

УДК: 621.38

Мария О. Калашникова<sup>1</sup>, Роман С. Торшин<sup>2</sup>, Георгий С. Сорокоумов<sup>3</sup>,  
Александр А. Демидов<sup>4</sup>, Дмитрий В. Бойченко<sup>5</sup>

<sup>1,3,4,5</sup>Акционерное общество «Экспериментальное научно-производственное объединение  
«Специализированные электронные системы»,  
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия

<sup>1,2,5</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия

<sup>1</sup>e-mail: mokal@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7892-0312>

<sup>2</sup>e-mail: rstor@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8053-1343>

<sup>3</sup>e-mail: gssor@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8446-6144>

<sup>4</sup>e-mail: aadem@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7123-7644>

<sup>5</sup>e-mail: dvboy@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8382-4675>

## ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГМА-ДЕЛЬТА АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.2.09>

*Аннотация.* В работе проводилось исследование зависимости основных спектральных параметров аналого-цифровых преобразователей (АЦП) архитектуры сигма-дельта от поглощенной дозы. В исследованиях контролировались основные критериальные параметры АЦП: динамические, статические и электрические. Основными динамическими характеристиками сигма-дельта АЦП являются отношение сигнал-шум (SNR), динамический диапазон, свободный от гармоник (SFDR), отношение сигнала к шуму и искажениям (SINAD) и полные нелинейные искажения (THD), которые определялись по спектру оцифрованного синусоидального сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Статические параметры (интегральная нелинейность (ИНЛ), ошибки смещения и усиления) определялись с помощью прямой, линеаризирующей передаточную характеристику, по методике, описанной в стандарте IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters. В качестве контрольно-измерительного оборудования для тестирования критериальных параметров использовались модульные измерительные приборы фирмы National Instruments. Получены сравнительные данные о дозовой зависимости статических и динамических параметров микросхем сигма-дельта АЦП и сигма-дельта модулятора. На основании результатов сделан вывод, что наиболее чувствительными параметрами сигма-дельта АЦП к дозовому воздействию являются динамические параметры, поэтому при оценке стойкости сигма-дельта АЦП к воздействию поглощенной дозы необходим контроль его спектральных характеристик.

*Ключевые слова:* аналого-цифровой преобразователь, сигма-дельта, метод гистограмм, статические и динамические параметры АЦП, тестирование микросхем, поглощенная доза.

*Для цитирования:* КАЛАШНИКОВА, Мария О. и др. ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГМА-ДЕЛЬТА АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ. *Безопасность информационных технологий*, [S.l.], т. 30, № 2, с. 127–141, 2023. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1502>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.2.09>.

Maria O. Kalashnikova<sup>1,2</sup>, Roman S. Torshin<sup>1</sup>, Georgy S. Sorokoumov<sup>2</sup>,  
Alexander A. Demidov<sup>2</sup>, Dmitry V. Boychenko<sup>1,2</sup>

<sup>1,3,4,5</sup>Joint Stock Company “SPELS”,

Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia

<sup>1,2,5</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia

<sup>1</sup>e-mail: mokal@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7892-0312>

<sup>2</sup>e-mail: [rstor@spels.ru](mailto:rstor@spels.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8053-1343>

<sup>3</sup>e-mail: [gssor@spels.ru](mailto:gssor@spels.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8446-6144>

<sup>4</sup>e-mail: [aadem@spels.ru](mailto:aadem@spels.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7123-7644>

<sup>5</sup>e-mail: [dvboy@spels.ru](mailto:dvboy@spels.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8382-4675>

## **Dose dependence of the spectral characteristics of sigma-delta analog-to-digital converters**

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.2.09>

*Abstract.* This paper presents the results of the study of sigma-delta analog-to-digital converters' main spectral parameters' dependence on the total ionizing dose (TID). Within the framework of this study the main parameters of analog-to-digital converters (ADC) (dynamic, static and electrical) were controlled. The main dynamic characteristics of sigma-delta ADC are signal-to-noise ratio (SNR), spurious-free dynamic range (SFDR), signal-to-noise and distortion ratio (SINAD) and total harmonic distortion (THD). Those have been determined from the spectrum of digitized sine signal using the fast Fourier transform (FFT). Static parameters (integrated nonlinearity (INL), offset and gain errors) were determined using a straight line that linearizes the transfer function, according to the method which is described in the IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters. National Instruments modular measuring equipment was used for testing ADC's parameters. Comparative data on the dose dependence of static and dynamic parameters of two sigma-delta ADC and one sigma-delta modulator are obtained. Based on the results, it was concluded that the most sensitive parameters of sigma-delta ADC to TID are its dynamic parameters. Therefore, when assessing the sigma-delta ADC's radiation hardness, the spectral characteristics of absorbed dose should be kept under control.

*Keywords:* analog-to-digital converter, sigma-delta, histogram method, ADC's static parameters, ADC's dynamic parameters, chip testing, total ionizing dose.

*For citation:* KALASHNIKOVA, Maria O. et al. Dose dependence of the spectral characteristics of sigma-delta analog-to-digital converters. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 30, no. 2, p. 127–141, 2023. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1502>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.2.09>.

### **Введение**

В настоящее время передача, прием и обработка информации осуществляется с помощью автоматических и автоматизированных систем. Для преобразования информации из аналоговой формы в цифровую используются АЦП. Особую роль играют сигма-дельта АЦП, обладающие высокой разрядностью, высокими отношением сигнал-шум и линейностью характеристики преобразования. Сигма-дельта АЦП широко применяются в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов, например, в системах телеметрии, в радиосвязи, в составе датчиков изображений, в аудиосенсорах, в распределенных системах для синхронизации подсистем [1–3].

Для этих приложений критична высокая точность преобразования. В этом случае наиболее важными параметрами являются отношение сигнал-шум (SNR), динамический диапазон, свободный от гармоник (SFDR) и другие динамические параметры [4]. Деградация этих характеристик вследствие накопления поглощенной дозы может привести к искажению и потере информации, а также отказу элементов, входящих в состав бортовой аппаратуры. Таким образом, определение радиационной стойкости сигма-дельта АЦП при воздействии ионизирующего излучения космического пространства является одной из важных задач обеспечения безопасности информации.

Обычно при исследовании АЦП на стойкость к дозовому воздействию проводится контроль критериальных параметров методом совместного использования гистограммного теста<sup>1</sup> (для определения статических параметров преобразователя) и теста, основанного на

<sup>1</sup>ОСТ II 0078.3-84 Микросхемы интегральные. Аналого-цифровые преобразователи. Методы измерения параметров характеристики преобразования.

реализации алгоритмов БПФ, для контроля динамических параметров [5–7]. Входными аналоговыми сигналами для проведения такого теста служат синусоидальный и линейно-возрастающий (пилообразный) сигнал.

Гистограммный метод основан на накоплении большого числа отсчетов входного сигнала с известной плотностью вероятности за определенный временной период [8]. Но для преобразователей высокой разрядности с низкой частотой дискретизации, в частности для сигма-дельта АЦП, требуется огромный объем данных для построения гистограммы, при этом время тестирования может превышать несколько суток [9].

При этом метод гистограмм основан на нахождении межкодowych переходов характеристики преобразования (ХП) АЦП, по которым и определяются статические параметры преобразователя [8]. Однако для сигма-дельта АЦП отсутствует само понятие межкодowego перехода [10], поэтому применять гистограммный метод для тестирования преобразователей данной архитектуры будет некорректно.

Таким образом, возникает задача разработки альтернативной методики, позволяющей проводить полное функциональное тестирование сигма-дельта АЦП за временной интервал, вписывающийся в рамки радиационного эксперимента (не более 120 с), и по его результатам определять уровень стойкости исследуемого преобразователя к дозовому воздействию.

В рассмотренной методике предлагается тестирование сигма-дельта АЦП с помощью измерения спектра входного аналогового сигнала и контроля дозового поведения его спектральных характеристик [11]. Преимуществами данного метода являются его относительная быстрота и возможность более точного определения уровня стойкости микросхем к дозовому воздействию.

