

УДК 621.3.049.774.2

**СИГМА-ДЕЛЬТА АЦП ПО ТЕХНОЛОГИИ КНИ ДЛЯ РАБОТЫ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ\*****А. С. КОРОТКОВ, Д. В. МОРОЗОВ, М. М. ПИЛИПКО, М. С. ЕНУЧЕНКО***Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Россия, Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, 29*

**Аннотация.** В работе рассмотрена разработка интегральной схемы и результаты измерений тестовых кристаллов для сигма-дельта АЦП с разрядностью 12 бит на основе 180 нм технологии «кремний–на–изоляторе» (КНИ) компании X-FAB. При напряжении питания 3,3 В и тактовой частоте модулятора 10 МГц АЦП обрабатывает входные сигналы в полосе частот до 100 кГц в диапазоне температур  $-40\dots+175$  °С. Схема содержит предварительный фильтр нижних частот пятого порядка на переключаемых конденсаторах для ограничения спектра входного сигнала, каскадное соединение сигма-дельта модуляторов второго порядка, и цифровой децимирующий фильтр для снижения тактовой частоты в 48 раз. Основные блоки ограничивающего фильтра и модулятора собраны по балансной схеме на интеграторах на основе операционных транскондуктивных усилителей с полосой единичного усиления 63 МГц. Для расширения динамического диапазона преобразователя использована схема динамического согласования элементов, которая уменьшает уровень нелинейных искажений в цифроаналоговых преобразователях в цепях обратных связей модулятора. Обеспечено значение параметра SINAD не хуже 68 дБ при преобразовании сигнала с дифференциальной амплитудой 500 мВ на частоте 100 кГц.

**Ключевые слова:** аналого-цифровой преобразователь; сигма-дельта АЦП; высокая температура; цифро-аналоговый преобразователь; динамическое согласование элементов; кремний-на-изоляторе; интегральная схема; цифровой фильтр; схемы на переключаемых конденсаторах

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Как известно, сигма-дельта аналого-цифровые преобразователи (АЦП) широко используются в различных радиоэлектронных устройствах [1, 2], однако в настоящее время востребована электронная компонентная база для применения в условиях высоких температур, например, для распределенных сенсорных систем [3–5]. В данной работе обсуждаются разработка интегральной схемы и результаты изме-

рений тестовых кристаллов сигма-дельта АЦП для применения в расширенном температурном диапазоне, что обеспечивается использованием технологии «кремний–на–изоляторе» (КНИ).

Выбрана технология ХТ018 компании X-FAB с топологическими размерами 180 нм, имеющая рабочий диапазон температур  $-40\dots175$  °С, тогда как большинство известных технологий КНИ рассчитаны на темпера-

