

ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ СВЯЗИ

Лекция

**по учебной дисциплине «Цифровая схемотехника и
обработка сигналов»**

(Д-0205-1)

**Тема № 9: «Описание ЛДС в частотной области»
Занятие № 34: «Эффекты квантования чисел в
цифровых цепях»**

Руководитель занятия – доцент кафедры, к.т.н., доцент,
полковник Филимонов Василий Александрович

г. Санкт-Петербург
2018





Учебные цели:

- 1. Изучить процесс формирования шума (ошибок) квантования и свойства шума квантования.**
- 2. Дать представление о способах квантования и кодирования чисел в системах ЦОС.**
- 3. Изучить влияние шума квантования АЦП.**



Учебные вопросы:

1. Способы квантования чисел.
2. Шум аналого-цифрового преобразования.
3. Собственный шум цифровой цепи.
4. Эффекты квантования коэффициентов.



Литература для самостоятельной работы обучаемых:

1. Цифровая обработка сигналов. Краткий курс/ Д. А. Улахович – СПб.: ВАС, 2017. – 408 с. (стр. 107-134).
2. Цифровая обработка сигналов./ Авторы: Д. А. Улахович/ Электронное учеб. пособие /– СПб.: ВАС, 2015.



Первый учебный вопрос

5

Способы квантования чисел



Первый учебный вопрос

1. Источники шума (ошибок) квантования; допущения о свойствах шума квантования

Источники шума (ошибок) квантования в цифровых системах:

- 1) **аналого-цифровое преобразование (АЦП)** сигналов;
- 2) **умножение цифровых сигналов**, результат которого округляется или усекается;
- 3) **квантование коэффициентов** (разностного уравнения или передаточной функции).



Первый учебный вопрос

1. Источники шума (ошибок) квантования; допущения о свойствах шума квантования

Источники шума (ошибок) квантования в цифровых системах:

- 1) **аналого-цифровое преобразование (АЦП)** сигналов;
- 2) **умножение цифровых сигналов**, результат которого округляется или усекается;
- 3) **квантование коэффициентов** (разностного уравнения или передаточной функции).

Свойства шума квантования $e(n)$:

- 1) последовательность $e(n)$ является случайным процессом типа «белый шум», т. е. любые её два отсчёта не коррелированы ;
- 2) последовательность $e(n)$ не коррелирована как с квантуемой последовательностью $x(n)$, так и с шумом от других источников;
- 3) представляет собой ошибку округления $e(n) = e_o(n)$;



Первый учебный вопрос

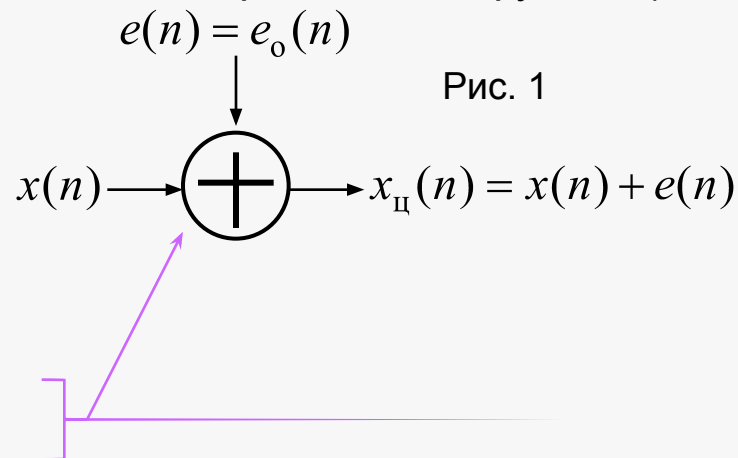
1. Источники шума (ошибок) квантования; допущения о свойствах шума квантования

Источники шума (ошибок) квантования в цифровых системах:

- 1) **аналого-цифровое преобразование (АЦП)** сигналов;
- 2) **умножение цифровых сигналов**, результат которого округляется или усекается;
- 3) **квантование коэффициентов** (разностного уравнения или передаточной функции).