Однако из-за большой разрядности сигма-дельта АЦП его младший значащий разряд (МЗР) составляет около 0,1 мкВ. Поэтому различные источники шума (оснастка, источник входного аналогового сигнала, помехи по линиям питания, цифровые помехи, собственный шум АЦП<sup>2</sup>) будут вносить негативное воздействие в работу микросхемы. Таким образом, к недостаткам используемого метода можно отнести сложность минимизации шумового воздействия и генерации достаточно чистого аналогового входного сигнала для получения отношения сигнал-шум больше 100 дБ.

#### **Объекты исследования**

В качестве объектов исследования были выбраны микросхемы:

- 8-канальный 24-разрядный сигма-дельта АЦП с максимальной частотой оцифровки 16 кГц (далее по тексту – АЦП1).
- 24-разрядный сигма-дельта АЦП фирмы, содержащий модулятор 4-го порядка, с максимальной частотой оцифровки 30 кГц (далее по тексту – АЦП2).
- одноканальный аналоговый КМОП-модулятор 2-го порядка, предназначенный для преобразования среднего и высокого разрешения с частотой 39 кГц и коэффициентом избыточной дискретизации 256 (далее по тексту – АЦП3).

#### **Методика эксперимента**

Для контроля критериальных параметров во время дозового воздействия использовался тестовый комплекс на основе модулей PXI фирмы National Instruments:

- NI PXI-7841R – многофункциональный модуль PXI, имеющий в своем составе ПЛИС Virtex-5 LX30, 96 цифровых линий, 8 аналоговых входов и 8 аналоговых выходов с 16-битным разрешением.

---

<sup>2</sup>Understanding noise sources in delta-sigma ADC signal chain design. Texas Instruments. URL: <https://training.ti.com/understanding-noise-sources-delta-sigma-adc-signal-chain-design> (дата обращения: 09.02.2023).

- NI PXI-4110 – 3-канальный программируемый источник питания постоянного тока.
- В качестве источника входного сигнала использовался модуль 24-разрядного ЦАП PXI-4461.

Схема проведения тестирования с помощью БПФ представлена на рис. 1 [8]. ЦАП из состава модуля PXI-4461 генерировал входной синусоидальный сигнал заданной частоты и амплитуды. С помощью модуля FPGA PXI-7841R был реализован цифровой интерфейс взаимодействия с исследуемым преобразователем: инициализация регистровых структур, задание режима, подача сигнала тактирования и снятие оцифрованных данных. Подача питания и измерение токов потребления осуществлялись с помощью модуля PXI-4110. Описанные модули были собраны в единую систему с помощью шасси PXI-1033.

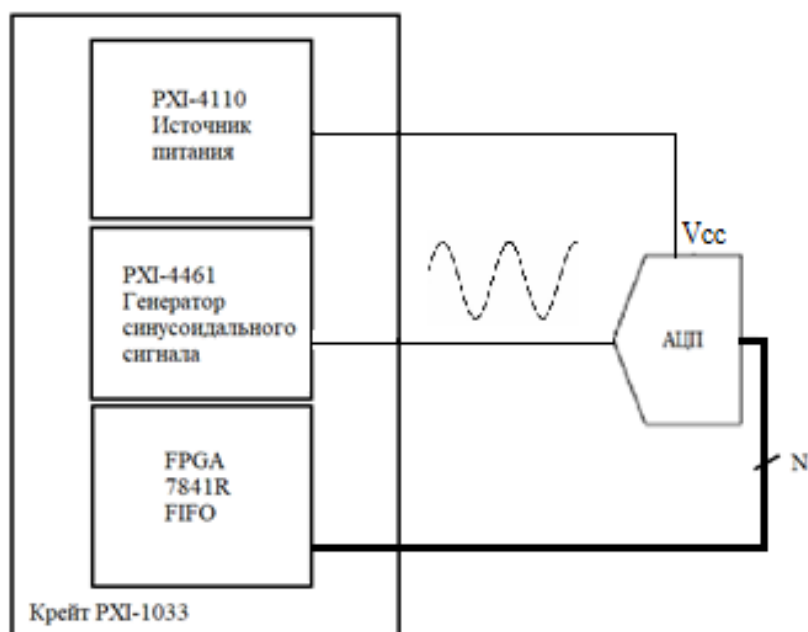


Рис. 1. Схема измерения спектра входного синусоидального сигнала  
Fig. 1. Scheme of ADC dynamic parameters` test

Для измерения статических параметров на аналоговый вход АЦП с помощью модуля PXI-4461 подавался линейно возрастающий сигнал с шагом, превышающим МЗР, и строилась характеристика преобразования (ХП) АЦП. Измерение ИНЛ проводилось с помощью линеаризирующей прямой, при этом для каждого значения входного напряжения определялось отклонение реальной ХП от линеаризирующей прямой<sup>3</sup>.

При определении ошибок смещения и усиления через начальную и конечную точки передаточной характеристики АЦП проводилась линеаризирующая прямая. Погрешность смещения определялась как отклонение линеаризирующей прямой от идеальной ХП в начальной точке шкалы, погрешность усиления представляет собой разницу между наклоном идеальной передаточной характеристики и наклоном аппроксимирующей прямой<sup>4</sup>.

<sup>3</sup>IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters, IEEE Standard. 1241-2010.

<sup>4</sup>AC & DC specifications: Offset error, gain error, CMRR, PSRR, SNR and THD. Texas Instruments. URL: <https://training.ti.com/ti-precision-labs-adcs-ac-dc-specifications-offset-error-gain-error-cmrr-psrr-snr-and-thd?contex> (дата обращения: 28.12.2022).

## Результаты исследования

В качестве критериальных параметров исследуемых микросхем были выбраны следующие параметры: SFDR, SINAD, SNR, THD, а также токи потребления, ИНЛ, погрешности смещения и усиления и стандартное отклонение кодов при постоянном входном напряжении [12].

### 1. Исследование АЦП

Динамические параметры АЦП контролировались при частоте входного синусоидального сигнала 1 кГц, при частоте оцифровки 16 кГц. Результаты эксперимента представлены на рис. 2–5.

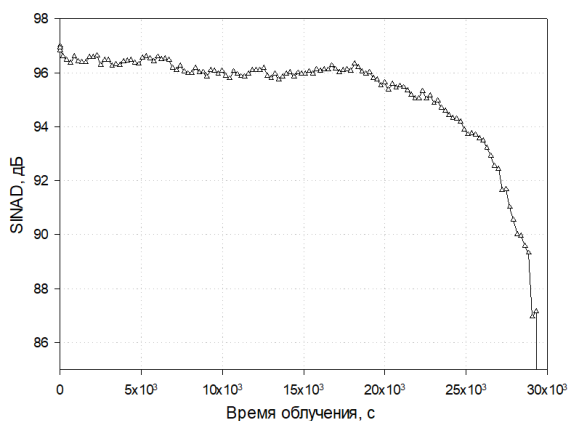


Рис. 2. График зависимости SINAD АЦП от времени облучения  
Fig. 2. SINAD ADC1 during irradiation

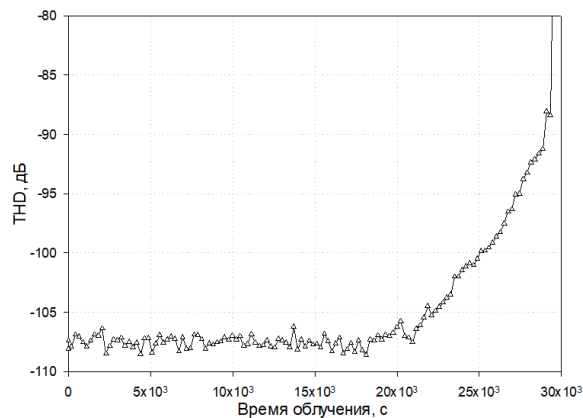


Рис. 3. График зависимости THD АЦП от времени облучения  
Fig. 3. THD ADC1 during irradiation

