
ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ, КВАНТОВЫХ УСТРОЙСТВ/ELECTRONIC COMPONENT BASE OF MICRO- AND NANOELECTRONICS, QUANTUM DEVICES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.38> EDN: AERECJ**РАЗРАБОТКА СЛОЖНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО БЛОКА ДАТЧИКА ХОЛЛА**

Научная статья

Козлов А.В.¹, Калугин Д.А.^{2,*}, Зотов В.В.³, Иванов А.А.⁴²ORCID : 0009-0009-2134-2433;^{1,2,3,4}Национальный исследовательский университет МИЭТ, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (dmitrykalugin1[at]yandex.ru)

Предложена: 22.02.2026; Принята: 04.06.2026; Опубликовано: 17.06.2026

Аннотация

Представлены основные этапы и результаты разработки сложно-функционального блока (СФ-блока) интегрального датчика Холла с расширенными функциональными возможностями. Отличительной чертой разработанного СФ-блока является наличие блоков подстройки параметров, позволяющих корректировать температурную нестабильность (подстройка температурного коэффициента) и начальное напряжение смещения (подстройка тока смещения) чувствительного элемента. Такой подход направлен на повышение точности и воспроизводимости результатов измерений магнитного поля в условиях изменяющихся температур. Маршрут проектирования ориентирован на использование отечественной КМОП технологии с топологическими нормами 250 нм. С целью валидации проектных решений разработан тестовый кристалл, интегрирующий в себе СФ-блок и интерфейс ввода-вывода. Приведены данные о конструкции тестового кристалла, позволяющего провести полный цикл контрольных измерений и подтвердить заложенные при проектировании параметры.

Ключевые слова: Датчик Холла, СФ-блок, ИОН, интегральный датчик, магнитный датчик.**DEVELOPMENT OF A COMPLEX FUNCTIONAL HALL SENSOR UNIT**

Research article

Kozlov A.V.¹, Kalugin D.A.^{2,*}, Zotov V.V.³, Ivanov A.A.⁴²ORCID : 0009-0009-2134-2433;^{1,2,3,4}National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (dmitrykalugin1[at]yandex.ru)

Suggested: 22.02.2026; Accepted: 04.06.2026; Published: 17.06.2026

Abstract

The main stages and results of the development of a complex functional unit (CF unit) for an integrated Hall sensor with extended functionality are presented. A distinctive trait of the developed CF unit is the presence of parameter adjustment units, which allow for the correction of temperature instability (temperature coefficient adjustment) and the initial bias voltage (bias current adjustment) of the sensing element. This approach is aimed at improving the accuracy and reproducibility of magnetic field measurement results under varying temperature conditions. The design approach is focused on the use of domestic CMOS technology with a 250 nm process node. To validate the design solutions, a test chip has been developed that integrates a sensor block and an input-output interface. Data on the design of the test chip are presented, which makes it possible to carry out a full cycle of verification measurements and confirm the parameters specified during the design phase.

Keywords: Hall sensor, CF unit, ION, integrated sensor, magnetic sensor.**Введение**

Современное проектирование интегральных схем требует поиска методов сокращения проектного цикла при сохранении качества разрабатываемых решений. Одним из таких методов является разработка библиотек сложно-функциональных блоков (СФ-блоков) — заранее спроектированных и верифицированных модулей, готовых к интеграции в системы на кристалле. Использование СФ-блоков позволяет существенно снизить время разработки, уменьшить количество итераций и совокупную стоимость создания конечного изделия.

Особую актуальность данный подход имеет для аналоговых чувствительных схем, параметры которых зависят от множества внешних факторов. К таким схемам относятся интегральные датчики Холла, широко применяемые в автомобильной и промышленной электронике для регистрации магнитных полей и измерения токов в силовых цепях. Анализ современных публикаций показывает, что основными факторами, снижающими точность датчиков Холла, являются ошибки смещения, шум, влияние внешних полей и, в особенности, температурный дрейф выходного сигнала [1].

