



Учреждение образования  
«Полоцкий государственный университет»

Научно-исследовательская опытно-экспериментальная  
лаборатория технической защиты информации



**XXVI НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«КОМПЛЕКСНАЯ ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ»  
24 - 26 мая 2022 года**

# **ОЦЕНКА ОШИБКИ РАВНОМЕРНОГО КВАНТОВАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ИМПУЛЬСОВ ТРЕУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ**

**В.К. ЖЕЛЕЗНЯК, К.Я. РАХАНОВ, С.В. ЛАВРОВ, Е.Р. АДАМОВСКИЙ,  
С.В. ХАРЧЕНКО, А.Г. ФИЛИППОВИЧ, М.М. БАРАНОВСКИЙ**

*Учреждение образования «Полоцкий государственный университет», Новополоцк, Республика Беларусь  
Оперативно-аналитический центр при Президенте Республики Беларусь*

**г. Москва**

# ВВЕДЕНИЕ

Возникающие при дискретно-квантованном преобразовании искажения речевого сигнала требуется оценить в контексте защищенности информации в каналах утечки. Мерой является величина нормативного показателя, ее установление – цель защищенности канала от утечки информации.

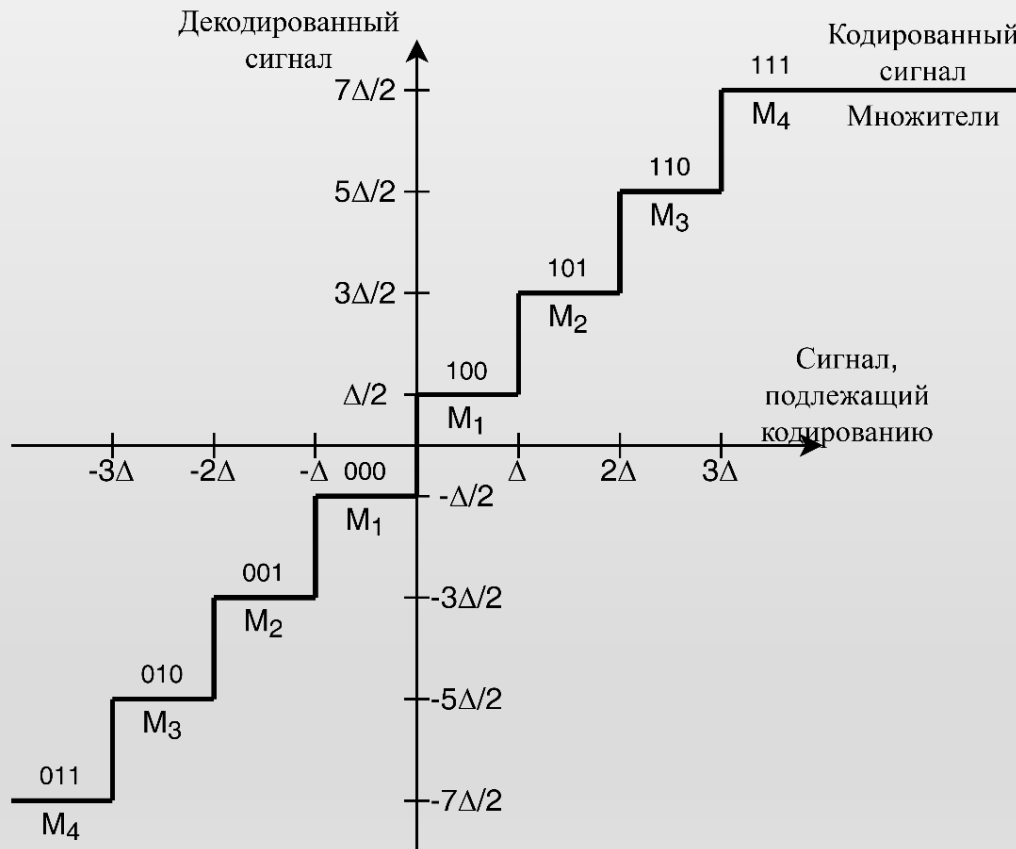


Рис. 1 – Квантование сигнала

# КВАНТОВАНИЕ СИГНАЛА

Непрерывный аналоговый сигнал разбивается на дискретные отсчеты путем умножения на немодулированные периодические последовательности дельта-функций [1]:

$$\delta_T'(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t - mT)$$

$$x(mt) = y(mT) - z(mT)$$

где  $y$  – дельта-функция;

$z$  – непрерывная часть сигнала между дискретными моментами.