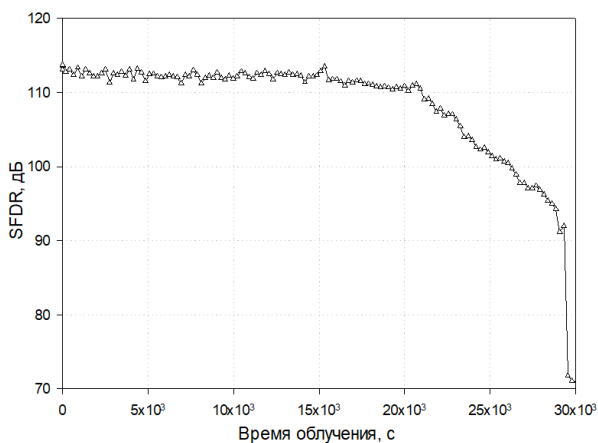


Рис. 4. График зависимости SFDR АЦП от времени облучения  
Fig. 4. SFDR ADC1 during irradiation

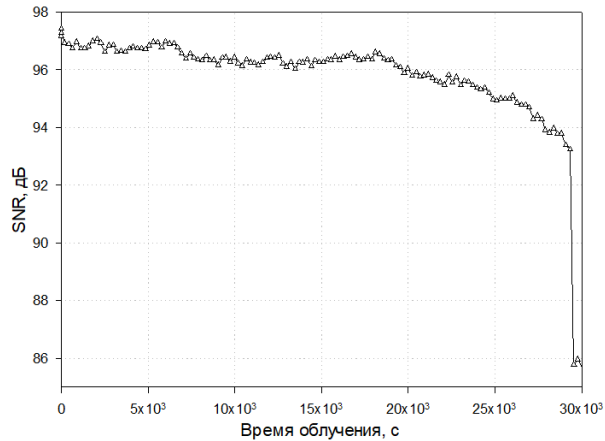


Рис. 5. График зависимости SNR АЦП от времени облучения  
Fig. 5. SNR ADC1 during irradiation

Деграляция спектра входного сигнала представлена на рис. 6. Видно, что при дозовом воздействии наблюдается значительное увеличение уровня шума и возрастание гармоник сигнала.

Мария О. Калашникова, Роман С. Торшин, Георгий С. Сорокоумов,  
 Александр А. Демидов, Дмитрий В. Бойченко  
 ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГМА-ДЕЛЬТА  
 АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ  
 ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

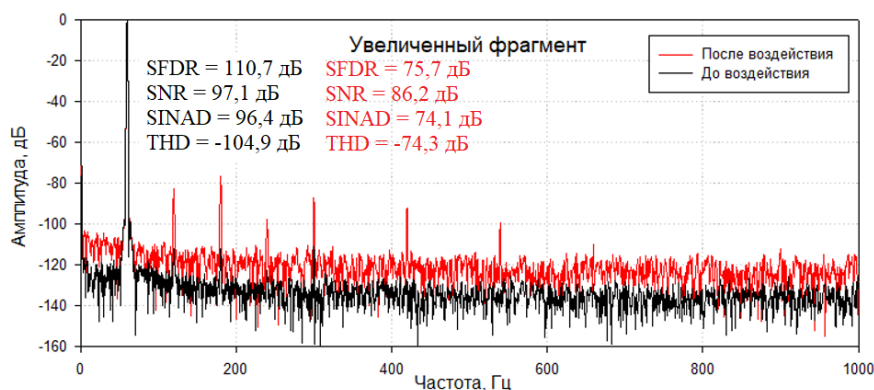


Рис. 6. Деградация спектра входного синусоидального сигнала для АЦП1.  
 32768 выборок для БПФ  
 Fig. 6. FFT array of 32768 points for ADC1 before and after irradiation

Деградация статических параметров АЦП1 представлена на рис. 7–9. В процессе дозового воздействия ИНЛ начала деградировать намного позже динамических параметров (в частности, SFDR (рис. 4)), а токи потребления не вышли за пределы нормы (6,8 мА) вплоть до полного отказа микросхемы.

Величина СКО (среднеквадратическое отклонение) для гистограммы распределения выходных кодов увеличилась в 2 раза (рис. 9), что объясняется увеличением уровня шума на 10 дБ на спектре (рис. 6).

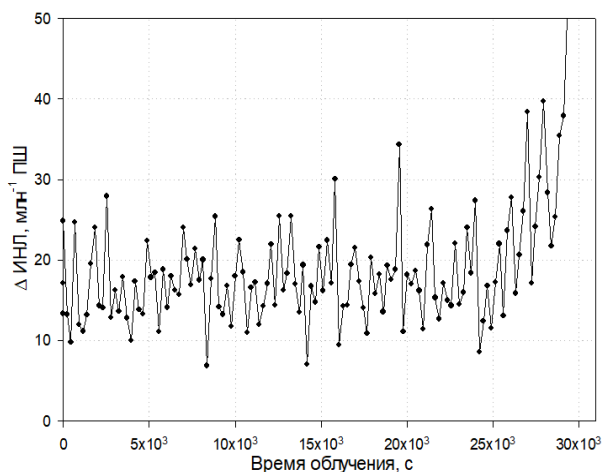


Рис. 7. График зависимости ΔИНЛ АЦП1 от времени облучения  
 Fig. 7. ΔINL ADC1 during irradiation

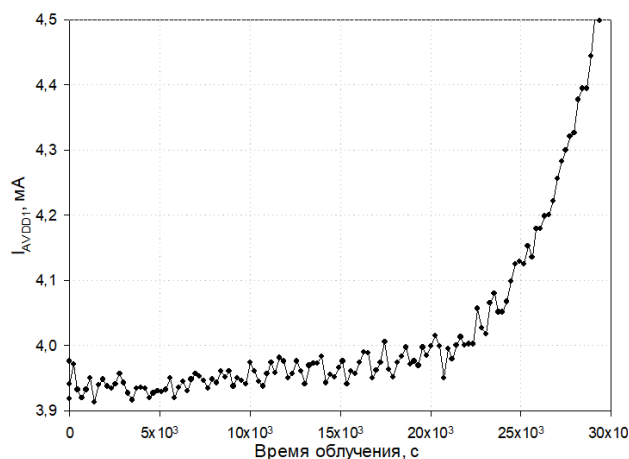


Рис. 8. График зависимости тока потребления АЦП1 по каналу AVDD1 от времени облучения  
 Fig. 8. Power supply current ADC1 during irradiation

На рис. 10 приведены сравнительные зависимости SFDR и ИНЛ АЦП1 от времени облучения, из которых видно, что наиболее чувствительным параметром исследуемой микросхемы к воздействию поглощенной дозы является SFDR. К этому параметру предъявляются высокие требования в приложениях, для которых критично наличие искажений сигнала (например, в антеннах, использующих фотонную связь [13]). ИНЛ остается почти неизменной вплоть до полного отказа преобразователя.

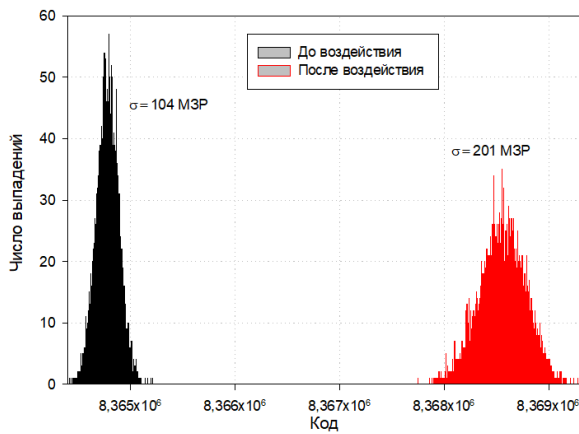


Рис. 9. Гистограммы распределения выходных кодов АЦП1 при входном напряжении  $U=0$  В до и после воздействия  
 Fig. 9. The ADC1 output codes distribution at input voltage  $U=0$  V before and after irradiation (array of 10000 points)

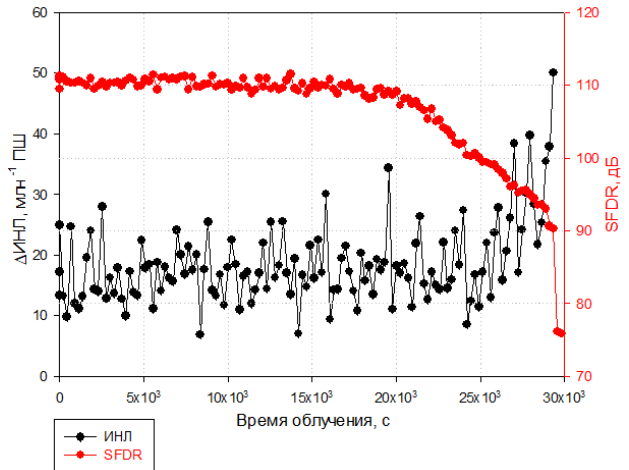


Рис. 10. Сравнение графиков зависимостей ИНЛ и SFDR АЦП1 от времени облучения  
 Fig. 10.  $\Delta$ INL and SFDR of ADC1 during irradiation

## 2. Исследование АЦП2

Деграция динамических параметров микросхемы АЦП2 приведены на рис. 11–14. По результатам можно сделать вывод, что характеристики SINAD, THD и SFDR ухудшаются при дозовом воздействии. При этом отношение сигнал-шум (SNR) остается неизменным вплоть до отказа исследуемой микросхемы.