Для смещения чувствительного элемента датчика Холла применяются два основных подхода. В режиме напряжения температурный дрейф чувствительности достигает 0,3 %/°С, что требует применения дополнительных схем компенсации. Режим токового смещения обеспечивает значительно меньший дрейф — порядка 0,05 %/°С [2]. Вместе с тем выбор абсолютной величины тока смещения представляет собой компромисс: его увеличение повышает

чувствительность датчика, но одновременно приводит к росту потребляемой мощности [3]. Таким образом, ключевой задачей при проектировании СФ-блока датчика Холла является обеспечение минимального температурного дрейфа при сохранении возможности гибкой настройки тока смещения.

В настоящей работе предложена архитектура СФ-блока интегрального датчика Холла, решающая обе обозначенные проблемы. Температурная стабильность достигается за счёт схемы подстройки на переключаемых резистивных звеньях, позволяющей варьировать наклон температурной характеристики от положительного до отрицательного значения и тем самым минимизировать дрейф в диапазоне от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Гибкость по току обеспечивается отдельным узлом настройки абсолютного значения тока смещения, что позволяет адаптировать соотношение чувствительности и потребления к требованиям конкретного применения.

Актуальность работы обусловлена растущей потребностью отечественной микроэлектронной промышленности в верифицированных аналоговых ИР-блоках для КМОП-технологий, а также отсутствием в открытом доступе готовых и гибких решений СФ-блоков датчиков Холла с встроенными механизмами калибровки температурного дрейфа и тока смещения.

Целью настоящей работы является разработка сложно-функционального блока интегрального датчика Холла с гибкой архитектурой, обеспечивающей возможность настройки температурного дрейфа выходного тока ниже уровня $0,05\text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ и регулировки абсолютного значения тока смещения чувствительного элемента в зависимости от требований конкретного применения.

Архитектура

Для обеспечения корректной и высокоточной работы датчика Холла критически важным параметром является стабильный ток его смещения. Именно величина и стабильность этого тока определяют чувствительность преобразователя, уровень шумов и линейность выходного сигнала [4]. Формирование такого точного тока невозможно без применения надежного источника опорного напряжения, независимого от напряжения питания и температуры. Однако сам источник опорного напряжения может не выйти на рабочий режим при включении питания без специальной схемы «старта». Схема запуска гарантирует корректный переход в устойчивое состояние, доопределяя его. На основе сгенерированного опорного напряжения далее формируется эталонный ток, который запускает магнитный датчик.

Для компенсации температурного дрейфа и технологических разбросов в блок включены два корректирующих узла: блок подстройки температурного коэффициента напряжения и блок подстройки уровня тока. Корректировочные блоки позволяют индивидуально откалибровать устройство после изготовления и, тем самым, обеспечить требуемую точность.

Также для корректной работы внутренних блоков и минимизации общего потребления схемы спроектирован внутренний источник питания, он устанавливает остальные блоки в рабочие режимы и помогает добиться низкой зависимости выходного тока от напряжения питания. Общая структурная схема представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 - Архитектура схемы датчика Холла
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.38.1>

Описание внутренних блоков

Общая архитектура сложно-функционального блока определяет иерархическую последовательность формирования напряжений и токов в системе, а также механизмы их корректировки для обеспечения стабильности.

Для детального анализа устройства, включающего построение электрических схем и их моделирование, использовались инструменты среды проектирования Cadence Virtuoso. Схема верхнего уровня представлена на рисунке 2.