Квантование соответствует выделению значений сигнала в фиксированные моменты времени (интервал квантования), и заменяет непрерывную функцию решетчатой функцией, которая определяется совокупностью выделенных ординат (дискрет), модулирующих последовательность импульсов.

Квантование и модуляция осуществляются импульсным модулятором, входной величиной которого является непрерывный сигнал, а выходной – модулированная последовательность импульсов.

# ХАРАКТЕРИСТИКА ШУМА КВАНТОВАНИЯ

В [2-4] предложено использовать измерительный сигнал в виде периодической последовательности импульсов треугольной формы (рис. 2а), которая имеет преимущество перед гармоническим измерительным сигналом (рис. 2б) в процессе выделения шума квантования, так как позволяет достичь более высокой точности его обработки при линейной амплитудной характеристике квантования и помехоустойчивой структуре, выделяющей слабые сигналы.

$$S_{\text{треуг}} = \frac{8}{\pi^2} (\cos(x) + \frac{1}{9} \cos(3x) + \frac{1}{25} \sin(5x) - \frac{1}{49} \sin(7x) + \dots)$$

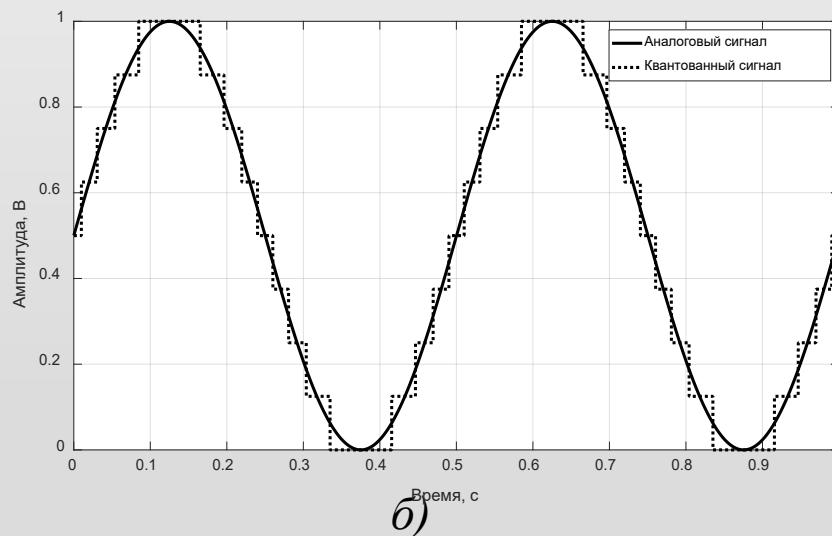
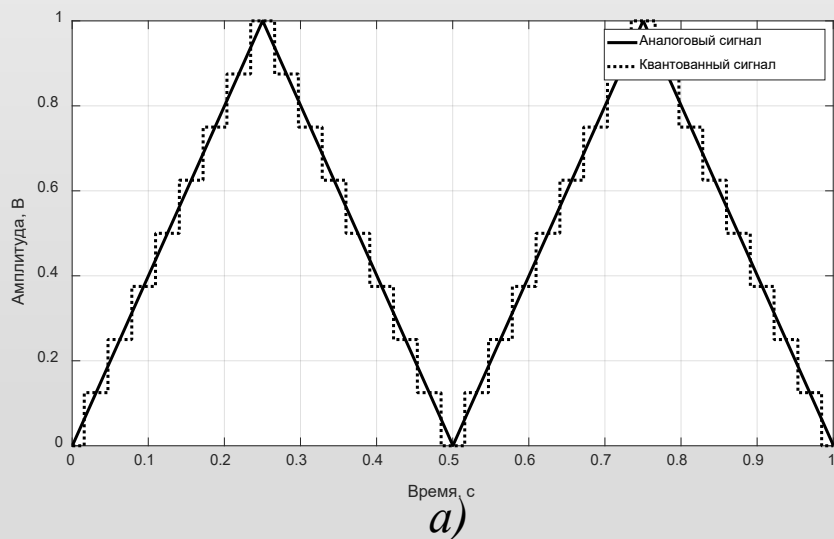
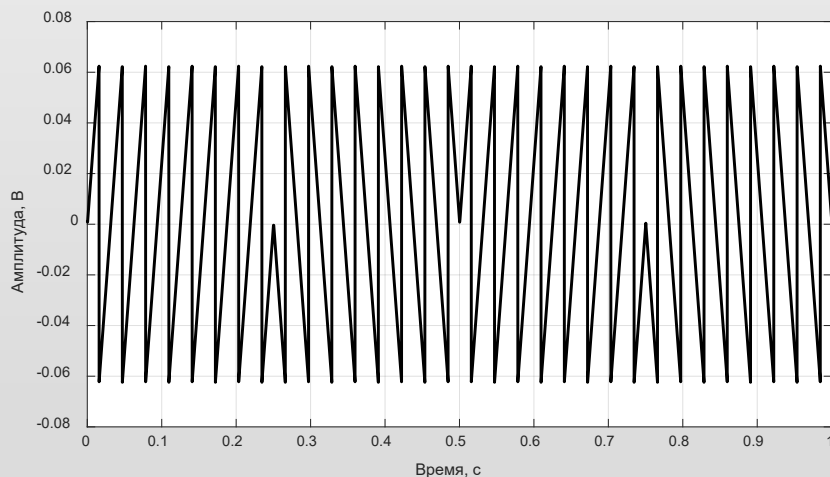