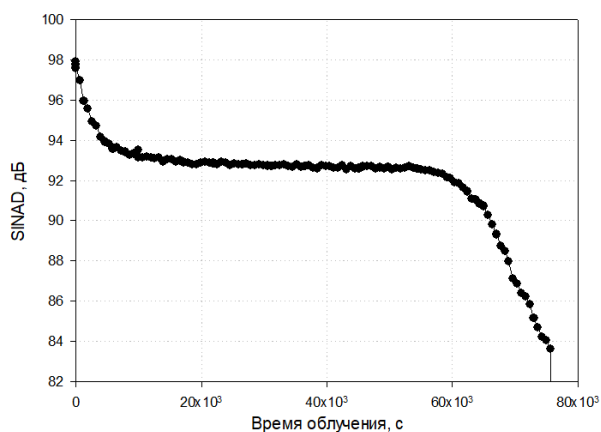


Рис. 11. График зависимости SINAD АЦП2 от времени облучения  
 Fig. 11. SINAD ADC2 during irradiation

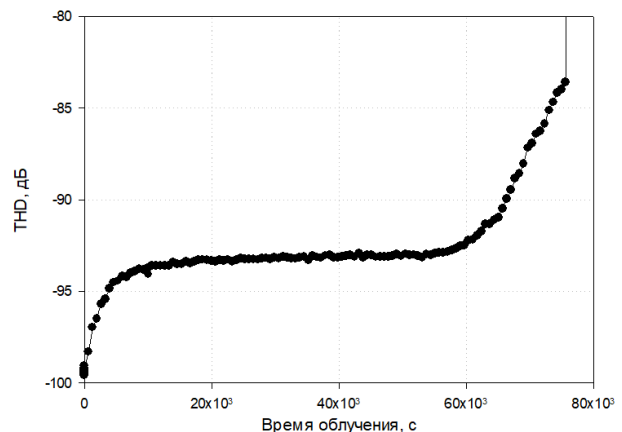


Рис. 12. График зависимости THD АЦП2 от времени облучения  
 Fig. 12. THD ADC2 during irradiation

Мария О. Калашникова, Роман С. Торшин, Георгий С. Сорокоумов,  
Александр А. Демидов, Дмитрий В. Бойченко  
ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГМА-ДЕЛЬТА  
АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ  
ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

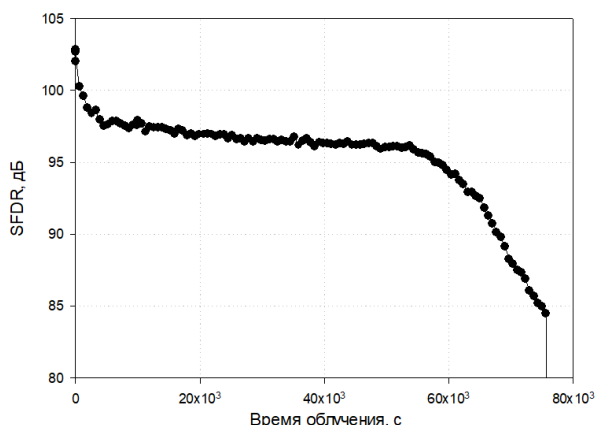


Рис. 13. График зависимости SFDR ADC2 от времени облучения  
Fig. 13. SFDR АЦП2 during irradiation

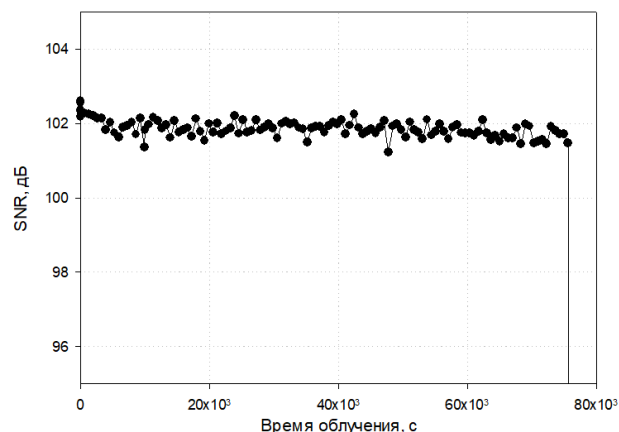


Рис. 14. График зависимости SNR ADC2 от времени облучения  
Fig. 14. SNR АЦП2 during irradiation

На рис. 15 представлена зависимость спектра входного синусоидального сигнала частотой 500 Гц от времени облучения. Видно, что при дозовом воздействии растут паразитные гармоники сигнала, в то время как уровень шума остается таким же, как и до воздействия.

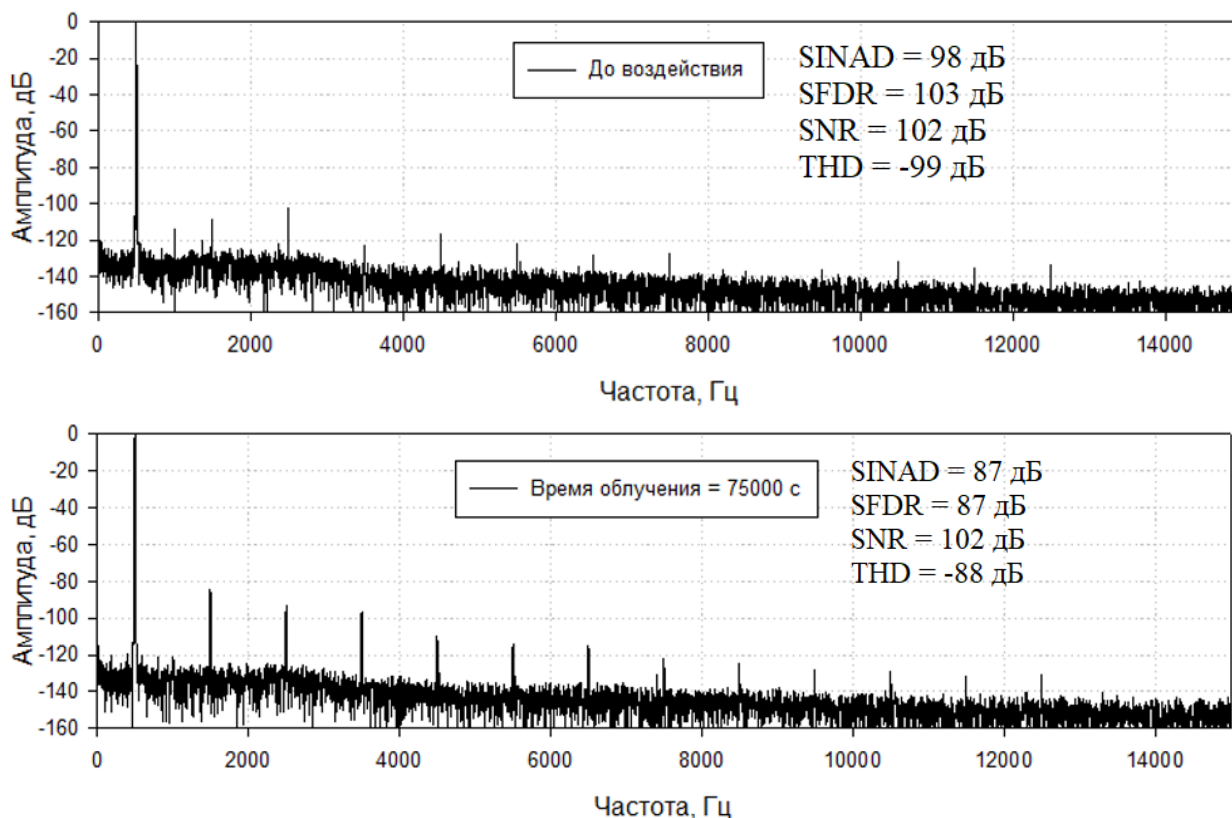


Рис. 15. Зависимость спектра входного синусоидального сигнала частотой 500 Гц от времени облучения для АЦП2  
Fig. 15. FFT array for ADC2 before irradiation, at exposure time = 10000 and 75000 s

Деградация ИНЛ и тока потребления АЦП2 представлена на рис. 16–17 соответственно. Эти параметры выходят за пределы нормы примерно в 5 раз позже, чем SINAD, SFDR и THD.