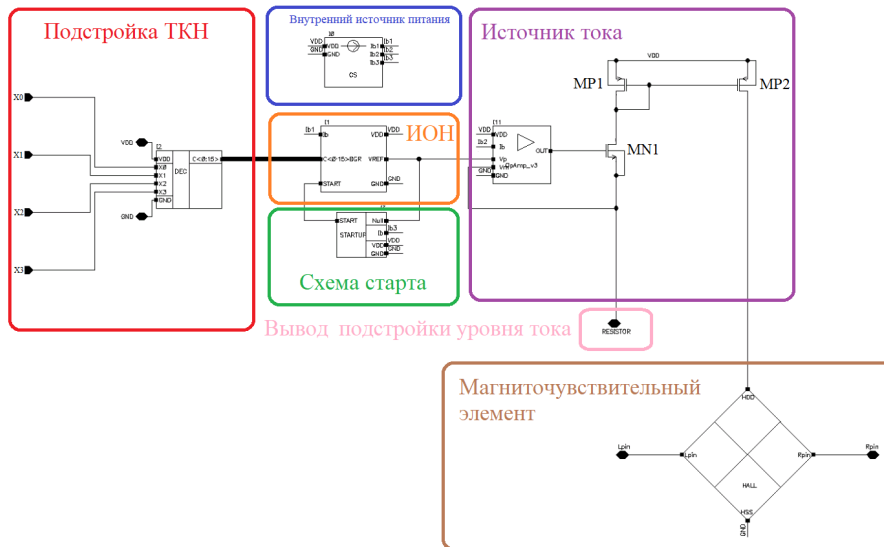


Рисунок 2 - Схема верхнего уровня
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.38.2>

3.1. Внутренний источника питания

Несмотря на относительно простую схемотехническую реализацию, представленную на рисунке 3, внутренний источник питания выполняет критически важную функцию в составе схемы, снижая зависимость формируемого тока от внешнего напряжения питания [5]. Так как изменение токов может повлиять на режимы работы других блоков в составе схемы, появляется необходимость снизить данную зависимость.

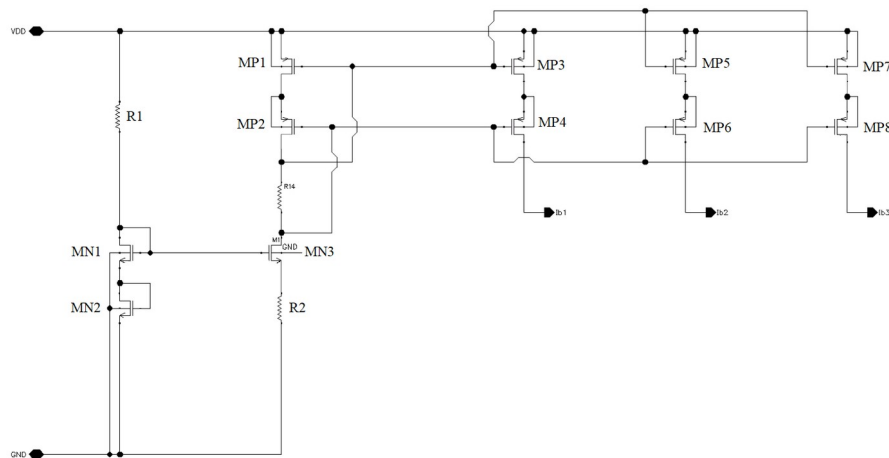


Рисунок 3 - Схема внутреннего источника питания
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.38.3>

На рисунке 4 можно заметить, что после запуска отклонение тока на рабочем участке составляет не более 1мкА.

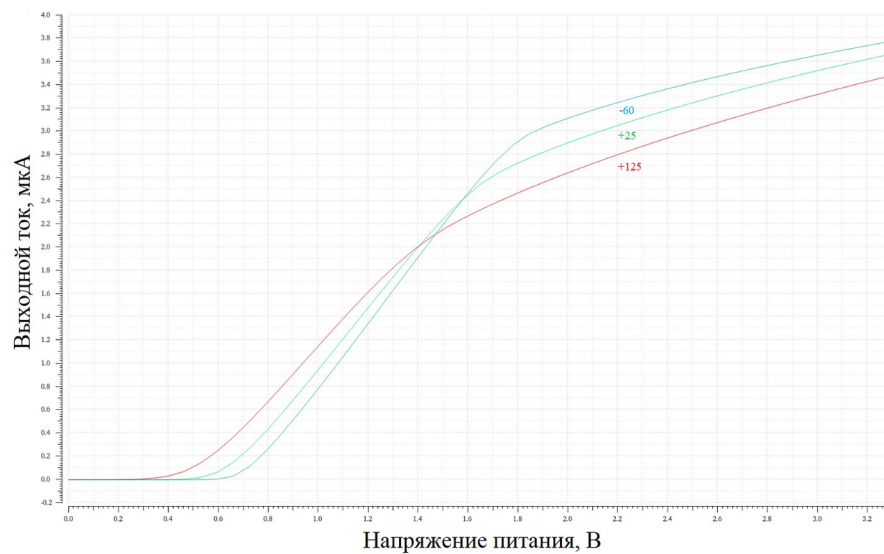


Рисунок 4 - Зависимость выходного тока от напряжения питания
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.38.4>

3.2. Источник опорного напряжения

Формирование температурно-стабильного опорного напряжения является важной задачей при проектировании аналоговых и аналого-цифровых систем. В составе сложно-функционального блока датчика Холла для этой цели реализован источник опорного напряжения на основе архитектуры Куижк [6]. Схема представлена на рисунке 5.

