

---

---

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ  
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

---

---

УДК 621.391

© А. А. Гавришев, Д. Л. Осипов, 2024

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПИК-ФАКТОРА ВХОДНЫХ  
СИГНАЛОВ НА НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЦП**

В данной статье проведена оценка влияния пик-фактора входных сигналов на отношение сигнал/шум аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Указано, что АЦП играют важную роль в современных системах радиосвязи, построенных на основе программно-конфигурируемых радиосистем. Отмечено, что одной из ключевых характеристик АЦП является шум квантования, который напрямую влияет на такое его важное свойство, как отношение сигнал/шум. Описано выражение для вычисления отношения сигнал/шум АЦП, зависящее от пик-фактора входного сигнала. Проведена оценка отношения сигнал/шум АЦП для систем радиосвязи с различными типами сигналов (простые сигналы; сигналы, сформированные с помощью бинарных псевдослучайных последовательностей; сигналы, сформированные с помощью генераторов хаотических сигналов). Полученные результаты с учетом введенных допущений и ограничений показывают, что пик-фактор входных сигналов напрямую влияет на отношение сигнал/шум АЦП, и его влияние целесообразно учитывать при эксплуатации, разработке и совершенствовании современных систем радиосвязи, в том числе использующих перспективные сложные сигналы.

*Кл. сл.:* системы радиосвязи, АЦП, шумы квантования, отношение сигнал/шум, пик-фактор, входной сигнал

**ВВЕДЕНИЕ**

Современные системы радиосвязи традиционно включают в себя как аналоговые, так и цифровые блоки обработки сигналов. Основными функциями аналоговых блоков являются перенос сигнала на частоту несущей на передающей стороне и обратный перенос радиосигнала на приемной стороне. В свою очередь, цифровые блоки осуществляют формирование передаваемого сигнала в передатчике и восстановление переданной информации в приемнике. Интерфейсом между аналоговыми и цифровыми блоками обработки сигналов выступают аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП) [1–4].

Описанная парадигма положена в основу программно-конфигурируемых радиосистем (ПКР). В классическом представлении (рис. 1) система ПКР представляет собой центральный процессор (ЦП), оснащенный приемным и передающим блоками [3, 5].

Роль ЦП заключается в выводе/вводе данных в систему, а также получении управляющих команд и их последующей трансляции соответствующим компонентам. Передающий блок включает коммуникационный процессор (КП), основной задачей которого является упаковка битов передаваемых данных в символы модуляции и генерация на их основе модулирующего сигнала определен-

ной системы связи, который поступает на ЦАП и далее на аналоговый радиointерфейс. Приемный блок содержит аппаратную аналоговую часть, АЦП, КП, осуществляющий демодуляцию сигнала и преобразование демодулированных символов системы связи в биты данных. ПКР могут быть реализованы как на вычислительных средствах общего назначения, так и на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), осуществляющих обработку сигнала в реальном времени. При этом за пределы ПЛИС выносятся радиointерфейсы, а также АЦП и ЦАП [3, 5].

Известно [2, 6], что из них одними из наиболее важных являются АЦП и вопросы улучшения их характеристик, которые, как правило, играют более важную роль, чем ЦАП. Кроме того, АЦП является более сложным устройством, чем ЦАП, что предопределяет сложности в улучшении его характеристик. Одной из таких характеристик, на которую часто обращают внимание [2, 6], являются шумы квантования, которые неизбежно вносятся в принимаемый сигнал. Рассматриваемая проблема влияния шума квантования АЦП на характеристики систем связи в настоящее время актуальна для систем радиосвязи на основе ПКР [1–4]. Также стоит отметить, что использование в современных системах радиосвязи перспективных сложных сигналов, например хаотических [7, 8], не позволяет в полной мере использовать системы