Мария О. Калашникова, Роман С. Торшин, Георгий С. Сорокоумов,  
Александр А. Демидов, Дмитрий В. Бойченко  
ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГМА-ДЕЛЬТА  
АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ  
ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

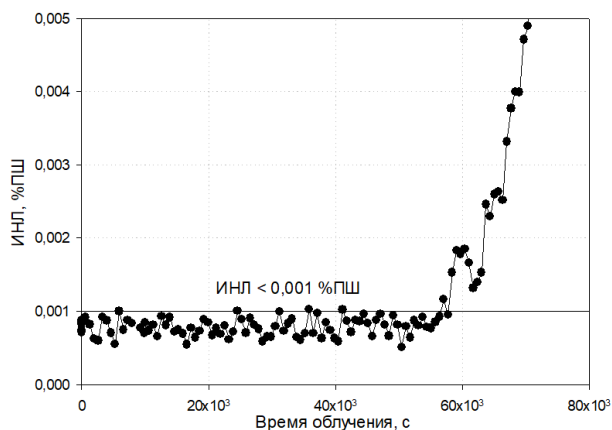


Рис. 16. График зависимости ИНЛ от времени облучения для АЦП2  
Fig. 16. INL ADC2 during irradiation

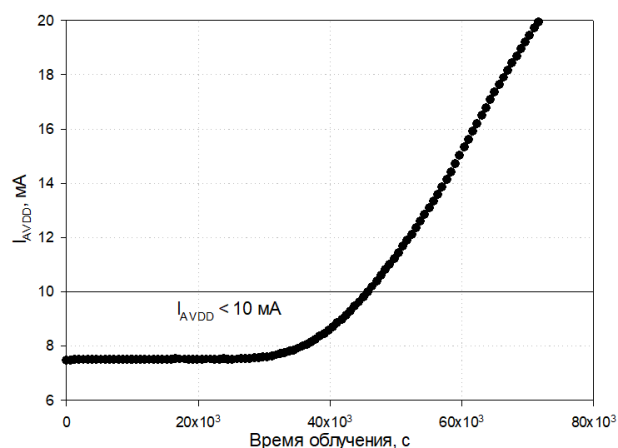


Рис. 17. График зависимости тока потребления от времени облучения для АЦП2  
Fig. 17. Power supply current ADC2 during irradiation

На рис. 18 приведено сравнение зависимостей SINAD и ИНЛ АЦП2 от времени облучения. При времени 10000 с наблюдалось резкое ухудшение SINAD, а при времени порядка 60000 с началась деградация, как динамических, так и статических параметров.

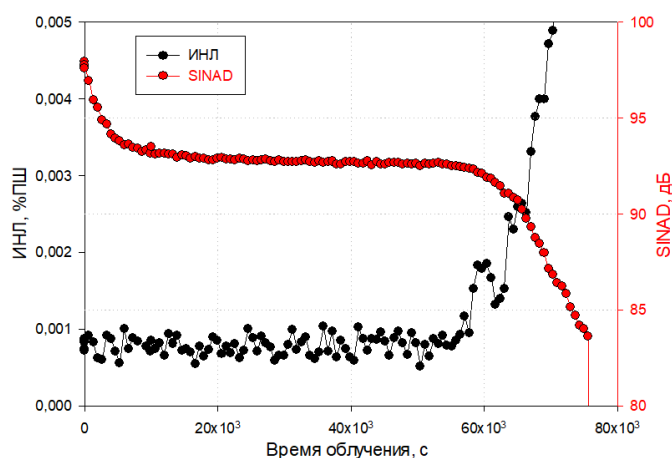


Рис. 18. Сравнение графиков зависимостей ИНЛ и SINAD АЦП2 от времени облучения  
Fig. 18. INL and SINAD ADC2 during irradiation

### 3. Исследование АЦП3

Исследование деградации динамических параметров сигма-дельта модулятора АЦП3 проводилось при частоте тактирования 24 МГц, при частоте входного синусоидального сигнала 7 кГц. Результаты представлены на рис. 19–22.

Мария О. Калашникова, Роман С. Торшин, Георгий С. Сорокоумов,  
 Александр А. Демидов, Дмитрий В. Бойченко  
 ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГМА-ДЕЛЬТА  
 АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ  
 ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

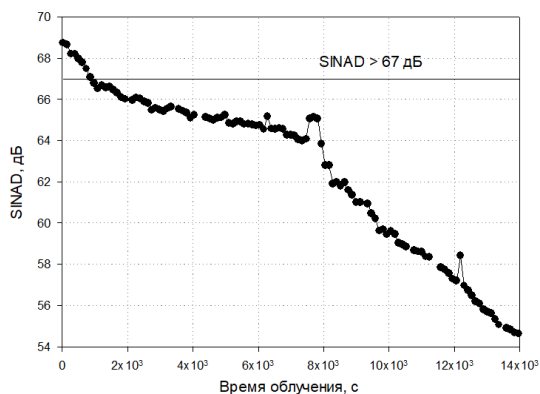


Рис. 19. График зависимости SINAD АЦПЗ от времени облучения  
 Fig. 19. SINAD ADC3 during irradiation

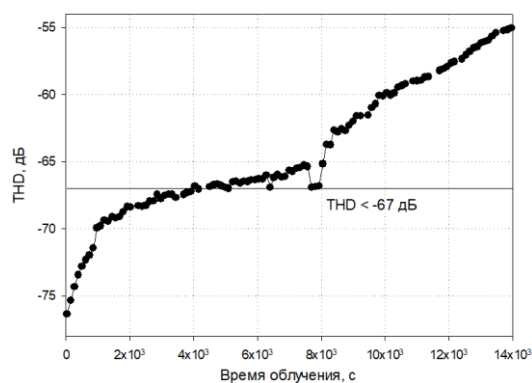


Рис. 20. График зависимости THD АЦПЗ от времени облучения  
 Fig. 20. THD ADC3 during irradiation

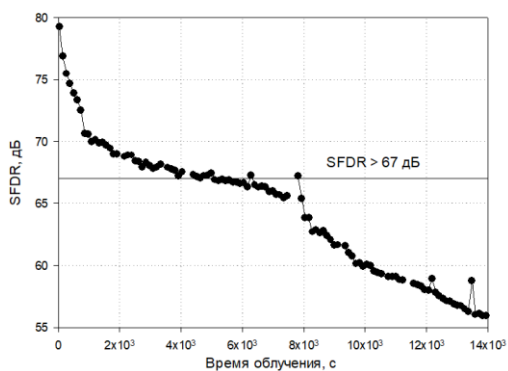


Рис. 21. График зависимости SFDR АЦПЗ от времени облучения  
 Fig. 21. SFDR ADC3 during irradiation

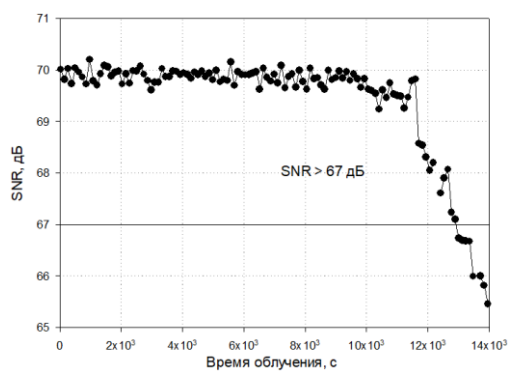


Рис. 22. График зависимости SNR АЦПЗ от времени облучения  
 Fig. 22. SNR ADC3 during irradiation

Дозовая зависимость погрешностей смещения и усиления представлена на рис. 23–24.