Данный подход основан на использовании свойств р-п переходов, обеспечивающих формирование напряжения с противоположными температурными коэффициентами. Суммирование этих компонентов позволяет получить результирующее напряжение, близкое к температурно-независимому.

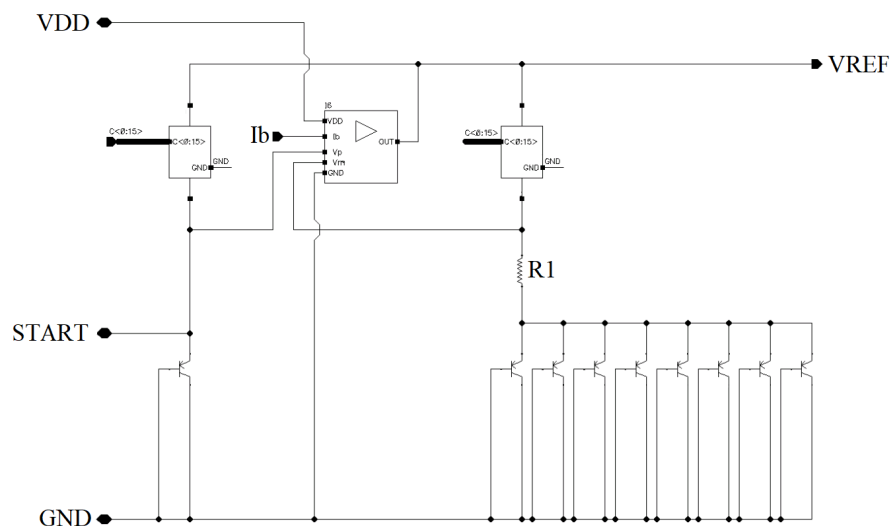


Рисунок 5 - Схема источника опорного напряжения
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.38.5>

В разработанной схеме коррекция температурной зависимости реализована за счёт переключаемых резистивных звеньев. Ключи (MOSFET-транзисторы), управляемые дешифратором, позволяют изменять эффективное сопротивление в ветвях источника опорного напряжения, что позволяет варьировать соотношение положительного и отрицательного температурного коэффициента, обеспечивая стабильность при отклонении технологических параметров [7]. Реализация блока подстройки представлена на рисунке 6.

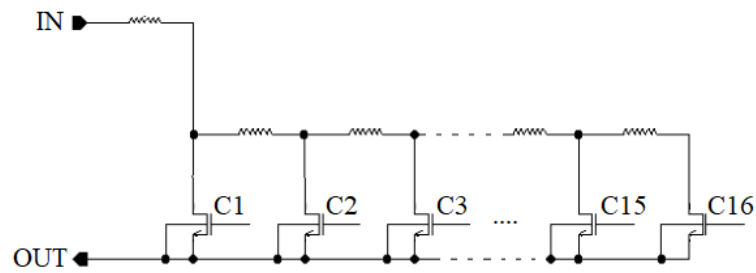


Рисунок 6 - Схема подстройки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.38.6>

На рисунке 7 показана температурная зависимость выходного напряжения при различных конфигурациях цепи подстройки. Видно, что с изменением включённых резистивных звеньев варьируется наклон характеристики: от положительного температурного коэффициента до отрицательного. Это подтверждает эффективность предложенного метода калибровки, позволяющего минимизировать температурный дрейф в расширенном диапазоне температур от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