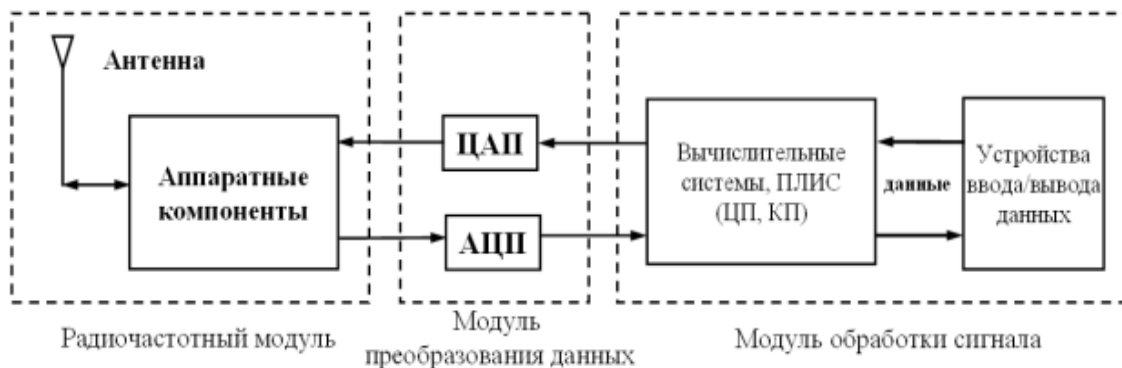


Рис. 1. Общая схема ПКР

автоматической регулировки уровня (ARU), что дополнительно усложняет исследования характеристик работы АЦП в различных условиях [5, 9, 10]. Кроме того, современные системы ARU обычно являются цифровыми либо гибридными, что подразумевает использование в них самих АЦП [9, 10]. Поэтому в настоящее время актуальной является задача определения допустимых характеристик АЦП, которые бы удовлетворяли требованиям, предъявляемым к современным системам радиосвязи. В данной работе авторы хотят обратиться к задаче оценки влияния пик-фактора входных сигналов на характеристики АЦП, т.к. современные перспективные сложные сигналы имеют значительный пик-фактор [7, 8]. Его влияние целесообразно учитывать при эксплуатации, разработке и совершенствовании современных систем радиосвязи.

Целью данной статьи является оценка влияния пик-фактора входных сигналов на отношение сигнал/шум АЦП.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Хорошо известно [1, 4], что АЦП представляет собой устройство, преобразующее непрерывный аналоговый сигнал в двоичный код. Основными операциями при аналого-цифровом преобразовании являются дискретизация и квантование. При дискретизации получают отсчетные значения из непрерывного аналогового сигнала. Полученные в результате дискретизации отсчетные значения далее переводятся в двоичные числа. Вначале каждое полученное значение сравнивается с заранее заданными постоянными уровнями напряжения (тока), которые называются уровнями квантования. Затем ближайший к отсчетному значению уровень переводится в двоичное число. Процесс

замены отсчетного значения ближайшим к нему уровнем называется квантованием, при котором непрерывное сообщение  $x(t)$  заменяется дискретным сообщением  $x_{\text{кв}}(t)$  [1, 4, 11]. В процессе операции квантования неизбежно возникают ошибки квантования  $\varepsilon_{\text{кв}}(t)$ , которые называются шумом квантования:

$$\varepsilon_{\text{кв}}(t) = x_{\text{кв}}(t) - x(t). \quad (1)$$

В практических приложениях для оценки шума квантования при равномерном квантовании, которое применяется наиболее часто, удобно пользоваться следующим выражением в безразмерной величине [1, 4, 11]:

$$\delta_{\text{кв}} = \frac{p}{\sqrt{3} \cdot N_{\text{кв}}}, \quad (2)$$

где  $p$  — пик-фактор входного сигнала,  $N_{\text{кв}}$  — число уровней квантования.