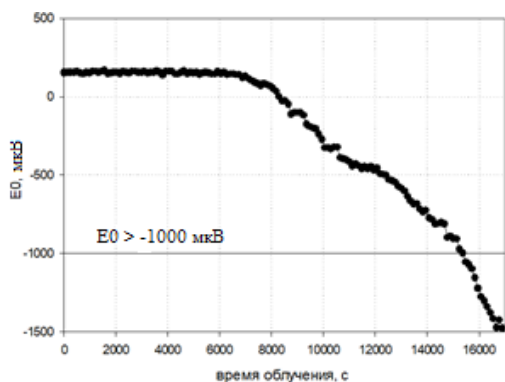


Рис. 23. График зависимости  $E_0$  АЦПЗ от времени облучения  
 Fig. 23.  $E_0$  ADC3 during irradiation

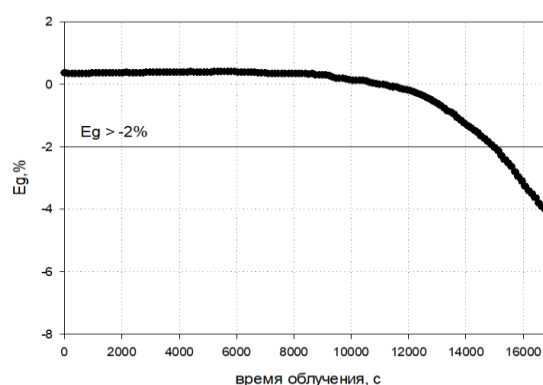


Рис. 24. График зависимости  $E_g$  АЦПЗ от времени облучения  
 Fig. 24.  $E_g$  ADC3 during irradiation

На рис. 25 представлена зависимость спектра входного синусоидального сигнала частотой 7 кГц от времени облучения. При дозовом воздействии наблюдается рост гармонических искажений.

Мария О. Калашникова, Роман С. Торшин, Георгий С. Сорокоумов,  
 Александр А. Демидов, Дмитрий В. Бойченко  
 ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГМА-ДЕЛЬТА  
 АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ  
 ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

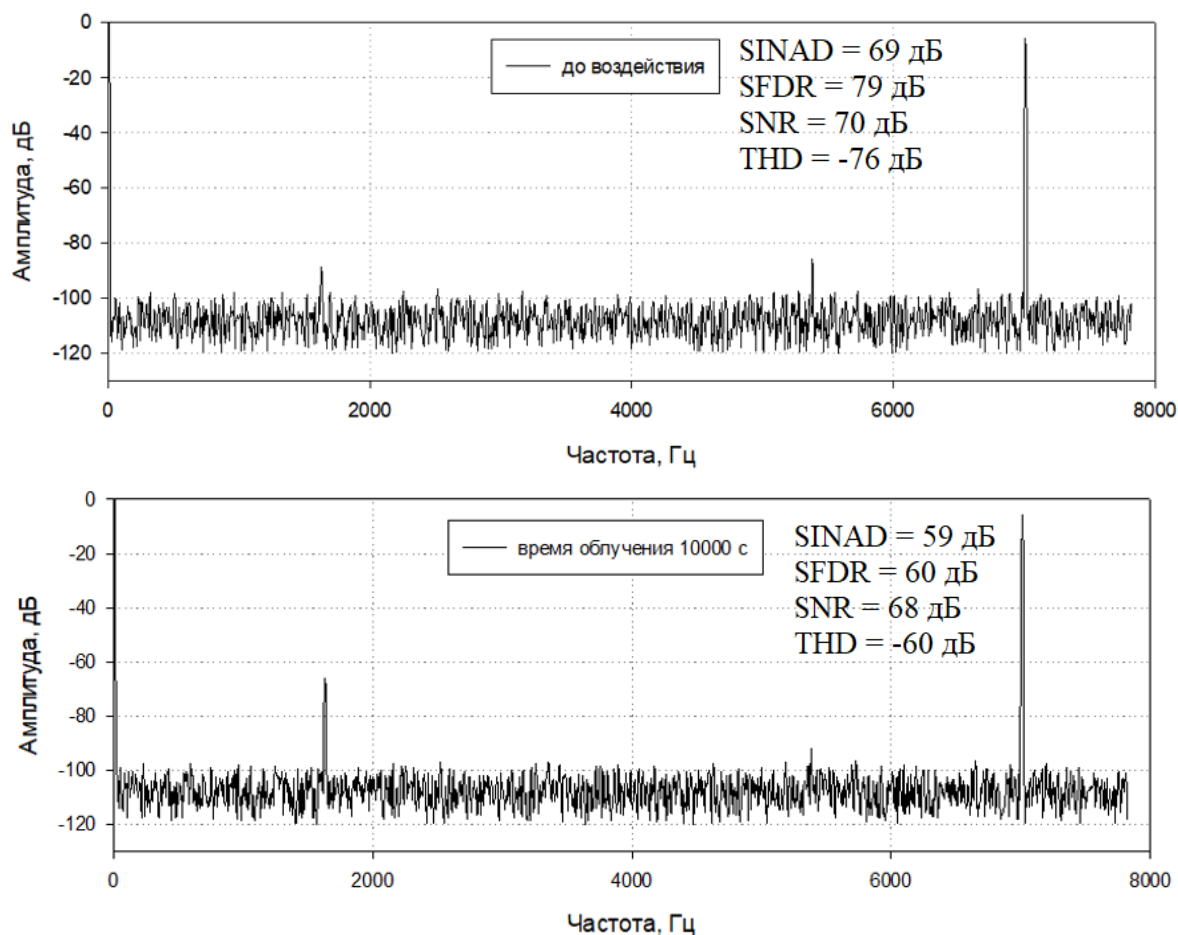


Рис. 25. Зависимость спектра входного синусоидального сигнала частотой 7 кГц от времени облучения для АЦПЗ. 4096 выборок для БПФ  
 Fig. 25. FFT array of 4096 points for ADC3 before irradiation, at exposure time = 4500 and 10000 s

Дозовая зависимость погрешностей смещения и усиления представлена на рис. 24–25.

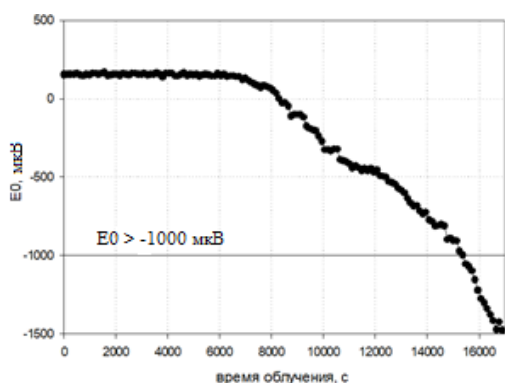


Рис. 24. График зависимости  $E_0$  АЦПЗ от времени облучения  
 Fig. 24.  $E_0$  ADC3 during irradiation

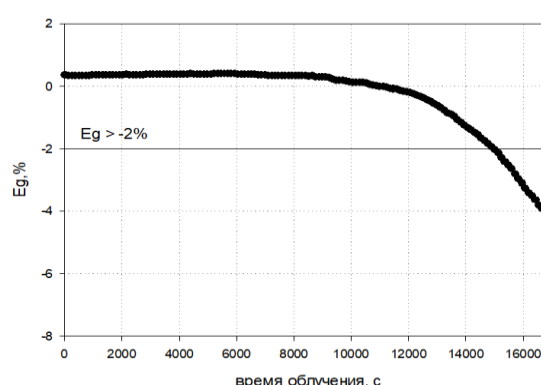


Рис. 25. График зависимости  $E_g$  АЦПЗ от времени облучения  
 Fig. 25.  $E_g$  ADC3 during irradiation

Деградация ИНЛ для каждого кода представлена на рис. 26. ИНЛ модулятора определялась как отклонение его передаточной характеристики для каждого кода от линеаризирующей прямой, проведенной по методу наименьших квадратов.