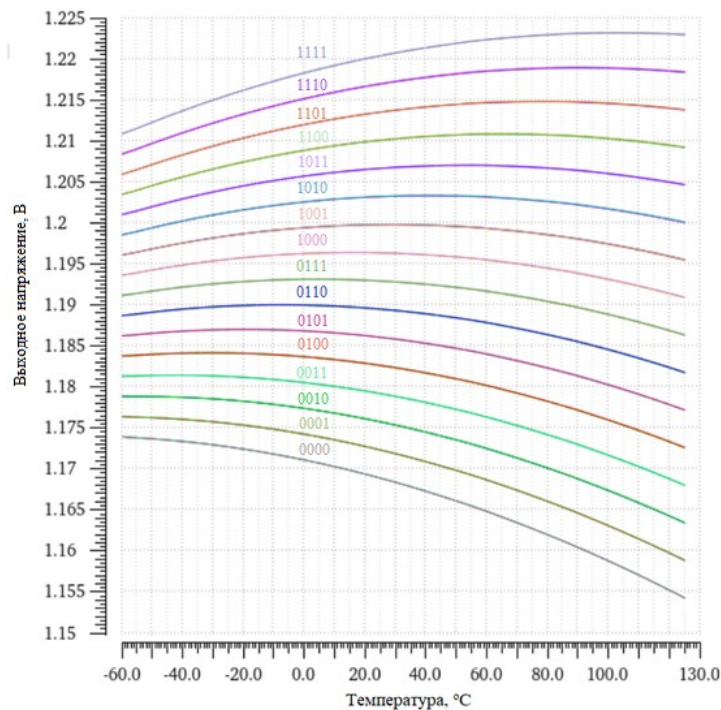


Рисунок 7 - Температурная зависимость источника опорного напряжения
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.38.7>

3.3. Схема старта

Несмотря на то, что источник опорного напряжения архитектуры $Ku\dot{i}jk$ обладает высокой стабильностью, его корректное функционирование невозможно без вспомогательных схем, обеспечивающих надёжный запуск. При включении питания цепь может находиться в метастабильных состояниях, в которых опорное напряжение не формируется. Для исключения подобных режимов используется специальная схема старта, представленная на рисунке 8.

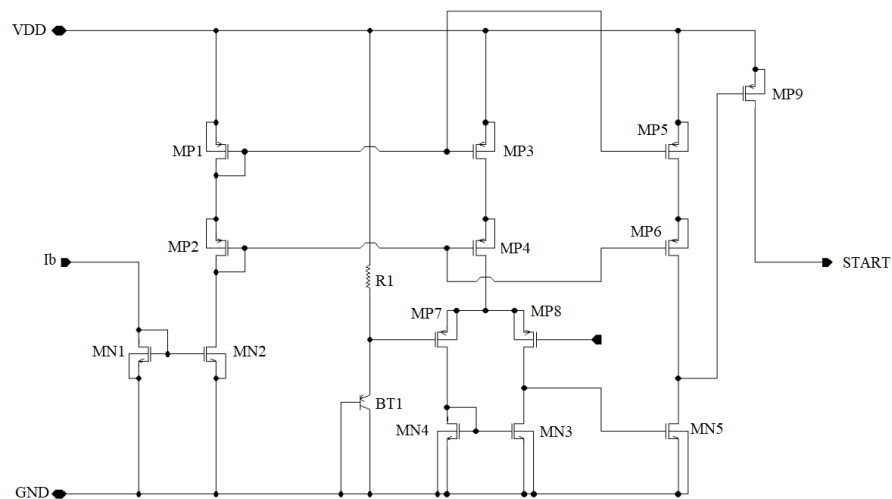


Рисунок 8 - Схема старта

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.38.8>

Архитектурно схема старта выполнена в виде компаратора, который отслеживает состояние выхода источника опорного напряжения при включении питания [8]. При низком уровне напряжения он принудительно инициирует запуск источника опорного напряжения, формируя управляющий сигнал. После выхода схемы на рабочую точку компаратор автоматически отключается, не влияя на дальнейшую работу.

3.4. Генератор тока

Стабилизированное опорное напряжение используется для формирования эталонного тока, который далее применяется как базовый смещающий ток в цепи датчика Холла. Генератор тока реализован по принципу преобразования напряжения в ток, в основе которого лежит операционный усилитель и резистивный элемент. Структурная схема представлена на рисунке 9.