Шум квантования играет важную роль в некоторых характеристиках АЦП, т.к. напрямую влияет на такое его важное свойство, как отношение сигнал/шум АЦП  $SNR_{\text{adc}}$ . Отношение сигнал/шум АЦП  $SNR_{\text{adc}}$  равно отношению среднеквадратического значения входного сигнала  $\sigma_s$  к среднеквадратическому значению шума  $\sigma_n$  [1, 4, 11, 12]. Для дальнейших рассуждений введем следующие допущения и ограничения:

- 1) учитываются только шумы квантования;
- 2) входной сигнал и шум квантования некоррелированы;
- 3) используется равномерное квантование;
- 4) величина входного сигнала находится во входном диапазоне АЦП и при аналого-цифровом преобразовании не происходит усечения входного сигнала;
- 5) канал связи является идеальным.

Для вычисления отношения сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$  обратимся к следующему выражению [1, 4, 11, 12]:

$$SNR_{adc} = \frac{\sigma_s}{\sigma_n}. \quad (3)$$

Для вычисления среднеквадратического значения входного сигнала  $\sigma_s$  удобно воспользоваться следующим выражением, связанным с пик-фактором  $p$  [1, 7, 8]:

$$p = \frac{U_{max}}{\sigma_s}, \quad (4)$$

где  $U_{max}$  — максимальное значение сигнала,  $\sigma_s$  — среднеквадратическое значение сигнала.

Для вычисления отношения сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$  подставим выражение (2) как среднеквадратическое значение шума квантования и среднеквадратическое значение входного сигнала из вы-

ражения (4) в формулу (3). После необходимых преобразований получим выражение для вычисления отношения сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$  в безразмерной величине:

$$SNR_{adc} = \frac{U_{max} \cdot \sqrt{3} \cdot N_{кв}}{p^2}. \quad (5)$$

Проведем оценку отношения сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$  для систем радиосвязи с различными типами сигналов с учетом их пик-фактора. В таблице приведены некоторые значения пик-факторов для различных типов сигналов [7, 8]. Воспользуемся указанными данными для необходимых вычислений.

Результаты для различных типов сигналов, полученные с помощью выражения (5), приведены на рис. 2. В качестве значения пик-фактора  $p$  использовались данные из таблицы. Число уровней квантования бралось равным  $N_{кв} = 4 \div 12$  с шагом 1.

Табл. Значения пик-фактора различных типов сигналов

№	Тип сигнала	Пик-фактор $p$
1	Простые сигналы	$\approx \sqrt{2}$
2	Сигналы, сформированные с помощью бинарных псевдослучайных последовательностей (ПСП)	$\approx 1.9 \div 3$
3	Сигналы, сформированные с помощью генераторов хаотических сигналов (аттрактор Лоренца, аттрактор Ресслера, возмущенный осциллятор Ван дер Поля и др.)	$\approx 1.5 \div 4$

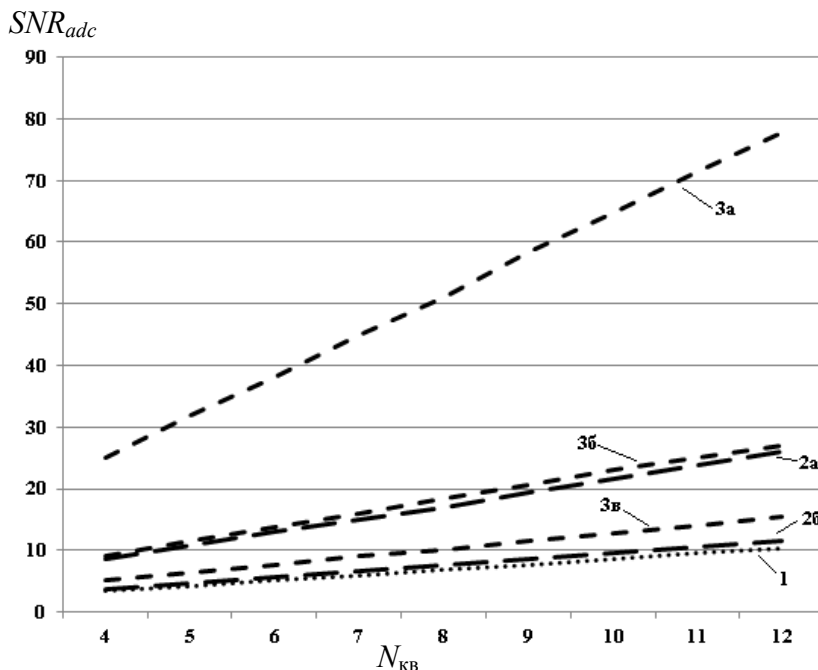


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$  от числа уровней квантования  $N_{кв}$  для различных типов сигналов.

