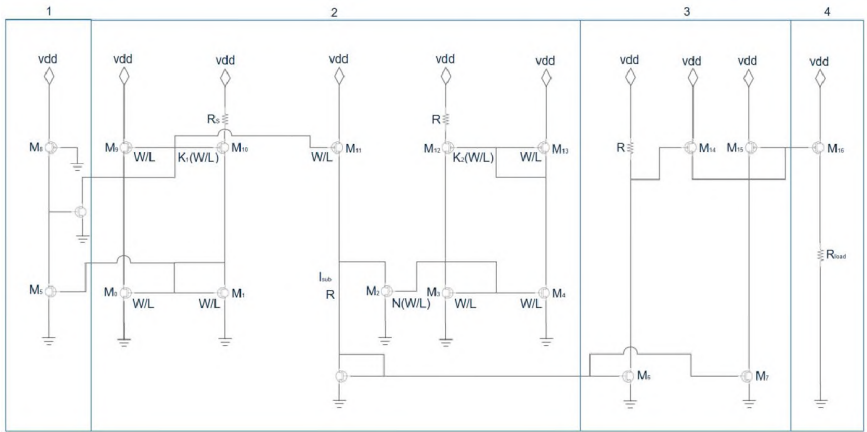


Рис.2. Схема внутрикристаллического источника тока независимо от питания и изменения температуры

Таблица 2
Обобщение полученных результатов спроектированного внутрикристаллического источника тока

Параметр	Единица измерения	Ожидаемый результат	Измеренный результат
Выходной ток	мкА	10,45	13,65
Технология	мкм	0,25	0,35
Напряжение минимального питания	В	1,1	2,5
Зависимость опорного тока от питания	ppm/V	1,700	4000
Температурный диапазон	С	0...120	- 30...100
Температурная зависимость	ppm/С	720	28
Площадь	мм ²	0,002	0,004
Потребление тока	мкА	70	-

Схема повышения точности источников тока, основанная на использовании спроектированного источника постоянного опорного напряжения и внешних узлов (рис. 3 и 4). Для уменьшения зависимости опорного тока внутрикристаллического источника тока от изменения температуры TC_1 корректируется с помощью a_1 и a_2 .

В случае tt значения технологического процесса равны $(a_1, a_2) = (1,1)$, в случае ss - $(a_1, a_2) = (0,1)$, в случае ff - $(a_1, a_2) = (1,0)$. В результате регулировки температурная зависимость в худшем случае составляет 119 ppm/°C, но погрешность значения опорного тока в зависимости от изменения температуры и технологического процесса составляет 24,5% (табл. 3).

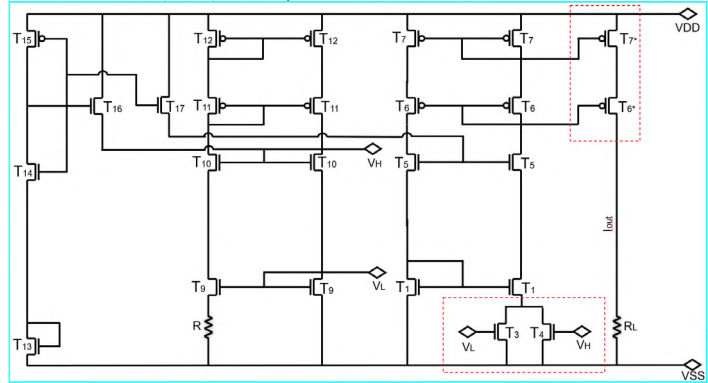


Рис.3. Схема внутрикристаллических управляемых источников тока, опорного тока и опорного напряжения

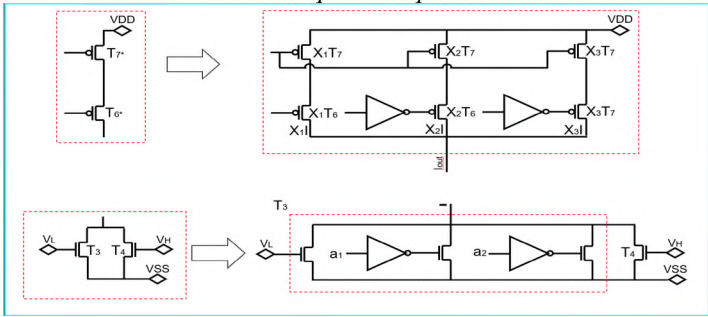


Рис.4. Схема управления количеством транзисторов

Таблица 3

Обобщение полученных результатов спроектированного внутрикристаллического источника тока

Технология КМОП (мкм)	0,18	0,8	0,35	0,25	0,18
Минимальное питание (В)	1	2,5	1,3	1,1	1,2
$I_{опор}$ (нА)	1009	430	9,95	10,45	500
I_L	$I_{опор} \times 2$	$I_{опор} \times 2$	$I_{опор} \times 7$	$I_{опор} \times 7$	$I_{опор} \times 3,3$
TC (ppm/ °C)	154	600	1190	720	119
T (°C)	-40...120	-	-20...80	0...120	-40...120