Рис. 2 – Квантование последовательностей: а) треугольной; б) гармонической

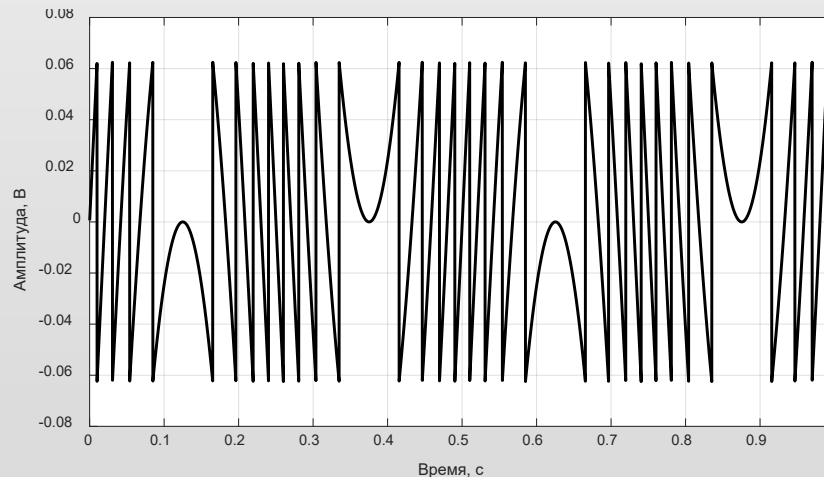
# ХАРАКТЕРИСТИКА ШУМА КВАНТОВАНИЯ

Шум квантования периодической последовательности импульсов треугольной формы представляет последовательность пилообразных импульсов (рис. 3а), спектральный состав которой включает основную и высшие гармоники. На рис. 3б приведен шум квантования гармонического измерительного сигнала для сравнения.

$$q(s_{\text{треуг}}) = \frac{2}{\pi} (\sin(x) - \frac{1}{2} \sin(2x) + \frac{1}{3} \sin(3x) - \frac{1}{4} \sin(4x) + \dots)$$



а)



б)