1 — простые сигналы; 2а и 2б — сигналы, сформированные с помощью бинарных ПСП, с различным значением пик-фактора  $p$ ; 3а, 3б и 3в — сигналы, сформированные с помощью генераторов хаотических сигналов, с различным значением пик-фактора  $p$

Анализ рис. 2 с учетом введенных допущений и ограничений и результатов известных исследований [1, 2, 4, 5, 11] позволяет сделать следующие выводы:

1) отношение сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$  принимает наибольшие значения для входных сигналов, обладающих большим уровнем сигнала и малым значением пик-фактора, и возрастает с увеличением числа уровней квантования  $N_{кв}$ ;

2) большое значение пик-фактора входного сигнала негативно сказывается на отношении сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$ , приводя к его значительному снижению;

3) установлено, что сигналы, сформированные с помощью генераторов хаотических сигналов, по показателю отношения сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$  не уступают сигналам, сформированным с помощью бинарных ПСП, и потенциально могут найти более широкое применение в системах радиосвязи;

4) одним из наиболее перспективных путей повышения отношения сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$ , по мнению авторов, является использование сигналов с приемлемыми характеристиками по уровню и пик-фактору, отвечающих другим обязательным требованиям без увеличения требований к АЦП.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной статье проведена оценка влияния пик-фактора  $p$  входных сигналов на отношение сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$ . Указано, что АЦП играют важную роль в современных системах радиосвязи, построенных на основе ПКР. Отмечено, что одной из важных характеристик АЦП является шум квантования, который напрямую влияет на такое его важное свойство, как отношение сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$ . Описано выражение, представленное формулой (5), для вычисления отношения сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$ , зависящее от пик-фактора  $p$  входного сигнала. Проведена оценка отношения сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$  для систем радиосвязи с различными типами сигналов (простые сигналы; сигналы, сформированные с помощью бинарных ПСП; сигналы, сформированные с помощью генераторов хаотических сигналов). На основе проведенных исследований, с учетом введенных допущений и ограничений и результатов известных исследований [1, 2, 4, 5, 11], сформулированы выводы. Полученные результаты показывают, что пик-фактор  $p$  входных сигналов напрямую влияет на отношение сигнал/шум АЦП  $SNR_{adc}$ , и его влияние целесообразно

учитывать при эксплуатации, разработке и совершенствовании современных систем радиосвязи, в том числе использующих перспективные сложные сигналы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюев Л.Л. Теория электрической связи. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2016. 448 с.
2. Мальцев А.А., Масленников Р.О., Хоряев А.В. Исследование влияния шума аналого-цифрового преобразования на беспроводные системы связи диапазона 60 ГГц // Известия вузов. Радиофизика. 2010. № 9/10. С. 669–677. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/2010/9/669>
3. Мохсени Т.И., Кикот А.М. Когерентная передача цифровой информации с двоичной модуляцией хаотического импульса // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 6. (24 с.). URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/10/text.pdf>
4. Пенин П.И., Филиппов Л.И. Радиотехнические системы передачи информации. М.: Радио и связь, 1984. 256 с.
5. Брюханов Ю.А., Гвоздарев А.С. Вероятностно-статистический анализ эффектов квантования в системах связи нового поколения // Цифровая обработка сигналов и ее применение. DSPA-2020: Доклады 22-й Международной конференции. М.: РНТОРЭиС им. А.С. Попова, 2020. С. 84–89. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xlpioo>
6. Кузьмин Е.В. Исследование эффективности беспороговой процедуры поиска псевдослучайного сигнала при ограничении разрядности входных наблюдений // Цифровая обработка сигналов. 2020. № 1. С. 9–12. URL: [http://www.dsps.ru/articles/year2020/jour20\\_1/art20\\_1\\_2.pdf](http://www.dsps.ru/articles/year2020/jour20_1/art20_1_2.pdf)
7. Гавришев А.А., Гавришев А.Н. К вопросу о расчете значений пик-фактора сигналов, генерируемых пространственными скрытными системами связи // Вестник НЦБЖД. 2020. № 3 (45). С. 149–157. URL: [https://ncbgd.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub\\_2478119.pdf](https://ncbgd.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_2478119.pdf)
8. Логинов С.С. Цифровые радиоэлектронные устройства и системы с динамическим хаосом и вариацией шага временной сетки. Дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2015. 228 с.
9. Прасолов А.А. Обзор применения систем автоматической регулировки усиления в радиоприемных устройствах // Экономика и качество систем связи. 2021. № 1. С. 45–57. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-primeneniya-sistem-avtomaticheskoy-regulirovki-usileniya-v-radiopriemnyh-ustroystvah>