При построении передаточной характеристики входной аналоговый сигнал линейно возрастал с шагом 7,8 МЗР.

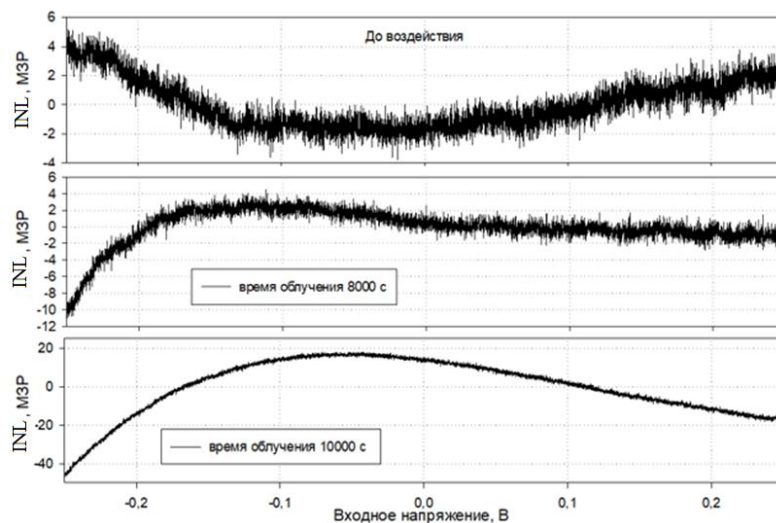


Рис. 26. ИНЛ для каждого кода АЦПЗ при различных временах облучения  
 Fig. 26. INL ADC3 for different irradiation steps

Гистограммы распределения выходных кодов для разных входных сигналов, соответствующих началу и концу ХП представлены на рис. 27–28. Из данных рисунков видно, что среднеквадратичное отклонение (СКО) до воздействия и при 10000 с облучения одинаково, однако при 13000 с облучения, когда начинает деградировать SNR (рис. 22), СКО возрастает. Это объясняется увеличением уровня шума. При дозовом воздействии наблюдается сдвиг гистограмм распределения. Он обусловлен деградацией ХП и погрешностей смещения и усиления (рис. 24–25).

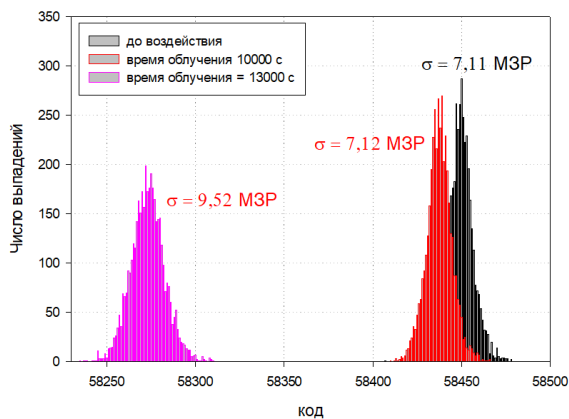


Рис. 27. Гистограммы распределения выходных кодов АЦПЗ при входном напряжении  $U=0,25$  В до облучения, при времени облучения = 10000 с и 13000 с  
 Fig. 27. The ADC3 output codes distribution at input voltage  $U=0,25$  V for different irradiation steps

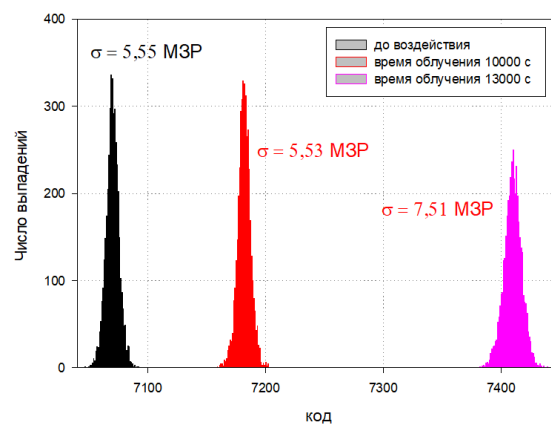


Рис. 28. Гистограммы распределения выходных кодов АЦПЗ при входном напряжении  $U=-0,25$  В до облучения, при времени облучения = 10000 с и 13000 с.  
 Fig. 28. The ADC3 output codes distribution at input voltage  $U=-0,25$  V for different irradiation steps

На рис. 29 приведено сравнение зависимостей SINAD и ИНЛ АЦПЗ от времени облучения. По результатам исследований можно судить, что динамические параметры,

отражающие вклад паразитных гармоник (SINAD) вышли за пределы нормы на порядок быстрее, чем статические (ИНЛ).

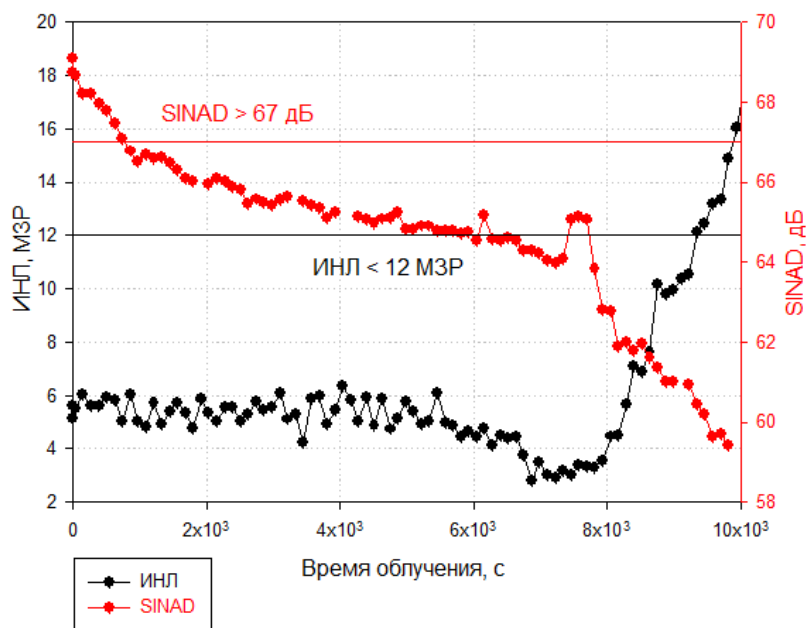


Рис. 29. Сравнение графиков зависимостей ИНЛ и SINAD АЦПЗ от времени облучения  
Fig. 29. INL and SINAD ADC3 during irradiation

### Заключение

В работе проведено исследование трех сигма-дельта преобразователей различной разрядности, быстродействия и технологии изготовления. По результатам исследования было определено, что для каждого из типонаименований наиболее чувствительными к дозовому воздействию оказались динамические параметры (SFDR, SINAD). Они представляют особую важность для приложений, в которых критично получение информации без искажений в большом динамическом диапазоне (в системах радиосвязи, прецизионных датчиках).

Можно отметить корреляцию между деградацией СКО и SNR, ухудшение этих параметров связано с ростом общего уровня шума.

Заметим, что при контроле только статических параметров (ИНЛ, СКО) возможно завышение стойкости на порядок, так как по их деградации нельзя зафиксировать появление искажений спектра. Поэтому для полной оценки функционирования преобразователей во время воздействия поглощенной дозы необходимо контролировать их динамические параметры.

В продолжение данной работы планируется исследование вклада цифрового фильтра сигма-дельта АЦП в деградацию спектральных параметров. Также планируется изучение влияния частоты входного аналогового сигнала на стойкость преобразователей к дозовому воздействию и определение наиболее критичного режима облучения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Zou L., Rocca G., De Blasi M., Grassi M., Malcovati P., Baschiroto A. Sigma-delta ADC based adaptive readout ASIC for digital audio sensor. Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2017, vol. 92, p. 383–392. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10470-017-1002-7>.