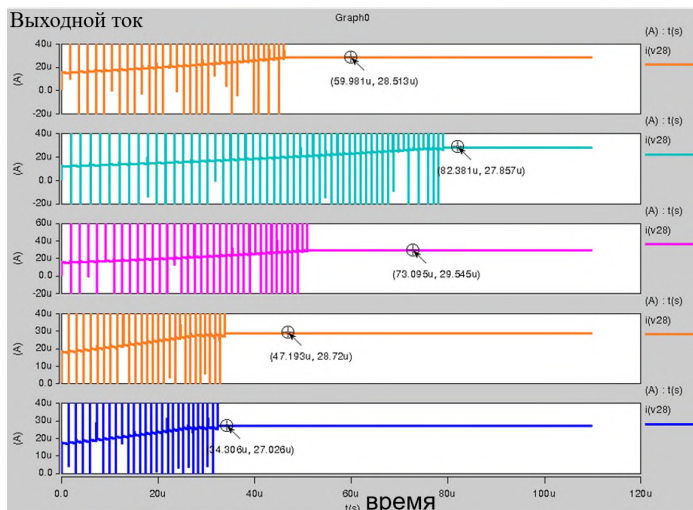


Рис. 7. Зависимость опорного тока от температуры, изменений напряжения питания и процесса

Подводя итоги, можно сказать, что изменение тока источника опорного тока составляет менее 7% с учетом изменения температуры, технологического процесса и напряжения питания. Полученные результаты подтверждают надежность и пригодность разработанной схемы для использования в различных прецизионных системах, где поддержание точного значения тока необходимо для оптимальной функциональности.

Метод высокоточного источника тока, использующий комбинацию источников постоянного напряжения и напряжения с положительным температурным коэффициентом.

Схема внутрикристаллического источника тока, разработанная на основе использования комбинации источников постоянного напряжения и напряжения с ПТК, дает возможность точно прогнозировать и компенсировать отклонения, вызванные температурой, обеспечивая стабильный и надежный ток. Два основных N-МОП-транзистора (T_{18} и T_{19}) были намеренно спроектированы с большими путями потока, чтобы обеспечить устойчивость к изменениям процесса. Были проведены различные анализы для проверки устойчивости опорного тока внутреннего генератора тока к возможным изменениям температуры, технологического процесса и напряжения питания. Погрешность опорного тока внутреннего генератора тока в диапазоне температур от -40 до 125°C , с учетом также изменения технологического процесса в диапазоне ± 3 сигма и изменения напряжения питания $\pm 10\%$, составляет менее $\pm 5\%$. Современная тенденция производства ИС заключается в их изготовлении только с использованием тонких оксидных транзисторов, в то время как аналоговые схемы часто требуют более высоких напряжений питания, чем допустимо для нормальной работы. Длительное использование такого высокого напряжения может повредить элементы или даже вывести схему из строя. Предлагаемый метод представляет собой схему

внутрикристаллического источника тока, в которой используются только тонкие окисные транзисторы (рис. 8-11).

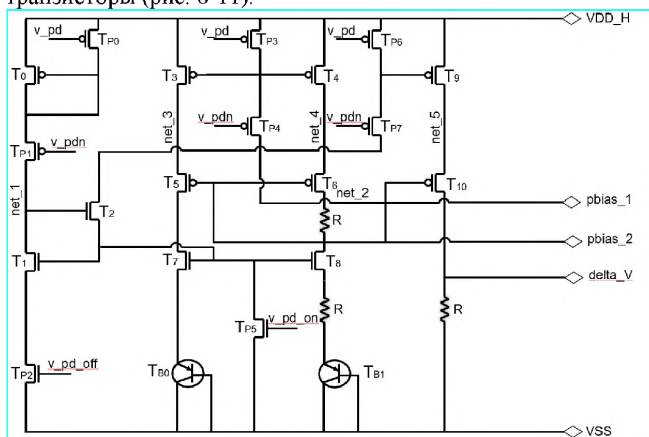


Рис.8. Схема формирования напряжения источника ПТК (ΔV) опорного тока высокой точности с дополнительными узлами

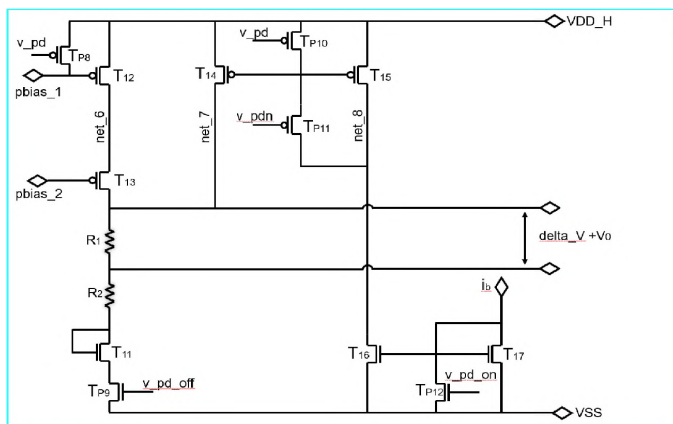


Рис.9. Схема, генерирующая $\Delta V + V_0$ напряжение источника опорного тока высокой точности с дополнительными узлами

В режиме отключения некоторые транзисторы могут находиться под высоким напряжением, поскольку напряжение питания превышает допустимое напряжение. Режим отключения может быть реализован как посредством внешнего сигнала, так и быть следствием условий работы других схем. Полученные результаты подтверждают, что схема с дополнительными узлами меняет свои электрические характеристики на 36% меньше, чем другая. Опорный ток внутрикристаллического источника тока с дополнительными узлами и без них имеет высокую точность в диапазоне температур $-40 \dots 125^\circ\text{C}$ (табл 4).