10. Литвиненко И.А., Вагин Ф.А. Способ автоматической регулировки усиления и устройство его реализующее. Патент РФ № 2719419 от 17.04.2020. **НИЯУ МИФИ, Москва, Россия (Гавришев А.А.)**
11. Гарченко Н.В., Тишков П.В. Многоканальные системы передачи: лабораторный практикум. Минск: БГУИР, 2006. 42 с. **СКФУ, г. Ставрополь, Россия (Осипов Д.Л.)**
12. On Analog-to-Digital Converter (ADC), 6 dB SNR Gain per Bit, Oversampling and Undersampling. URL: <https://wirelesspi.com/on-analog-to-digital-converter-adc-6-db-snr-gain-per-bit-oversampling-and-undersampling/> (дата обращения: 01.03.2024). **Контакты: Гавришев Алексей Андреевич, alexxx.2008@inbox.ru**

Материал поступил в редакцию 16.04.2024

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE PEAK FACTOR OF INPUT SIGNALS ON SOME CHARACTERISTICS OF THE ADC

A. A. Gavrishev<sup>1</sup>, D. L. Osipov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*NRNU MEPhI, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*NCFU, Stavropol, Russia*

This article evaluates the effect of the peak factor of input signals on the signal-to-noise ratio of an analog-to-digital converter (ADC). It is indicated that ADC play an important role in modern radio communication systems based on software-configurable radio systems. It is noted that one of the key characteristics of the ADC is quantization noise, which directly affects its important property such as the signal-to-noise ratio. An expression is described for calculating the signal-to-noise ratio of the ADC, depending on the peak factor of the input signal. The evaluation of the signal-to-noise ratio of the ADC for radio communication systems with various types of signals (simple signals; signals generated using binary pseudorandom sequences; signals generated using chaotic signal generators) was carried out. The results obtained, taking into account the assumptions and limitations introduced, show that the peak factor of input signals directly affects the signal-to-noise ratio of the ADC, and its influence should be taken into account when operating, developing and improving modern radio communication systems, including those using promising complex signals.

**Keywords:** radio communication systems, ADC, quantization noise, signal-to-noise ratio, peak factor, input signal

### REFERENCES

1. Klyuev L.L. *Teoriya ehlektricheskoi svyazi* [Electrical communication theory]. Minsk, Novoe znanie Publ., Moscow, INFRA-M Publ., 2016. 448 p. (In Russ.).
2. Maltsev A.A., Maslennikov R.O., Khoryaev A.V. [Studying the impact of ADC quantization noise on 60-GHZ wireless communication systems]. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Radiophysics and Quantum Electronics], 2010, no. 9/10, pp. 669–677. (In Russ.). URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/2010/9/669>
3. Mokhseni T.I., Kikot A.M. [Coherent digital information transmission with binary chaotic pulse modulation]. *Zhur-nal radioelektroniki* [Journal of radio electronics], 2015, no. 6, 24 p. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/10/text.pdf> (In Russ.).
4. Penin P.I., Filippov L.I. *Radiotekhnicheskie sistemy peredachi informatsii* [Radio-technical information transmission systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984. 256 p. (In Russ.).
5. Bryukhanov Yu.A., Gvozdarev A.S. [Probabilistic and statistical analysis of quantization effects in next generation communication systems]. *Doklady 22-i Mezhdunarodnoi konferentsii: "Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye. DSPA-2020"* [Rep. of the 22nd Int. Conf. "Digital signal processing and its application. DSPA-