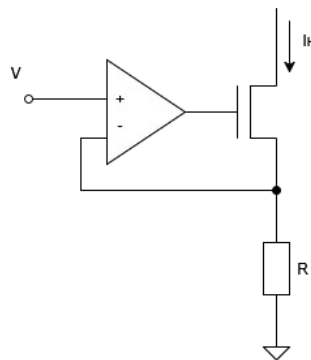


Рисунок 9 - Структурная схема источника тока

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.38.9>

Опорное напряжение подаётся на неинвертирующий вход операционного усилителя. Усилитель управляет транзистором таким образом, чтобы поддерживать равенство потенциалов на обоих входах. В результате на резисторе формируется падение напряжения, равное опорному напряжению. Данная схема обладает дополнительным преимуществом — возможностью варьирования тока смещения за счёт подстройки выходного резистора. В таблице 1 приведены параметры схемы при максимальной и минимальной настройках уровня тока и трех кодах регулировки температурного дрейфа (максимальный, средний и минимальный).

Таблица 1 - Варианты настройки источника тока

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.38.10>

Абсолютное значение тока, мкА	Код	Максимальное отклонение, мкА	Дрейф, %/С
5081	1111	51,26	0,005
4994	1001	17,91	0,002
4862	0000	-81,72	-0,009
10,16	1111	102,7	0,005
9,987	1001	35,66	0,002
9,724	0000	-163,2	-0,009

Как видно из таблицы 1, предложенная архитектура обеспечивает регулировку абсолютного значения тока смещения в диапазоне от ~10 мкА до ~5000 мкА, то есть на два порядка величины. При этом во всём диапазоне настройки сохраняется низкий температурный дрейф: при оптимальном коде регулировки (1001) он составляет 0,002 %/°С, что более чем на порядок ниже типового значения 0,05 %/°С для режима токового смещения. Таким образом, разработанный СФ-блок позволяет гибко адаптировать уровень тока смещения под требования конкретного применения без деградации температурной стабильности выходного сигнала.

3.5. Датчик Холла

Ключевой частью схемы является датчик магнитного поля, который преобразует внешнее магнитное поле в электрический сигнал. Ранее проведённые исследования и моделирование различных конфигураций позволили выбрать оптимальную форму магниточувствительного элемента (МЧЭ) в виде ромба [9]. Такая форма обладает большей чувствительностью и обеспечивает более равномерное распределение токов. Также такая геометрия удобна для топологического согласования, что улучшает симметрию выходного сигнала, способствует уменьшению смещения нуля и снижает влияние температурных и механических напряжений [10]. Топология МЧЭ представлена на рисунке 10.