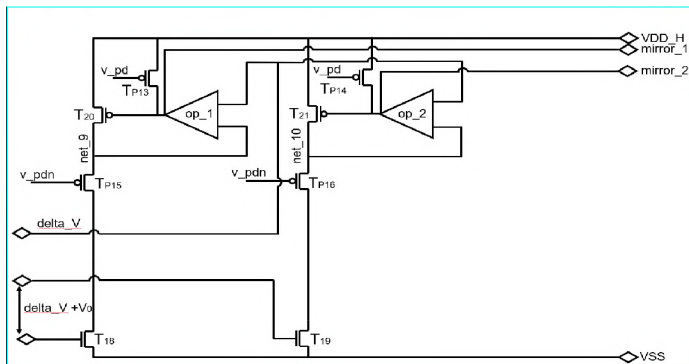


Рис.10. Схема, генерирующая выходные токи высокоточного источника опорного тока с дополнительными узлами

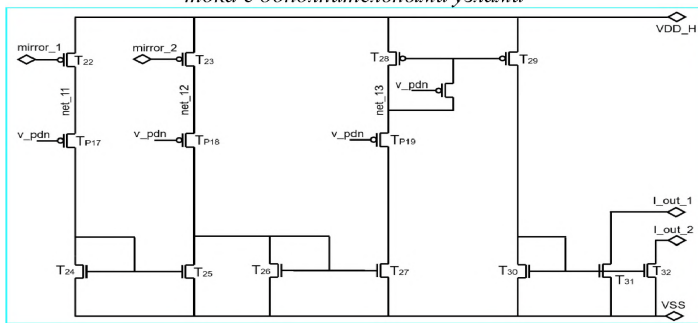


Рис.11. Схема, генерирующая разницу выходных токов высокоточного источника опорного тока с дополнительными узлами

Таблица 4

Сводка полученных результатов опорного тока внутрикристаллического источника тока с дополнительными спроектированными узлами и без них

Процесс	Fresh	EOL с дополнительными узлами	EOL без дополнительных узлов
	$I_{\text{опор}}$ (мкА)	$I_{\text{опор}}$ (мкА)	$I_{\text{опор}}$ (мкА)
Медленный	601,3	606,8	618,2
Типовой	622	628,5	635,8
Быстрый	640,1	652,1	680,4

Метод регулирования внутрикристаллического сопротивления с помощью генератора базовой частоты и конденсатора КМОП.

Регулирование резистора является важным процессом при проектировании ИС, поскольку обеспечиваются точность и надежность работы ИС. Резисторы являются

одним из основных компонентов ИС, и их значения непосредственно влияют на работу схемы.

Предлагаемая схема основана на простом RC-фильтре, который является ее основой, и кварцевом генераторе, генерирующем сигнал постоянной частоты (рис. 12).

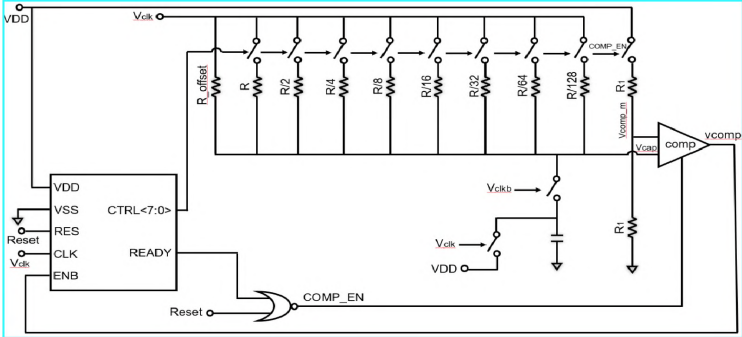


Рис.12. Блок-диаграмма схемы проектируемой регулировки

Проектируемая схема включает в себя цепь резисторов с цифровым управлением (DPR), 8-битный цифровой блок управления, высокоскоростной компаратор и интегрирующий конденсатор. Цепь резисторов цифрового управления DPR подключается к конденсатору через ключи таким образом, чтобы при переключении паразитная емкость не оказывала влияния на способность основного конденсатора. В периоды, когда работа системы не требуется, чтобы избежать ненужного потребления энергии, компаратор и делитель напряжения, формирующий опорное напряжение, отключаются сигналом COMP_EN. Этот сигнал формируется сигналами Ready и Reset, и компаратор будет находиться в активном состоянии только тогда, когда оба входа пассивны. Анализы проводились для всех возможных изменений температуры, технологического процесса и напряжения питания, а также в типичных, худших и лучших случаях паразитического отклонения. Обобщение результатов показывает, что изменение сопротивления составляет менее 4,5% с учетом изменения температуры, технологического процесса и напряжения питания (табл 5).