- 2020"], Moscow, RNTOREhIS im. A.S. Popova, 2020, pp. 84–89. (In Russ.).  
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xlpioo>
6. Kuzmin E.V. [Efficiency of the non-threshold spread spectrum signal searching procedure in case of quantization of the incoming observations]. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing], 2020, no. 1, pp. 9–12. (In Russ.). URL: [http://www.dsps.ru/articles/year2020/jour20\\_1/art20\\_1\\_2.pdf](http://www.dsps.ru/articles/year2020/jour20_1/art20_1_2.pdf)
  7. Gavrishev A.A., Gavrishev A.N. [To the question of calculating the crest factor values of signals generated by common hidden communication systems]. *Vestnik NTsBZhD* [NCBWC Bulletin], 2020, no. 3 (45), pp. 149–157. (In Russ.). URL: [https://ncbgd.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub\\_2478119.pdf](https://ncbgd.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_2478119.pdf)
  8. Loginov S.S. *Tsifrovye radioelektronnye ustroystva i sistemy s dinamicheskim kaosom i variatsiei shaga vremennoi setki*. Diss. d-ra techn. nauk [Digital radio-electronic devices and systems with dynamic chaos and time grid step variation. Doct. techn. sci. diss.]. Kazan, 2015. 228 p. (In Russ.).
  9. Prasolov A.A. [Overview of automatic gain control systems application in radio receiving devices]. *Ehkonomika i kachestvo sistem svyazi* [Economics and quality of communication systems], 2021, no. 1, pp. 45–57. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-primeniya-sistem-avtomaticheskoy-regulirovki-usileniya-v-radiopriemnyh-ustroystvah> (In Russ.).
  10. Litvinenko I.A., Vagin F.A. *Sposob avtomaticheskoi regulirovki usileniya i ustroystvo ego realizuyushchee* [Patent for method of automatic gain control and device realising it]. Patent RF no. 2719419. Prioritet 17.04.2020. (In Russ.).
  11. Tarchenko N.V., Tishkov P.V. *Mnogokanal'nye sistemy peredachi: laboratornyi praktikum* [Multichannel transmission systems: laboratory workshop]. Minsk, BGUIR Publ., 2006. 42 p. (In Russ.).
  12. *On Analog-to-Digital Converter (ADC), 6 dB SNR Gain per Bit, Oversampling and Undersampling*. URL: <https://wirelesspi.com/on-analog-to-digital-converter-adc-6-db-snr-gain-per-bit-oversampling-and-undersampling/> (cited: 01.03.2024).

Contacts: *Gavrishev Aleksey Andreevich*,  
[alexxx.2008@inbox.ru](mailto:alexxx.2008@inbox.ru)

Article received by the editorial office on 16.04.2024

## INTRODUCTION

Modern radio communication systems traditionally include both analog and digital signal processing units. The main functions of analog blocks are signal transfer to the carrier frequency at the transmitting end and reverse transfer of the radio signal at the receiving end. In turn, digital blocks generate the transmitting signal in the transmitter and restore the transmitted information in the receiver. The interface between analog and digital signal processing units is analog-to-digital and digital-to-analog converters (ADC and DAC) [1–4].

The described paradigm forms the basis of software-defined radio (SDR) systems. In the classical concept (Fig. 1), the SDR system is a central processor (CPU) equipped with receiving and transmitting units [3, 5].