---

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению «Передовые цифровые технологии» СПбПУ (соглашение от 17.11.2020 № 075-15-2020-934).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. Коротков, Д. Морозов, М. Пилипко, И. Пятак, Д. Буданов, “Аналого-цифровые преобразователи для беспроводных систем связи: опыт разработки,” *Электроника: наука, технология, бизнес*, № 2, С. 40–47, 2016, uri: <https://www.electronics.ru/journal/article/5133>.
2. В. С. Голуб, “Сигма-дельта модулятор: уточнение эквивалентной схемы и передаточной функции,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 53, № 6, с. 48–57, 2010, doi: [10.20535/S0021347010060063](https://doi.org/10.20535/S0021347010060063).
3. А. С. Бенедиктов, Н. А. Шелепин, П. В. Игнатов, А. А. Михайлов, А. Г. Потупчик, “Исследование динамических характеристик высокотемпературных элементов КНИ КМОП СБИС, ‘микроэлектроника,’” *Микроэлектроника*, № 3, С. 222–225, 2018, doi: [10.7868/S0544126918030067](https://doi.org/10.7868/S0544126918030067).
4. J. Pathrose, C. Liu, K. T. C. Chai, Y. Ping Xu, “A time-domain band-gap temperature sensor in SOI CMOS for higher temperature applications,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 62, no. 5, pp. 436–440, 2015, doi: [10.1109/TCSII.2014.2386231](https://doi.org/10.1109/TCSII.2014.2386231).
5. M. Malits, I. Brouk, Y. Nemirovsky, “Temperature sensing circuits in CMOS-SOI technology,” in *2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems, COMCAS 2017*, 2017, vol. 2017-Novem, pp. 1–5, doi: [10.1109/COMCAS.2017.8244788](https://doi.org/10.1109/COMCAS.2017.8244788).
6. L. Pedala, U. Sonmez, F. Sebastiano, K. A. A. Makinwa, K. Nagaraj, J. Park, “An oxide electrothermal filter in standard CMOS,” in *2016 IEEE SENSORS*, 2016, pp. 1–3, doi: [10.1109/ICSENS.2016.7808512](https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808512).
7. H. Shan, J. Peterson, M.-S. Tsai, Y. Tang, N. J. Conrad, S. Mohammadi, “A low power CMOS temperature sensor frontend for RFID tags,” in *2018 IEEE 18th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF)*, 2018, pp. 15–18, doi: [10.1109/SIRF.2018.8304217](https://doi.org/10.1109/SIRF.2018.8304217).
8. F. Gerfers, N. Lotfi, E. Wittenhagen, H. Ghafarian, Y. Tian, M. Runge, “Body-bias techniques in CMOS 22FDX® for mixed-signal circuits and systems,” in *2019 26th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, 2019, pp. 466–469, doi: [10.1109/ICECS46596.2019.8964676](https://doi.org/10.1109/ICECS46596.2019.8964676).
9. А. С. Коротков, М. М. Пилипко, Д. В. Морозов, Й. Хауэр, “Дельта-сигма модулятор с частотой дискретизации 50 МГц на основе 0.18 мкм КМОП технологии,” *Микроэлектроника*, Т. 39, № 3, С. 230–240, 2010, uri: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13857239>.
10. J. M. de la Rosa, R. Schreier, K.-P. Pun, S. Pavan, “Next-generation delta-sigma converters: trends and perspectives,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 5, no. 4, pp. 484–499, 2015, doi: [10.1109/JETCAS.2015.2502164](https://doi.org/10.1109/JETCAS.2015.2502164).
11. B. Razavi, “The delta-sigma modulator [a circuit for all seasons],” *IEEE Solid-State Circuits Mag.*, vol. 8, no. 2, pp. 10–15, 2016, doi: [10.1109/MSSC.2016.2543061](https://doi.org/10.1109/MSSC.2016.2543061).
12. М. Соника, Д. Д. Неема, Р. Н. Пател, “Конструкции многобитного сигма-дельта модулятора,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 59, № 6, с. 3, 2016, doi: [10.20535/S0021347016060017](https://doi.org/10.20535/S0021347016060017).
13. A. S. Kozlov, M. M. Pilipko, “A second-order sigma-delta modulator with a hybrid topology in 180nm CMOS,” in *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2020, pp. 144–146, doi: [10.1109/EIConRus49466.2020.9039246](https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039246).
14. G. Jovanovic Dolecek, J. R. Garcia Baez, M. Laddomada, “Design of efficient multiplierless modified cosine-based comb decimation filters: analysis and implementation,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 64, no. 5, pp. 1051–1063, 2017, doi: [10.1109/TCSI.2017.2653720](https://doi.org/10.1109/TCSI.2017.2653720).
15. Q. Huang, P. Wan, X. Xie, C. Wang, L. Su, Z. Chen, “Digital filter design of a high resolution audio sigma-delta adc,” in *2018 12th IEEE International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID)*, 2018, pp. 208–211, doi: [10.1109/ICASID.2018.8693141](https://doi.org/10.1109/ICASID.2018.8693141).
16. Патент РФ № 2683185. Операционный транскондуктивный усилитель с дифференциальным выходом. Морозов Д. В., Пилипко М. М., Буданов Д. О., Енученко М. С. – опубл. 26.03.2019. Бюл. №9.
17. R. T. Baird, “Linearity enhancement of multibit  $\Delta\Sigma$  A/D and D/A converters using data weighted averaging,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Analog Digit. Signal Process.*, vol. 42, no. 12, pp. 753–762, 1995, doi: [10.1109/82.476173](https://doi.org/10.1109/82.476173).
18. V. O’Brien, B. Mullane, “High order mismatch shaping for low oversampling rates,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 67, no. 1, pp. 42–46, 2020, doi: [10.1109/TCSII.2019.2904180](https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2904180).
19. J. R. Shakyа, G. C. Temes, “Efficient calibration of feedback dac in delta sigma modulators,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 67, no. 5, pp. 826–830, 2020, doi: [10.1109/TCSII.2020.2984025](https://doi.org/10.1109/TCSII.2020.2984025).
20. В. И. Слюсар, М. В. Бондаренко, “Методы оценивания джиттера АЦП в некогерентных системах,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 54, № 10, С. 19–28, 2011, doi: [10.20535/S0021347011100037](https://doi.org/10.20535/S0021347011100037).
21. W. Kester, *The Data Conversion Handbook*. Oxford: Newnes, 2005.

Поступила в редакцию XX.XX.2020

После доработки XX.XX.2020

Принята к публикации XX.XX.2020