Рис. 3 – Шум квантования последовательностей: а) треугольной; б) гармонической

# ХАРАКТЕРИСТИКА ШУМА КВАНТОВАНИЯ

Характеристика квантования  $\Phi(x)$  представляется в виде суммы линейной характеристики  $x$  и нелинейной ограниченной характеристики  $\delta\Phi(x)$  [5]:

$$\Phi(x) = x + \delta\Phi(x); \quad \delta\Phi(x) \leq x/2.$$

Ступенчатая амплитудная характеристика  $s' = \varphi(s)$  представляется в виде суммы характеристик квантования при равномерном квантовании: линейной и нелинейной. В  $N$ -разрядном квантователе ( $N=2^n$ ) шаг составляет:

$$\Delta = \frac{2U_{\max}}{N} = \frac{2U_{\max}}{2^n} = U_{\max} \times 2^{-n}$$

Амплитудная характеристика квантователя [6] представлена на рис. 4а в двухкоординатной системе с равномерной величиной шага квантования  $\Delta$  и амплитудой в диапазоне  $[U_{\min}; U_{\max}]$ . Дискретные уровни принимают значения, как показано на рис. 4б.

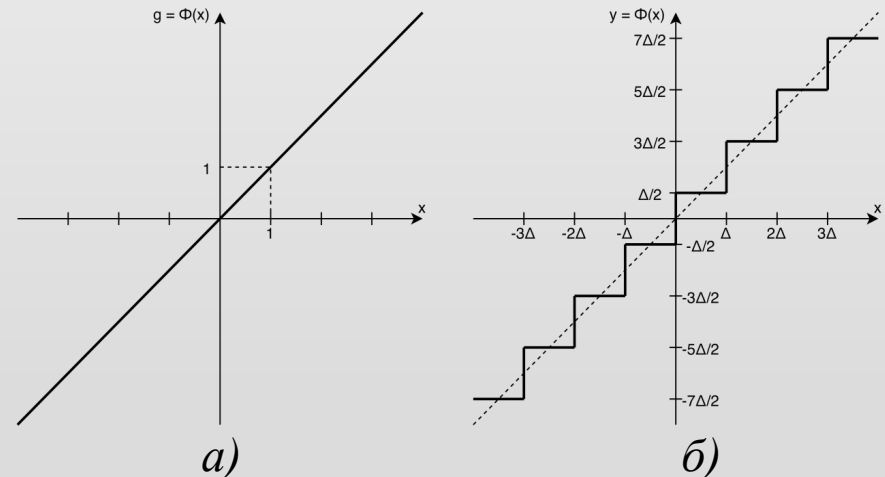


Рис. 4 – Характеристика квантователя:  
а) идеальная; б) с искажениями

# ХАРАКТЕРИСТИКА ШУМА КВАНТОВАНИЯ

Для шума квантования:

- максимальное значение ошибки равно  $\Delta/2$ ,
- среднее значение равно нулю,
- среднеквадратичное составляет  $2\Delta \times \sqrt{3}$ .

В полосах равной разборчивости отношение сигнал/шум (ОСШ) при равномерном квантовании зависит от длины кодовых слов  $N$ , частоты дискретизации  $f_d$  и ширины полосы  $\Delta f_i$ :

$$ОСШ = 6,02N + 10\lg\left(\frac{f_d}{\Delta f_i}\right) + C_s$$

где  $C_s$  – константа, зависит от формы сигнала и лежит в диапазоне от минус 15 до плюс 2 дБ.

$i$  – номер полосы равной разборчивости, от 1 до 20.

# ХАРАКТЕРИСТИКА ШУМА КВАНТОВАНИЯ

Любая измеряемая изменяющаяся величина может быть представлена в виде пачки выборок, разделенных одинаковыми интервалами времени. Значения функции  $a(t)$  записываются через интервалы  $T$  секунд.

Шэннон установил, что эти выборки содержат всю информацию о функции  $a(f)$ , если описывающий ее спектр частот меньше, чем  $1/T$  Гц.