**Fig. 1.** General scheme of SDR

The role of the CPU is data output/input into the system, as well as receiving control commands and their subsequent translation to the corresponding components. The transmitting unit includes a communication processor (CP), the main task of which is to pack the transmitted data bits into modulation symbols and generate, based on them, a modulating signal of a certain communication system, which is supplied to the DAC and then to the analog radio interface. The receiving unit contains an analog hardware part, an ADC, a CP that demodulates the signal and converts the demodulated symbols of the communication system into data bits. SDR can be implemented both by means of general-purpose computing facilities and programmable logic integrated circuits (FPGAs) that process the signal in real time. In this case, radio interfaces, as well as ADCs and DACs, are taken outside the FPGA [3, 5].

It is known [2, 6] that the ADC and issues of improving its characteristics, as a rule, play a more important role than the DAC. In addition, the ADC is a more complex device than the DAC, which makes it difficult to improve its performance. One of these characteristics, which is often paid attention to [2, 6], is quantization noise, which inevitably enters the received signal. The considered problem of the influence of ADC quantization noise on the characteristics of communication systems is currently relevant for radio communication systems based on SDR [1–4]. It is also worth noting that the use of promising complex signals, for example, chaotic ones, in modern radio communication systems does not allow the arrays of automatic level control (ALC) [7, 8] to be used in full scale and further complicates the study of ADC operating characteristics under various conditions [5, 9,

10]. In addition, modern ALC systems are usually digital or hybrid, which implies the use of ADCs in them [9, 10]. Therefore, at present, the urgent task is to determine the acceptable ADC characteristics that would satisfy the requirements for modern radio communication systems. In this work, the authors want to address the problem of assessing the influence of the peak factor of input signals on the characteristics of the ADC, since modern promising complex signals have a significant peak factor [7, 8]. It is advisable to take its influence into account when operating, developing, and improving modern radio communication systems.

The purpose of this article is to evaluate the influence of the peak factor of the input signals on the signal-to-noise ratio of the ADC.

## MAIN PART

It is well known [1, 4] that an ADC is a device that converts a continuous analog signal into binary code. The main operations in analog-to-digital conversion are sampling and quantization. In sampling, sample values are obtained from a continuous analog signal. The sample values obtained as a result of discretization are then converted into binary numbers. First, each obtained value is compared with pre-arranged constant levels of (current) voltage, which are called quantization levels. Then the level closest to the reference value is converted to a binary number. The process of replacing a reference value with the level closest to it is called quantization, when a continuous message  $x(t)$  is replaced by a discrete message  $x_{\text{KB}}(t)$  [1, 4, 11]. During the quantization, quantization errors  $\varepsilon_{\text{KB}}(t)$  inevitably arise, which are called quantization noise:

$$\varepsilon_{\text{KB}}(t) = x_{\text{KB}}(t) - x(t). \quad (1)$$

In practical applications, to estimate quantization noise in the event of uniform quantization, which is used most often, it is convenient to use the following expression in a dimensionless quantity [1, 4, 11]:

$$\delta_{\text{KB}} = \frac{p}{\sqrt{3} \cdot N_{\text{KB}}}, \quad (2)$$

where  $p$  is the peak factor of the input signal,  $N_{\text{KB}}$  is the number of quantization levels.

Quantization noise plays an important role in some ADC characteristics because it directly affects such an important property as the ADC signal-to-noise ratio  $SNR_{\text{adc}}$ . The signal-to-noise ratio of the ADC  $SNR_{\text{adc}}$  is equal to the ratio of the root-mean-square value of the input signal  $\sigma_s$  to the root-mean-square value of noise  $\sigma_n$  [1, 4, 11, 12]. For further discussion, we introduce the following assumptions and restrictions:

- 1) only quantization noise is taken into account;

- 2) the input signal and quantization noise are uncorrelated;
- 3) uniform quantization is used;
- 4) the magnitude of the input signal is in the ADC input range, and there is no truncation of the input signal during analog-to-digital conversion;
- 5) the communication channel is perfect.