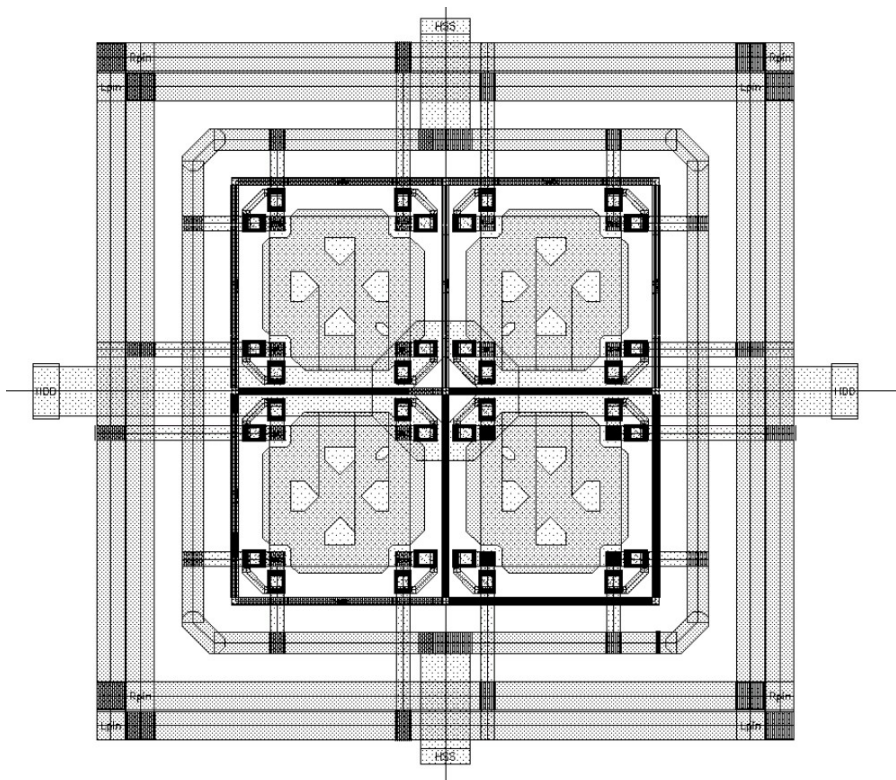


Рисунок 10 - Магниточувствительный элемент

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.38.11>

При проектировании топологии МЧЭ датчика Холла особое внимание уделялось симметричности разводки питающей цепи и выходных линий. Шины питания и сигнальные шины выполнены идентичными по геометрии и длине токопроводящих дорожек, что обеспечивает равенство сопротивлений во всех плечах измерительной схемы [11].

Данное конструктивное решение позволяет минимизировать систематическую погрешность, обусловленную разбалансом плеч датчика Холла. При несимметричной разводке разность сопротивлений токоведущих шин приводит

к возникновению паразитного напряжения смещения на выходных клеммах, которое накладывается на полезный сигнал Холла и не может быть устранено в процессе калибровки без дополнительных схемотехнических решений [12].

Применение симметричной топологии шин на этапе проектирования топологии позволяет исключить геометрически обусловленный разбаланс ещё до изготовления кристалла, что снижает требования к последующей подстройке и повышает воспроизводимость характеристик датчика от образца к образцу.

Заключение

В работе представлен комплексный подход к проектированию сложно-функционального блока интегрального датчика Холла на основе отечественной КМОП-технологии с топологическими нормами 250 нм. Разработанная архитектура включает источник опорного напряжения на основе схемы Kuijk, внутренний источник питания, схему старта, генератор тока, блоки подстройки температурного коэффициента и тока смещения, а также оптимизированный магниточувствительный элемент ромбовидной формы.

Ключевым результатом работы является достижение температурного дрейфа на уровне 0,002 %/°C при оптимальном коде настройки для режима токового смещения. Диапазон рабочих температур составляет от –60 °C до +125 °C. Разработанный блок подстройки на переключаемых резистивных звеньях обеспечивает варьирование наклона температурной характеристики от положительного до отрицательного значения, что позволяет компенсировать технологические разбросы после изготовления кристалла. Регулировка абсолютного значения тока смещения осуществляется в диапазоне от 10 мкА до 5000 мкА, то есть на два порядка величины, при этом температурная стабильность сохраняется во всём диапазоне настройки.