Иными словами, если условие Шэннона соблюдено, функция  $a(t)$  может быть точно восстановлена по пачке выборок:

$$a(t) = a_s(t) \otimes \operatorname{sinc}\left(\frac{t}{T}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} a(nT) \operatorname{sinc}\left(\frac{t-nT}{T}\right)$$

$$a_s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a(nT) \delta(t-nT)$$

$$\operatorname{sinc}\left(\frac{t}{T}\right) = \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t/T}$$



# ХАРАКТЕРИСТИКА ШУМА КВАНТОВАНИЯ

Реальные квантующие устройства вносят дополнительные ошибки, обусловленные недостаточно совершенными электрическими или механическими параметрами. Наиболее серьезными являются шумовые ошибки и ошибки калибровки.

- **Шумовая ошибка** появляется из-за нестабильности уровней перехода, обычно независимой от одной выборки к другой.
- **Ошибка калибровки** является следствием неизменной нелинейности передаточной характеристики квантующего устройства.

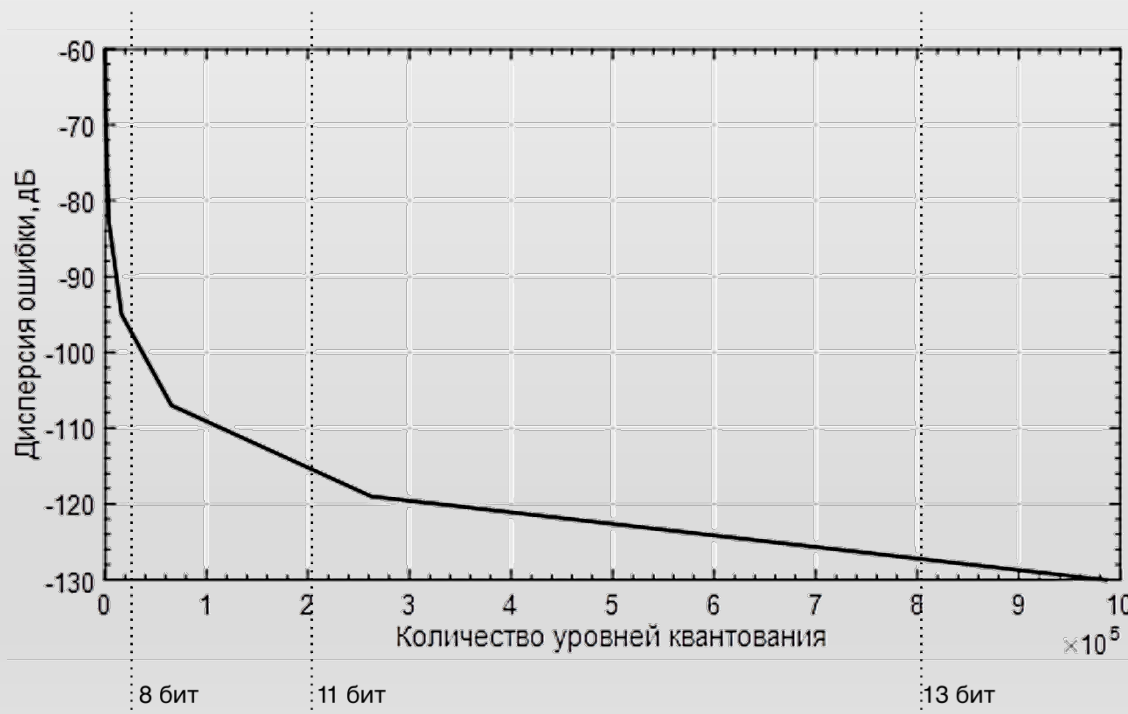
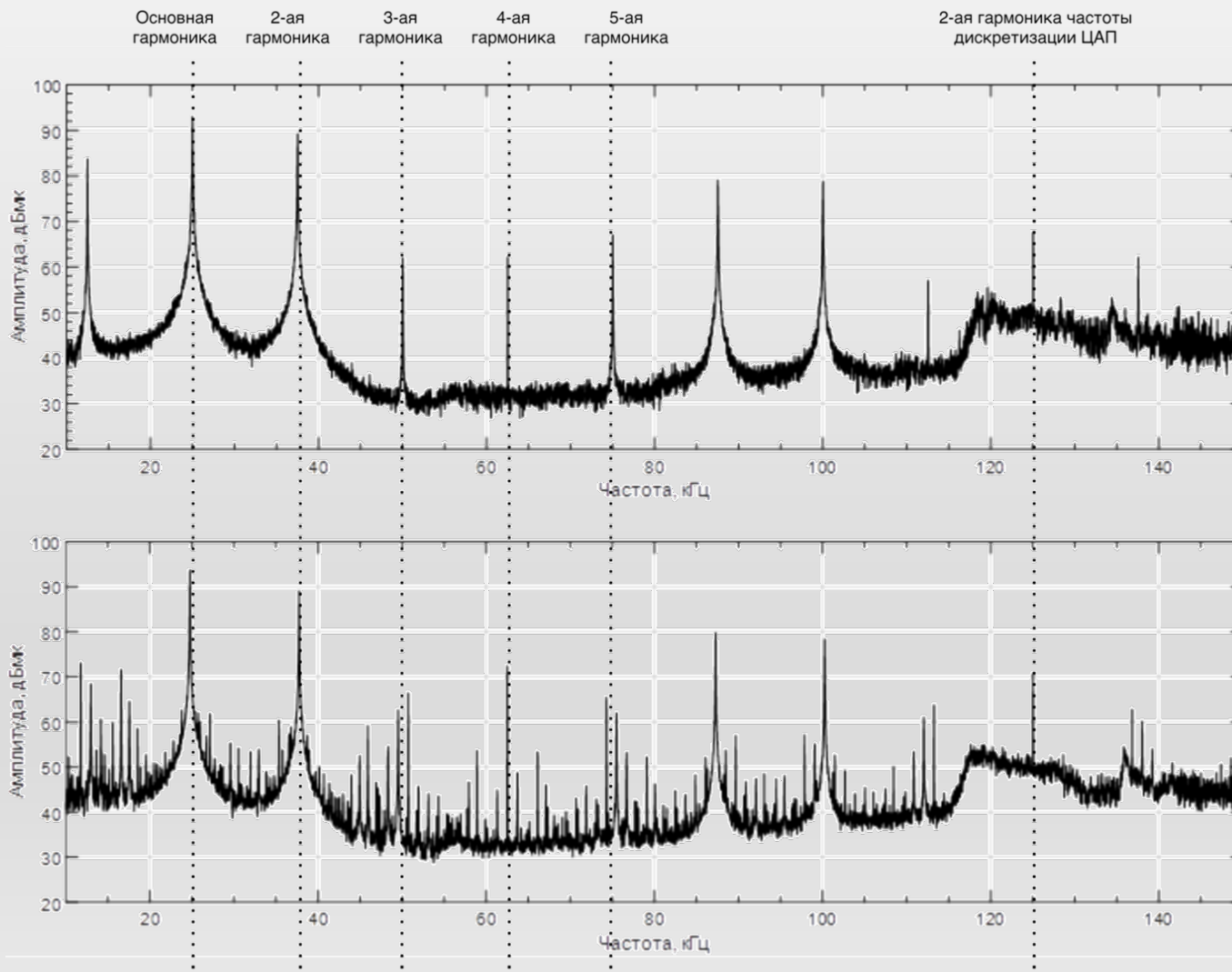


Рис. 5 – Зависимость величины ошибки квантования от разрядности АЦП

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Снимают поля рассеяния выходного кабеля ЦАП. Выделяют искаженные сигналы, в спектре которых видны основная и высшие гармонические составляющие, соответствующие (рис. 6.1) и не соответствующие (рис. 6.2) субгармоникам и частоте дискретизации  $f_d$ , высшим гармоникам  $f_d$  [11].



*Рис. 6 –  
Магнитное  
поле ЦАП при  
обработке  
тестового  
сигнала*

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

На рис. 7 показана схема эксперимента, которая включает источник измерительного сигнала, ЦАП (частота дискретизации 62,5 кГц), пробник и систему анализа полученных данных. Внешние помехи были исключены за счет измерений в экранированном помещении.