Таблица 5

Сводка полученных результатов спроектированной системы регулировки

Процесс	Сопротивление (Ом)	Погрешность (%)
Типовой	999,8	-0,02
Медленный	965,5	-3,45
Быстрый	1043	+4,3

Состояние спроектированной схемы отражается основными сигналами: <Vcap>, <Vref>, <Out> и <Ready> (рис. 13). Когда сигнал <<Ready>> активен, компаратор его обнаруживает, и регулировка завершается.

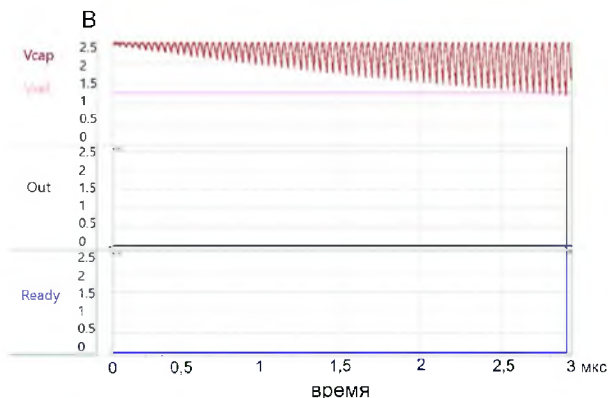


Рис.13. Основные сигналы при регулировке

Высокоточный источник тока с использованием источника напряжения с положительным температурным коэффициентом и МОП-транзистора в триодном режиме.

Блок-схема проектируемого внутрикристаллического источника тока состоит из следующих основных блоков: схемы выпуска, генератора напряжения ПТК и блок генерации опорного тока (рис. 14 и 15). Цепь Startup предназначена для выпуска схемы внутрикристаллического источника тока. Генератор напряжения ПТК обеспечивает выходное напряжение, прямо пропорциональное температуре. На основании проведенного анализа можно утверждать, что погрешность опорного тока в диапазоне температур от -40 до 125°C , с учетом также изменения технологического процесса в диапазоне ± 3 сигма и изменения напряжения питания $\pm 10\%$, составляет менее 7% (рис. 16). Устойчивость разработанного внутрикристаллического источника тока при воздействии перечисленных факторов подчеркивает эффективность источника тока. Особенно важно то, что разработанная схема способна обеспечить эту точность независимо от технологических отклонений и имеет простую структуру.

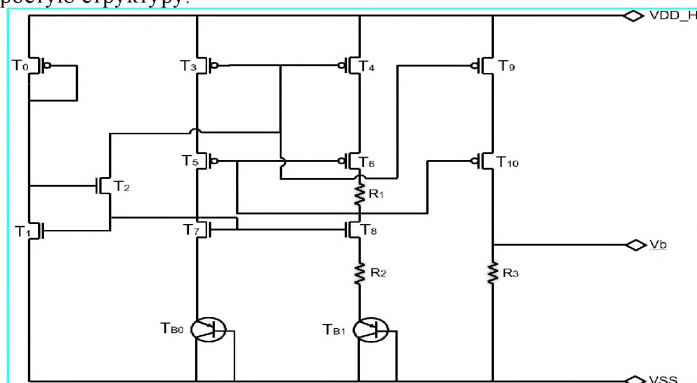


Рис.14. Схема генерации напряжения V_b внутрикристаллического источника тока

важен, поскольку он влияет на весь проект, и правильно введенные данные гарантируют, что моделирование пройдет гладко (рис. 17). Графическое представление может также включать в себя другую информацию, такую как текущее состояние, возможные ошибки или предупреждения, которые могут возникнуть во время моделирования. Это позволяет дизайнеру быстро реагировать и вносить, при необходимости, нужные изменения. Таким образом, ПС не только ускоряет процесс проектирования, но и обеспечивает инженера всеми необходимыми инструментами и информацией для эффективного выполнения работы, снижая вероятность ошибок. Пользователи могут использовать кнопку <<Browse>> в разделе <<Measurements>>, которая позволяет им войти в созданный файл measure.sp. Система позволяет инженеру одновременно просматривать сигналы, соответствующие различным крайним случаям. Это важный инструмент, который позволяет инженеру быстро и эффективно оценить, как различные условия влияют на производительность системы.