To calculate the ADC signal-to-noise ratio  $SNR_{adc}$ , we turn to the following expression [1, 4, 11, 12]:

$$SNR_{adc} = \frac{\sigma_s}{\sigma_n}. \quad (3)$$

To calculate the root-mean-square value of the input signal  $\sigma_s$ , it is convenient to use the following expression related to the peak factor  $p$  [1, 7, 8]:

$$p = \frac{U_{\max}}{\sigma_s}, \quad (4)$$

where  $U_{\max}$  is the maximum signal value,  $\sigma_s$  is the root mean square value of the signal.

To calculate the signal-to-noise ratio of the ADC  $SNR_{adc}$ , we substitute expression (2) as the root-mean-square value of the quantization noise and the root-mean-square value of the input signal from expression (4) into formula (3). After the necessary transformations, we obtain an expression for calculating the signal-to-noise ratio of the ADC  $SNR_{adc}$  in a dimensionless quantity:

$$SNR_{adc} = \frac{U_{\max} \cdot \sqrt{3} \cdot N_{kb}}{p^2}. \quad (5)$$

Let us evaluate the signal-to-noise ratio of the ADC  $SNR_{adc}$  for radio communication systems with various types of signals, taking into account their peak factor. The table shows some values of peak factors for various types of signals [7, 8]. We will use the specified data for the necessary calculations.

**Tab.** Peak factor values for various signal types

The results for various types of signals obtained using expression (5) are shown in Fig. 2. The data from the table was used as the peak factor value. The number of quantization levels was taken to be equal to  $N_{kb} = 4 \div 12$  with a step of 1.

Analysis of Fig. 2 taking into account the introduced assumptions and the limitations and results of known studies [1, 2, 4, 5, 11] allows us to draw the following conclusions:

1) the ADC signal-to-noise ratio  $SNR_{adc}$  takes the highest values for input signals with a high signal lev-

el and a small peak factor and increases with the number of quantization levels  $N_{kb}$ ;

**Fig. 2.** Dependence of the ADC signal-to-noise ratio  $SNR_{adc}$  on the number of quantization levels  $N_{kb}$  for various types of signals.

1 — simple signals; 2a and 2b — signals generated using binary pseudo-random sequences, with various values of the peak factor  $p$ ; 3a, 3b and 3c — signals generated using chaotic signal generators, with various peak factor values  $p$

2) a large value of the input signal peak factor negatively affects the ADC signal-to-noise ratio  $SNR_{adc}$ , leading to its significant decrease;

3) it has been revealed that signals generated using chaotic signal generators in terms of ADC signal-to-noise ratio  $SNR_{adc}$  are not inferior to signals generated using binary pseudo-random sequences, and can be potentially wider employed in radio communication systems;

4) one of the most promising ways to increase the ADC signal-to-noise ratio  $SNR_{adc}$ , according to the authors, is the use of signals with acceptable characteristics in terms of level and peak factor, and meeting other mandatory requirements, without increasing the requirements for the ADC.

## CONCLUSION

Thus, this article evaluates the influence of the peak factor  $p$  of input signals on the signal-to-noise ratio of the ADC  $SNR_{adc}$ . It is indicated that ADCs play an important role in modern radio communication systems built on the basis of SDR. It is noted that one of the important characteristics of the ADC is quantization noise, which directly affects such an important property as the ADC signal-to-noise ratio  $SNR_{adc}$ . An expression represented by formula (5) is described for calculating the signal-to-noise ratio of the ADC  $SNR_{adc}$ , and depends on the peak factor  $p$  of the input signal. The signal-to-noise ratio of the ADC  $SNR_{adc}$  was assessed for radio communication systems with various types of signals (simple signals; signals generated using binary pseudo-random sequences; signals generated using chaotic signal generators). Based on the conducted research, taking into account the introduced assumptions and restrictions and the results of well-known studies [1, 2, 4, 5, 11], conclusions are formulated. The results obtained show that the peak factor  $p$  of the input signals directly affects the signal-to-noise ratio of the ADC  $SNR_{adc}$ , and it is advisable to take its influence into account when operating, developing, and improving modern radio



communication systems, including those using promising complex signals.