2. Gao Zh., Luan B., Lin Sh., Li T., Xu J. Design of The Delta-Sigma Digital-to-Analog Converter For High-Resolution Micro-Nano Satellite Applications. IEEE 15th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT). 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSICT49897.2020.9278342>.
3. Xu J., Zhao M., Wu X., Islam Md.K., Yang Zh. A High Performance Delta-Sigma Modulator for Neurosensing. 2015, *Sensors*. 15, no. 8, p. 19466–19486. DOI: <https://doi.org/10.3390/s150819466>.
4. Rikan B.S., Kim S.-Y., Ahmad N., Abbasizadeh H., Rehman M.R.U., Shehzad K., Hejazi A., Rad R.E., Verma D., Lee K.-Y. A Sigma-Delta ADC for Signal Conditioning IC of Automotive Piezo-Resistive Pressure Sensors with over 80 dB SNR. 2018, *Sensors* 18, no. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18124199>.
5. Торшин Роман С. и др. Измерение критериальных параметров аналого-цифровых преобразователей и контроль их изменения во время радиационного эксперимента. Безопасность информационных технологий, [S.I.], т. 27, № 3, с. 76–88, 2020. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.3.07>. – EDN: AFLQDJ.
6. Demidov A.A., Kalashnikov O.A., Nikiforov A.Y., Tararaksin A.S., Telets V.A. Radiation Behavior and Test Specifics of A-D and D-A Converters. *Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials Magazine*. 2015, no. 45, p. 153–159. URL: [http://www.midem-drustvo.si/Journal%20papers/MIDEM\\_45\(2015\)2p153.pdf](http://www.midem-drustvo.si/Journal%20papers/MIDEM_45(2015)2p153.pdf) (дата обращения: 15.11.2022).
7. Kalashnikov O.A., Nekrasov P.V., Nikiforov A.Y., Telets V.A., Chukov G.V. and Elesin V.V. System-on-chip: Specifics of radiation behavior and estimation of radiation hardness. *Russian Microelectronics*, vol. 45, no. 1, p. 33–40, 2016. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063739716010066> (дата обращения: 07.12.2022).
8. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование. М.: Техносфера, 2007. – 1015 с.
9. Georgopoulos K., Burbidge M., Lechner A., Richardson A., De Venuto D. Review of test strategies and resources used in high-resolution interface testing. Project TAMES-2, Deliverable. 2002. URL: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=qoCvGvoAAAAJ&citation\\_for\\_view=qoCvGvoAAAAJ:Se3iqnhoufwC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=qoCvGvoAAAAJ&citation_for_view=qoCvGvoAAAAJ:Se3iqnhoufwC) (дата обращения: 10.11.2022).
10. Kester W. *The Data Conversion Handbook*. Newnes, 2005. – 976 p.
11. Slosarcik L. Using the FFT on Sigma-Delta ADCs. Freescale Semiconductor, Inc. Application Note AN4847, Rev. 2, 2015. URL: [https://zbook.org/read/98e2a\\_using-the-fft-on-sigma-delta-adcs.html](https://zbook.org/read/98e2a_using-the-fft-on-sigma-delta-adcs.html) (дата обращения: 25.04.2023).
12. Барбашов Вячеслав М.; Калашников, Олег А. Функционально-логическое моделирование дозовых радиационных отказов СФ-блоков систем на кристалле. Безопасность информационных технологий, [S.I.], т. 24, № 4, с. 80–86, 2017. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2017.4.09>. – EDN: ZTIXIB.
13. Hutchinson M.N., Estrella S., Mashanovitch M. Packaged high power MUTC photodetectors for high SFDR applications. IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP). 2016, p. 193–194. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/AVFOP.2016.7789931>.
14. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. – 319 с.
15. Karakozov A.B., Nekrasov P.V., Bobrovsky D.V., Sorokoumov G.S. and Telets V.A. Single Event Effects And Total Dose Testing Of Digital To Analog Converters. 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Geneva, Switzerland. 2017, p. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/RADECS.2017.8696263>.

#### REFERENCES:

- [1] Zou L., Rocca G., De Blasi M., Grassi M., Malcovati P., Baschiroto A. Sigma-delta ADC based adaptive readout ASIC for digital audio sensor. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. 2017, vol. 92, p. 383–392. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10470-017-1002-7>.
- [2] Gao Zh., Luan B., Lin Sh., Li T., Xu J. Design of The Delta-Sigma Digital-to-Analog Converter For High-Resolution Micro-Nano Satellite Applications. IEEE 15th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT). 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSICT49897.2020.9278342>.
- [3] Xu J., Zhao M., Wu X., Islam Md.K., Yang Zh. A High Performance Delta-Sigma Modulator for Neurosensing. 2015, *Sensors*. 15, no. 8, p. 19466–19486. DOI: <https://doi.org/10.3390/s150819466>.
- [4] Rikan B.S., Kim S.-Y., Ahmad N., Abbasizadeh H., Rehman M.R.U., Shehzad K., Hejazi A., Rad R.E., Verma D., Lee K.-Y. A Sigma-Delta ADC for Signal Conditioning IC of Automotive Piezo-Resistive Pressure Sensors with over 80 dB SNR. 2018, *Sensors* 18, no. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18124199>.
- [5] Torshin Roman S. et al. Measurement of criteria parameters of analog-to-digital converters and monitoring of their changes during the radiation experiment. *IT Security (Russia)*, [S.I.], v. 27, no. 3, p. 76–88, 2020. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.3.07> (in Russian). – EDN: AFLQDJ.

- [6] Demidov A.A., Kalashnikov O.A., Nikiforov A.Y., Tararaksin A.S., Telets V.A. Radiation Behavior and Test Specifics of A-D and D-A Converters. Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials Magazine. 2015, no. 45, p. 153–159. URL: [http://www.midem-drustvo.si/Journal%20papers/MIDEM\\_45\(2015\)2p153.pdf](http://www.midem-drustvo.si/Journal%20papers/MIDEM_45(2015)2p153.pdf) (accessed: 15.11.2022).
- [7] Kalashnikov O.A., Nekrasov P.V., Nikiforov A.Y., Telets V.A., Chukov G.V. and Elesin V.V. System-on-chip: Specifics of radiation behavior and estimation of radiation hardness. Russian Microelectronics, vol. 45, no. 1, p. 33–40, 2016. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063739716010066> (accessed: 07.12.2022).
- [8] Kester W. Analog-Digital Conversion. M.: Tekhnosfera, 2007. – 1015 p. (in Russian).
- [9] Georgopoulos K., Burbidge M., Lechner A., Richardson A., De Venuto D. Review of test strategies and resources used in high-resolution interface testing. Project TAMES-2, Deliverable. 2002. URL: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=qoCvGvoAAAAJ&citation\\_for\\_view=qoCvGvoAAAAJ:Se3iqnhoufwC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=qoCvGvoAAAAJ&citation_for_view=qoCvGvoAAAAJ:Se3iqnhoufwC) (accessed: 10.11.2022).
- [10] Kester W. The Data Conversion Handbook. Newnes, 2005. – 976 p.
- [11] Slosarcik L. Using the FFT on Sigma-Delta ADCs. Freescale Semiconductor, Inc. Application Note AN4847, Rev. 2, 2015. URL: [https://zbook.org/read/98e2a\\_using-the-fft-on-sigma-delta-adcs.html](https://zbook.org/read/98e2a_using-the-fft-on-sigma-delta-adcs.html) (accessed: 25.04.2023).
- [12] Barbashov Vyacheslav M.; Kalashnikov Oleg A. Functional-logic simulation of IP-blocks dose functional failures. IT Security (Russia), [S.l.], v. 24, no. 4, p. 80–86, 2017. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2017.4.09> (in Russian). – EDN: ZTIXIB.
- [13] Hutchinson M.N., Estrella S., Mashanovitch M. Packaged high power MUTC photodetectors for high SFDR applications. IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP). 2016, p. 193–194. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/AVFOP.2016.7789931>.
- [14] Chumakov A.I., Effects of Cosmic Radiation on IC, Moscow: Radio i Svyaz', 2004. – 319 p. (in Russian).
- [15] Karakozov A.B., Nekrasov P.V., Bobrovsky D.V., Sorokoumov G.S. and Telets V.A. Single Event Effects And Total Dose Testing Of Digital To Analog Converters. 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Geneva, Switzerland. 2017, p. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/RADECS.2017.8696263>.

*Поступила в редакцию – 17 февраля 2023 г. Окончательный вариант – 21 апреля 2023 г.  
Received – February 17, 2023. The final version – April 21, 2023.*