Свойства шума квантования $e(n)$:

- 1) последовательность $e(n)$ является случайным процессом типа «белый шум», т. е. любые её два отсчёта не коррелированы ;
- 2) последовательность $e(n)$ не коррелирована как с квантуемой последовательностью $x(n)$, так и с шумом от других источников;
- 3) представляет собой ошибку округления $e(n) = e_o(n)$;
- 4) шум является аддитивным (рис. 1);



Первый учебный вопрос

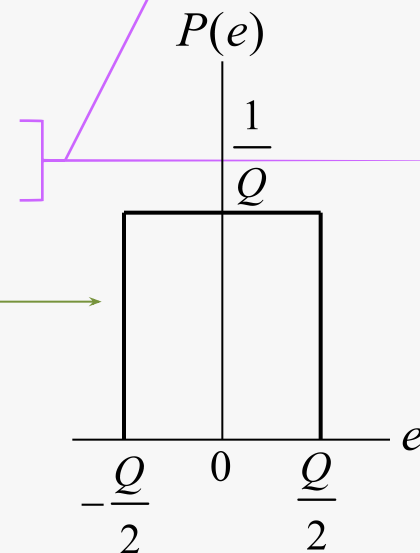
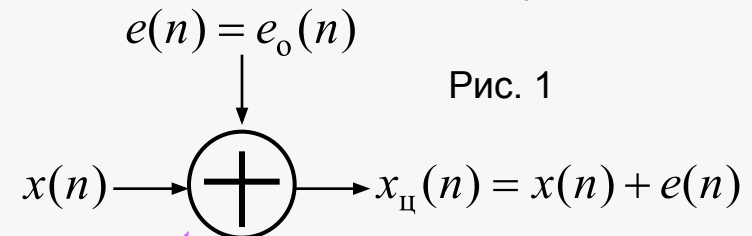
1. Источники шума (ошибок) квантования; допущения о свойствах шума квантования

Источники шума (ошибок) квантования в цифровых системах:

- 1) **аналого-цифровое преобразование (АЦП)** сигналов;
- 2) **умножение цифровых сигналов**, результат которого округляется или усекается;
- 3) **квантование коэффициентов** (разностного уравнения или передаточной функции).

Свойства шума квантования $e(n)$:

- 1) последовательность $e(n)$ является случайным процессом типа «белый шум», т. е. любые её два отсчёта не коррелированы ;
- 2) последовательность $e(n)$ не коррелирована как с квантуемой последовательностью $x(n)$, так и с шумом от других источников;
- 3) представляет собой ошибку округления $e(n) = e_o(n)$;
- 4) шум является аддитивным (рис. 4);
- 5) распределение вероятности ошибок равномерно по диапазону ошибок квантования (рис. 5).