FARADEYIC

Simulation Conditions

Measurements

Corner Selection

☒ Transient

0

120u

0.5u

☐ DC

Parameter

Start Value

End Value

Sleep

☐ AC

Points Per Decade

Start Frequency

End Frequency

☐ Sweep

Parameter

Start Value

End Value

Sleep

☒ Probes

v(*)

i(*)

*

Browse

☒ Parasitic Extraction

xcurrent_source

rcc

Simulator

Primesim

Version

2023.03-SP2

Simulator Options

run_t=6, post_probe, converge=1

Browse

Output Directory

/nreilly/scratch/output

Browse

Simulate

Рис. 17. Определение схмотехнического описания

FARADEYIC

Transient

DC

AC

Measure Name	Min	Typical	Max
Initial current (uA)	14	15	16.1
Iref (uA)	27.158	28.517	29.508
Lock time (us)	34.2	45.8	54.9
vnbias (mV)	350.785	420.457	440.785
vpbias (mV)	370.85	415.28	470.891

Export Result

Show probes

Рис. 18. Окно результатов, полученных при реализации ПС FARADEYIC

Этот файл содержит все необходимые параметры, значения которых необходимо измерить, и может стать важным инструментом в процессе проектирования и анализа (рис. 18). Кроме того, система может предложить интерактивные инструменты, которые позволяют пользователям переключаться между различными угловыми случаями, просматривать и анализировать данные. Результаты, полученные с помощью кнопки <<Export results>>, сохраняются в файле Excel. Формат файла Excel позволяет пользователям использовать различные инструменты и функции, предлагаемые Microsoft Excel, такие как фильтрация данных, сортировка, построение графиков и другие аналитические инструменты (рис. 19). Это позволяет инженеру проводить более глубокий анализ полученных результатов и легко представлять их коллегам или руководству.

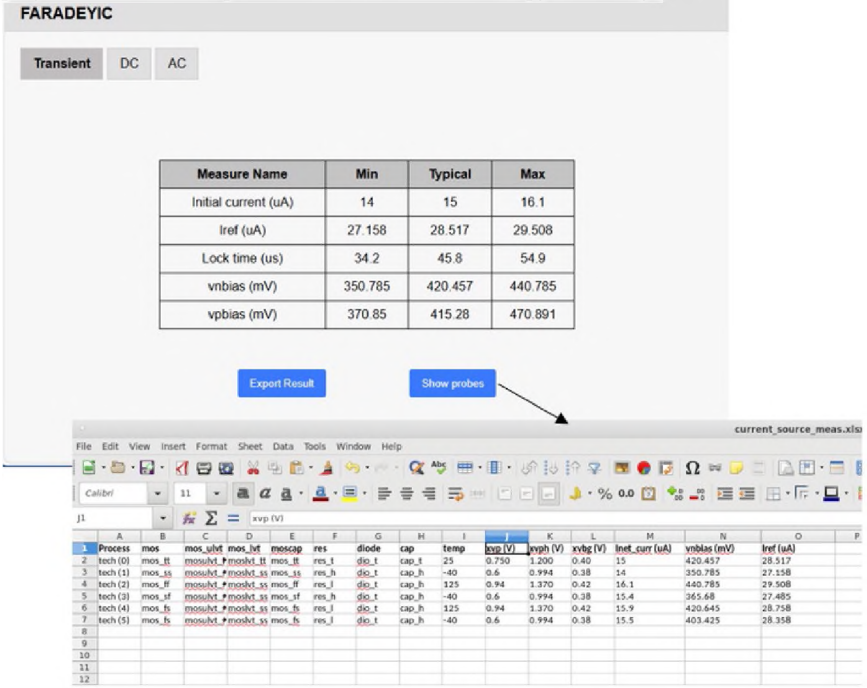


Рис. 19. Сохранение результатов, полученных с помощью кнопки <<Export results>> в Excel файле

Для оценки эффективности ИС FARADEYIC разработан внутрикристаллический источник тока с цифровым управлением и с использованием метода компенсации, повышающего точность. Проектирование выполнено по технологическому процессу 14 нм. Результаты сравнения представлены в табл. 6. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что разработанный

программный инструмент FARADEYIC позволяет проектировщикам эффективно применять его в процессе проектирования высокоточных источников тока.

Таблица 6

Сравнение параметров с использованием предлагаемых и существующих цифровых узлов управления и метода повышения точности источников тока в наихудшем угловом случае

Параметр	Существующий	Предложенный	Полученный с помощью программного инструмента
Погрешность тока (%)	± 10	7	7,1
КПД (%)	60	60	61
Коэффициент подавления шумов (dc) питания (дБ)	-	-40	-39
Коэффициент подавления шумов (ac) питания (дБ)	-	-20	-19
Площадь (мм ²)	0,0025	0,0048	0,0048

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Предложены подходы к повышению точности источников тока, используемых в ИС, позволяющий удовлетворить требования к схемам, в соответствии с современными требованиями, за счет снижения влияния разброса технологического процесса на работу системы управления. Последние также дают возможность с большей точностью прогнозировать поведение системы при различных значениях технологического процесса, напряжения питания и температуры [1-7].
2. Разработано схмотехническое решение источника тока, используемого в ИС, согласно которому путем совместного использования источника напряжения с положительным температурным коэффициентом (ПТК) и транзистора КМОП в триодном режиме погрешность величины тока приемно-передающих узлов не превысила $\pm 7\%$ за счет увеличения площади, занимаемой на полупроводниковом кристалле, не более чем на $3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$.
3. Создан способ регулировки внутрикристаллического сопротивления, благодаря которому за счет совместного использования генератора базовой

частоты и конденсатора КМОП погрешность сопротивления снижена до 4,5% путем увеличения площади поверхности, занимаемой на полупроводниковом кристалле, всего на $3,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$.