Совокупность полученных результатов подтверждает, что разработанный СФ-блок обеспечивает гибкую настройку параметров под требования конкретного применения без ухудшения температурной стабильности.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Crescentini M. Hall-Effect Current Sensors: Principles of Operation and Implementation Techniques / M. Crescentini, S. Fatima Syeda, G. Piero Gibiino // IEEE Sensors Journal. — 2021. — № 22. — P. 10137–10151. — DOI: 10.1109/JSEN.2021.3119766
2. Ramsden E. Hall-Effect Sensors: Theory and Application / E. Ramsden. — Amsterdam: Elsevier, 2011. — 250 p.
3. Crescentini M. Optimum Design Rules for CMOS Hall Sensors / M. Crescentini, M. Biondi, A. Romani et al. // Sensors. — 2017. — № 4. — P. 765. — DOI: 10.3390/s17040765
4. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. — Москва: Техносфера, 2006. — 592 с.
5. Ракитин В.В. Интегральные схемы на КМОП транзисторах / В.В. Ракитин. — Москва: МФТИ, 2007. — 308 с.
6. Hande V. Survey of bandgap and non-bandgap based voltage reference techniques / V. Hande, M. Shojaei Baghini // Scientia Iranica. — 2016. — № 6. — P. 2845–2861. — DOI: 10.24200/sci.2016.3994
7. Paul R. Trimming process and temperature variation in second-order bandgap voltage reference circuits / R. Paul, A. Patra // Microelectronics Journal. — 2011. — № 2. — P. 271–276.
8. Кобзев Ю.М. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем. Краткий справочник разработчика / Ю.М. Кобзев, В.И. Эннс. — Москва: Горячая линия-телеком, 2005. — 457 с.
9. Козлов А.В. Исследование и разработка датчика Холла по VCD-технологии / А.В. Козлов, Д.А. Калугин, Г.В. Алексеев // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. — 2024. — № 4. — С. 39–44. — DOI: 10.52190/1729-6552_2024_4_39
10. Баранчиков М.Л. Микромагнитоэлектроника / М.Л. Баранчиков. — Москва: ДМК Пресс, 2016. — 544 с.
11. Rorović R.S. Hall Effect Devices / R.S. Rorović. — Boca Raton: CRC Press, 2003. — 426 p.
12. Баранчиков М.Л. Особенности магниточувствительных сенсоров на основе полевого датчика Холла / М.Л. Баранчиков, А.В. Леонов, В.Н. Мордкович и др. // Приборы и техника эксперимента. — 2012. — 6. — С. 100–107.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Crescentini M. Hall-Effect Current Sensors: Principles of Operation and Implementation Techniques / M. Crescentini, S. Fatima Syeda, G. Piero Gibiino // IEEE Sensors Journal. — 2021. — № 22. — P. 10137–10151. — DOI: 10.1109/JSEN.2021.3119766
2. Ramsden E. Hall-Effect Sensors: Theory and Application / E. Ramsden. — Amsterdam: Elsevier, 2011. — 250 p.
3. Crescentini M. Optimum Design Rules for CMOS Hall Sensors / M. Crescentini, M. Biondi, A. Romani et al. // Sensors. — 2017. — № 4. — P. 765. — DOI: 10.3390/s17040765
4. Frajden Dzh. Sovremenny'e datchiki. Spravochnik [Modern Sensors: A Handbook] / Dzh. Frajden. — Moscow: Technosfera, 2006. — 592 p. [in Russian]



5. Rakitin V.V. Integral'ny'e sxemy' na KMOP tranzistorax [CMOS integrated circuits] / V.V. Rakitin. — Moscow: MFTI, 2007. — 308 p. [in Russian]
6. Hande V. Survey of bandgap and non- bandgap based voltage reference techniques / V. Hande, M. Shojaei Baghini // Scientia Iranica. — 2016. — № 6. — P. 2845–2861. — DOI: 10.24200/sci.2016.3994
7. Paul R. Trimming process and temperature variation in second-order bandgap voltage reference circuits / R. Paul, A. Patra // Microelectronics Journal. — 2011. — № 2. — P. 271–276.
8. Kobzev Yu.M. Proektirovanie analogovy'x KMOP-mikrosxem. Kratkij spravochnik razrabotchika [Designing Analog CMOS ICs: A Developer's Quick Reference Guide] / Yu.M. Kobzev, V.I. E'nns. — Moscow: Goryachaya liniya-telekom, 2005. — 457 p. [in Russian]
9. Kozlov A.V. Issledovanie i razrabotka datchika Xolla po BCD-texnologii [Research and development of Hall sensor using BCD technology] / A.V. Kozlov, D.A. Kalugin, G.V. Alekseev // Defense complex — scientific and technical progress of Russia. — 2024. — № 4. — P. 39–44. — DOI: 10.52190/1729-6552_2024_4_39 [in Russian]
10. Baranochnikov M.L. Mikromagnitoe'lektronika [Micromagneto-electronics] / M.L. Baranochnikov. — Moscow: DMK Press, 2016. — 544 p. [in Russian]
11. Popović R.S. Hall Effect Devices / R.S. Popović. — Boca Raton: CRC Press, 2003. — 426 p.
12. Baranchikov M.L. Osobennosti magnitochuvstivitel'ny'x sensorov na osnove polevogo datchika Xolla [Features of magnetosensitive sensors based on a Hall field sensor] / M.L. Baranchikov, A.V. Leonov, V.N. Mordkovich et al. // Devices And Experimental Techniques. — 2012. — 6. — P. 100–107. [in Russian]