Рис. 7 – Измерительная схема

# ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [12] рассматривается прохождение сложного сигнала в системе «запись-воспроизведение» при учете нелинейности системы и наличия модуляций. Для упрощения расчетов коэффициенты четных членов полинома приняты равными нулю при оценке нелинейных искажений полиномом с нечетными степенями.

$$U_{вых} = a_1^1 U_{вх} - a_3^3 U_{вх} + a_5^5 U_{вх};$$

Работа [2] в полной мере показывает невозможность оценки искажения квантования, так как спектры гармонических искажений, обусловленные высшими четными и нечетными гармониками, комбинационными искажениями различных порядков комбинаций.

Использование измерительного сигнала периодической импульсной последовательности не вносит методических погрешностей при оценке защищенности каналов утечки, обусловленных нелинейностью шума квантования. В работе [10] представлены результаты, определяющие типовые амплитудные характеристики системы передачи и количество измерительных гармонических сигналов, используя амплитудную характеристику при аналитическом выражении тремя членами ступенчатого полинома.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Впервые предложено с высокой точностью оценивать шум квантования гармоническим сигналом вместо узкополосного шума для оценки по единой методике для аналоговых и цифровых речевых сигналов.
- В качестве источника измерительного сигнала предложена периодическая последовательность импульсов треугольной формы, в результате чего искажения при квантовании не содержат погрешностей, обусловленных измерительным сигналом.
- Периодическая последовательность импульсов пилообразной формы включает основную, высшие четные и нечетные гармоники; аналитически описывается с помощью полинома с основной и высшими четными и нечетными гармониками.
- При подаче на вход полиномом несколько гармонических сигналов, на выходе образуются сигналы с исходными частотами и измененными амплитудами и комбинационные составляющие различных порядков.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. М.: Наука, 1977. 560 с.
2. Некоторые проблемы оценки защищенности шума квантования / В.К. Железняк [и др.] // Проблемы инфокоммуникаций. 2020. № 2-2(12). С. 60-65.
3. Способ оценки защищенности преобразованного в цифровую форму речевого сигнала: пат. ВУ № 23689, Железняк В.К., Лавров С.В., Филиппович А.Г., Барановский М.М.; заявл. 04.12.2019.
4. Железняк В.К., Лавров С.В., Барановский М.М., Филиппович А.Г. Способ оценки защищенности преобразованного в цифровую форму речевого сигнала в каналах утечки информации // Комплексная защита информации: материалы XXIV научно-практической конференции. Витебск. 2019. С. 53-59.
5. Передача информации в системах подвижной связи / В.Ю. Бабков [и др.]. СпбГУТ. 1999. 152 с.
6. Шелухин, О.И., Лукьянцев Н.Ф. Цифровая обработка и передача речи / Москва: Научно-техническое издательство "Радио и связь". 2000. 456 с.
7. Мирский Г.Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. М.: Энергоиздат. 1982. 320 с.
8. Woodward P. M. Probability and Information Theory, with Application to Radar. New York: McGraw-Hill Book Company, 1953. 146 p.
9. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов: Справочник. М.: Радио и связь. 1985. 312 с.
10. Бабуркин В.Н., Гензель Г.С., Павлов Н.Н. Электроакустика и радиовещание. Акустические вопросы вещания: учебное пособие. Москва: Связь. 1967. 312 с.
11. Железняк В.К., Раханов К.Я., Лавров С.В., Адамовский Е.Р., Барановский М.М., Филиппович А.Г. Спектральное представление сигнала ошибки равномерного квантования периодической импульсной последовательностью треугольной формы // Материалы XXVI Междунар. науч.-техн. конф. «Современные средства связи», Минск. БГАС. 2021.
12. Железняк, В.К. Спектральный состав выходного сигнала в системе запись-воспроизведение при одновременном воздействии амплитудной и частотной модуляции // Вопросы радиоэлектроники. Серия, Общетеchnическая. 1967. №13. С. 31-52.

**СПАСИБО ЗА  
ВНИМАНИЕ!**