4. Разработан способ построения схемы внутрикристаллического источника тока, благодаря которому за счет совместной работы генератора постоянного тока и предложенной системы регулировки погрешность величины тока приемно-передающих узлов составила 7% путем увеличения площади, занимаемой полупроводниковым кристалле, на $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ [6].
5. Предложено схемотехническое решение высокоточного, защищенного от старения внутрикристаллического источника тока, согласно которому за счет совместного использования источников постоянного напряжения и напряжения с ПТК погрешность определения величины тока приемно-передающих узлов составляет $\pm 5\%$ путем увеличения площади, занимаемой на полупроводниковом кристалле, на величину, не превышающую $5,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ [1].
6. Разработанные в диссертации методы, методики и схемотехнические решения послужили основой предлагаемого программного средства FARADYIC для повышения точности источников тока. ПС было внедрено в ЗАО «СИНОПСИС АРМЕНИЯ» и использовалось при проектировании высокоточных источников тока для различных ИС. Разработки многочисленных источников тока показали высокую эффективность программного обеспечения, так как погрешность внутрикристаллического источника тока снижена до 7% за счет увеличения площади поверхности, занимаемой на полупроводниковом кристалле, на $5,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ [6].

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Sahakyan V.** An Accuracy Improvement Technique for On-Chip Current Sources // Proceedings of the NAS RA and NPUA. Series of Technical Sciences. -2023. – Vol. 76, no.3. – P. 351-357.
2. Reliable All PMOS Voltage Doublers for Low-Voltage Applications / **H. Gomtsyan, H. Sahakyan, R. Sghomonyan, V. Sahakyan, G. Voskanyan, A. Melikyan, S. Harutyunyan** // 2024 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – Yerevan, Armenia, 2024. – P. 1-4.
3. Aging Protected Precision CMOS Current Reference with Process, Supply Voltage and Temperature Compensation / **V. Sahakyan, R. Sghomonyan, S. Harutyunyan, H. Sahakyan, A. Galstyan, A. Katayan** // 2024 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – Yerevan, Armenia, 2024. – P. 01-04.
4. **Айрапетян А.С., Мартиросян Д.С., Саакян В.А.** Трехфазный параллельно-последовательный автономный инвертор тока на основе тиристоров // Вестник НПУА: Электротехника, Энергетика. -2021. -no.2. – P. 31-42.

5. **Айрапетян А.С., Гёзаян А.Х., Мартиросян Д.С., Саакян В.А.** Несимметричные выпрямители с системой управления на однопереходном транзисторе// Вестник НПУА: Электротехника, Энергетика. -2021. -no.1. – P. 9-20.
6. A High Precision CMOS Current Source With External Components / **V. Sahakyan, R. Sghomonyan, M. Bagratunyan, D. Marukhyan, V. Martirosyan** // Proceedings of the NAS RA and NPUA. Series of Technical Sciences.-2024. – Vol. 77, no.3. – P. 357-366.
7. Մեքենայական խոր ուսուցման մոդելի կիրառմամբ ինտեգրալ սխեմաների սինթրոազդանշանային ծառի ֆիզիկական նախագծման արդյունավետության բարձրացման եղանակ / **Վ.Շ. Մելիքյան, Ա.Ա. Գալստյան, Ա.Մ. Դանիելյան, Հ.Հ. Սահակյան, Վ.Ա. Սահակյան, Ռ.Մ. Սողոմոնյան** // Proceedings of the NAS RA and NPUA: Series of Technical Sciences. -2024. – Vol. 77, no.2. – P. 179-189.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ժամանակակից ինտեգրալ սխեմաները (ԻՄ) լայնորեն կիրառվում են բոլոր բնագավառներում՝ կենցաղից մինչև տիեզերական սարքաշինություն: Կիրառման նման մասշտաբները հնարավոր են դարձել ԻՄ-երի արտադրման տեխնոլոգիայի անընդհատ արդիականացման, ինքնարժեքի նվազման և ինտեգրման աստիճանի բազմապատկման հաշվին: Հատկանշական է փաստել, որ ժամանակակից տեխնոլոգիաները հնարավորություն են տալիս փոքրացնելու ԻՄ-երի առանցքային տարրերի՝ տրանզիստորների հոսքուղու երկարությունը՝ հասցնելով այն ընդհուպ մինչև 1,8մ-ի: Չափերի նման փոքրացման հաշվին մեկ ԻՄ-ում տրանզիստորների քանակը հասել է միլիարդների: Միևնույն ժամանակ, մասշտաբավորման հաշվին հնարավորություն է ստեղծվել՝ կառավարելու տրանզիստորները անհամեմատ փոքր՝ 800մՎ և ավելի ցածր լարումներով: Վերջինիս շնորհիվ՝ նվազել է ԻՄ-երի էներգասպառումը՝ հնարավոր դարձնելով արդյունավետորեն կիրառել դրանք ինչպես գերաբազ հաշվարկներ կատարող, այնպես էլ դուրակիկ սարքերում: Զարգացման վերոնշյալ միտումներն առաջացրել են նախագծման բազմաթիվ բարդություններ. մասնավորապես, էականորեն մեծացել է տեխնոլոգիական շեղումների ազդեցությունը տրանզիստորների պարամետրերի վրա: Ինչպես նախագծման, այնպես էլ հետագա կիրառման ընթացքում վերոնշյալ խնդիրներից խուսափելու նպատակով մշակվում և կիրառվում են այնպիսի եղանակներ, որոնք հիմնված են թվային կառավարման համակարգերի վրա: Նման համակարգերն ունեն անհամեմատ ավելի բարձր կայունություն թե՛ աղմուկների, թե՛ սնման լարման նվազման և թե՛ տեխնոլոգիական շեղումների նկատմամբ:

Վերոնշյալ հիմնահարցերը հաշվի առնելով՝ ԻՄ-երի նախագծման ոլորտի առաջատար ընկերությունները ներկայումս իրականացնում են մի շարք ռազմավարական միջոցառումներ, որոնք նպատակաուղղված են ԻՄ-երի ճշտության բարելավմանը: Այս միջոցառումները ներառում են նոր տեխնոլոգիաների ներդրում, գործընթացների օպտիմալացում և որակի վերահսկման համակարգերի զարգացում, որոնք ընդհանուր առմամբ նպաստում են նախագծերի ընդհանուր արդյունավետության բարձրացմանը: Նոր մեթոդները և մշակումները զգալիորեն բարձրացրել են հոսանքի աղբյուրների ճշտությունը, սակայն դեռևս առկա են խնդիրներ, որոնք մնում են արդիական և պահանջում են նոր մոտեցումների և գաղափարների իրագործում:

Ատենալիտությունը նվիրված է ժամանակակից ԻՄ-երում կիրառվող հոսանքի աղբյուրների կայունության բարձրացմանն ուղղված հիմնահարցերի վերլուծությանը և լուծմանը:

Առաջարկվել են ինտեգրալ սխեմաներում կիրառվող հոսանքի աղբյուրների ճշտության բարձրացման մոտեցումներ, որոնք, կարգաբերման

համակարգի աշխատանքի վրա տեխնոլոգիական գործընթացի փոփոխությունների ազդեցության նվազարկման շնորհիվ, բավարարում են ԻՄ-երին ներկայացվող ժամանակակից պահանջները: Վերջիններս հնարավորություն են ընձեռում՝ նաև տեխնոլոգիական գործընթացի, սնման լարման և ջերմաստիճանի տարբեր արժեքների դեպքում ավելի մեծ ճշտությամբ կանխատեսելու համակարգի վարքը:

Մշակվել է ինտեգրալ սխեմաներում կիրառվող հոսանքի աղբյուրի սխեմատիկական լուծում, որում դրական ջերմաստիճանային գործակցով լարման աղբյուրի և տրիոդային ռեժիմում գտնվող ԿՄՕԿ տրանզիստորի համատեղ կիրառման շնորհիվ՝ ընդունիչ-հաղորդիչ հանգույցների հոսանքի արժեքի սխալանքը չի գերազանցել $\pm 7\%$ -ը՝ կիսահաղորդչային բյուրեղի վրա զբաղեցրած մակերեսի $3 \cdot 10^{-9}$ մ²-ից ավելի արժեքով մեծացման հաշվին:

Ստեղծվել է ներբյուրեղային դիմադրության կարգաբերման եղանակ, որի դեպքում, հենակային հաճախության գեներատորի և ԿՄՕԿ կոնդենսատորի համատեղ կիրառման հետևանքով, դիմադրության սխալանքը հասցվել է մինչև $4,5\%$ - ի՝ կիսահաղորդչային բյուրեղի վրա զբաղեցրած մակերեսի ընդամենը $1,4 \cdot 10^{-9}$ մ²-ով մեծացման հաշվին:

Մշակվել է ներբյուրեղային հոսանքի աղբյուրի սխեմայի կառուցման եղանակ, որի դեպքում, հենակային հոսանքի գեներատորի և առաջարկվող կարգաբերման համակարգի համատեղ աշխատանքով պայմանավորված, ընդունիչ-հաղորդիչ հանգույցների հոսանքի արժեքի սխալանքը կազմել է 7% ՝ կիսահաղորդչային բյուրեղի վրա զբաղեցրած մակերեսի $5,3 \cdot 10^{-9}$ մ²-ով աճի հաշվին:

Առաջարկվել է ծեղացումից պաշտպանված բարձր ճշտությամբ ներբյուրեղային հոսանքի աղբյուրի սխեմատիկական լուծում, երբ հաստատուն հենակային և դրական ջերմաստիճանային գործակցով լարման աղբյուրների համատեղ կիրառմամբ՝ ընդունիչ-հաղորդիչ հանգույցների հոսանքի արժեքի սխալանքը կազմել է $\pm 5\%$ ՝ կիսահաղորդչային բյուրեղի վրա զբաղեցրած մակերեսի $3,3 \cdot 10^{-9}$ մ²-ն չգերազանցող արժեքով մեծացման հաշվին:

Ատենախոսությունում մշակված եղանակները, մեթոդները, սխեմատիկական լուծումները հիմք են հանդիսացել առաջարկված հոսանքի աղբյուրների կայունության բարձրացման FARADEYIC ծրագրային միջոցի համար: Այն ներդրվել է «ՄԻՆՈՓՄԻՍ ԱՐՄԵՆԻԱ» ՓԲԸ-ում և օգտագործվել է տարաբնույթ ինտեգրալ սխեմաների համար բարձր ճշտությամբ հոսանքի աղբյուրների նախագծման ժամանակ: Բազմաթիվ հոսանքի աղբյուրների մշակումները ցույց են տվել ծրագրային միջոցի բարձր արդյունավետությունը, քանի որ ներբյուրեղային հոսանքի աղբյուրի սխալանքը հասցվել է 7% -ի՝ կիսահաղորդչային բյուրեղի վրա զբաղեցրած մակերեսի $5,3 \cdot 10^{-9}$ մ²-ով աճի հաշվին:

**DEVELOPMENT AND EXAMINATION OF HIGH PRECISION CURRENT
SOURCE DESIGN METHODS**

SUMMARY

Modern integrated circuits (ICs) are widely used in all areas, from everyday life to space engineering. Such a scale of application has become possible due to the constant modernization of IC manufacturing technology, a decrease in cost, and a multiplication of the degree of integration. It is noteworthy that modern technologies make it possible to reduce the length of the flow path of the key elements of ICs, transistors, bringing it down to 1,8 nm. Due to such a reduction in size, the number of transistors in one IC has reached billions. At the same time, scaling has made it possible to control transistors with incomparably small voltages, 800 mV and lower. Thanks to the latter, the energy consumption of ICs has decreased, making it possible to effectively use them in both high-speed computing and portable devices. The above-mentioned development trends have caused numerous design complications: in particular, the influence of technological deviations on the parameters of transistors has significantly increased. On the other hand, as a result of reducing the supply voltage, the deviations of the parameters arising from the influence of electrical noise in ICs have multiplied, leading to a decrease in noise immunity. In order to avoid the above-mentioned problems both during design and subsequent use, methods based on digital control systems are being developed and applied. Such systems have incomparably higher stability to both noise and a decrease in the supply voltage, as well as technological deviations. However, such an approach is not applicable in cases where the problem arises of implementing a connection between the IC and the outside world: in particular, ultra-high-frequency signals transmitted in digital form lose their signal amplitude under the influence of various filters, and in the receiving system there is a need to restore the initial appearance.

Taking into account the above issues, leading companies in the field of IC design have recently implemented a number of strategic measures aimed at improving the accuracy of ICs. These measures include the introduction of new technologies, process optimization and the development of quality control systems, which generally contribute to increasing the overall efficiency of projects. New methods and developments have significantly increased the accuracy of power sources, but there are still problems that remain relevant and require new approaches and ideas.

The dissertation is devoted to the methodology for analyzing and solving key issues aimed at increasing the stability of current sources used in modern ICs.

Approaches to increasing the accuracy of current sources used in integrated circuits have been proposed, which meet modern requirements by reducing the impact of changes in the technological process on the operation of the control system. The latter also provides an opportunity to predict the behavior of the system with greater accuracy in the case of different values of the technological process, supply voltage and temperature.

A schematic solution for a current source used in integrated circuits has been developed, in which, due to the combined use of a voltage source with a positive temperature coefficient and a CMOS transistor in triode mode, the error in the current value of the receiver-transmitter junctions did not exceed $\pm 7\%$, due to an increase in the surface area occupied by the semiconductor crystal by more than $3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$.

A method for adjusting intra-crystal resistance has been developed, in which, due to the combined use of a base frequency generator and a CMOS capacitor, the resistance error has been reduced to 4.5% , due to an increase in the surface area occupied by the semiconductor crystal by only $1.4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$.

A method for constructing an intra-crystal current source circuit was developed, in which, due to the joint operation of the sine current generator and the proposed adjustment system, the error in the current value of the receiver-transmitter nodes was 7% , due to an increase in the surface area occupied by the semiconductor crystal by $5.3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$.

A schematic solution for a high-precision, aging-protected intra-crystalline current source has been proposed, where, by using constant-voltage and positive temperature coefficient voltage sources together, the error in the current value of the receiver-transmitter junctions is $\pm 5\%$ due to an increase in the surface area occupied by the semiconductor crystal by a value not exceeding $3.3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$.

The methods, techniques, and circuit-technical solutions developed in the dissertation served as the basis for the proposed FARADEYIC software tool for increasing the stability of power sources. It was implemented at "SYNOPSIS ARMENIA" CJSC and was used in the design of high-precision power sources for various integrated circuits. Developments of numerous current sources have shown the high efficiency of the software tool, since the error of the intra-crystal power source was reduced to 7% due to an increase in the surface area occupied by the semiconductor crystal by $5.3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$.