1.2. Представление двоичного числа в регистре

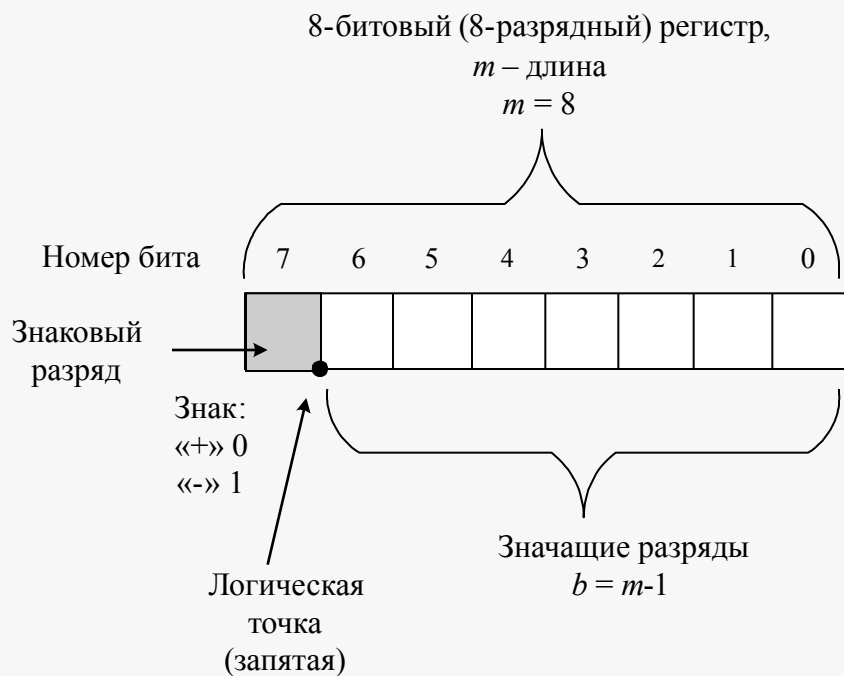


Рис. 3. Регистр (элемент памяти) при использовании арифметики с фиксированной точкой (запятой)

Первый учебный вопрос

1.2. Представление двоичного числа в регистре

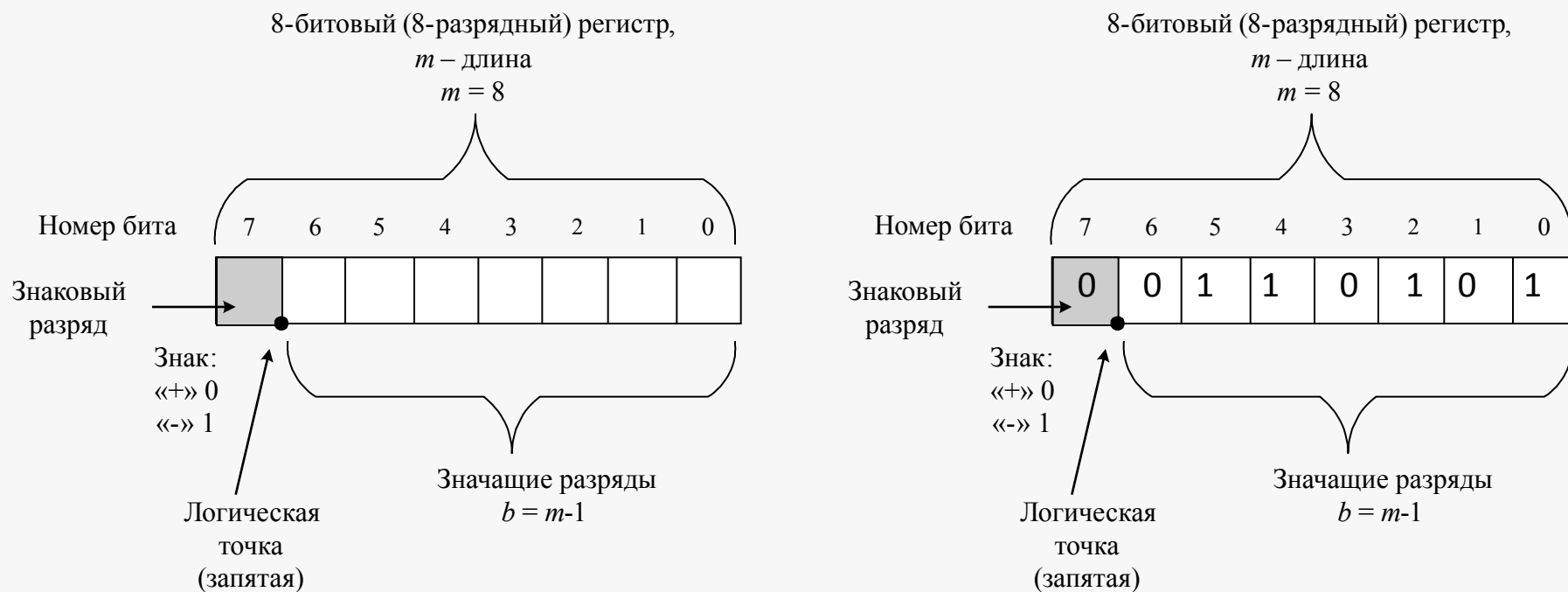


Рис. 3. Регистр (элемент памяти) при использовании арифметики с фиксированной точкой (запятой)



Первый учебный вопрос

Квантование выполняется двумя способами:

1. **Усечение** k -разрядного числа до b значащих разрядов ($k > b$)

Максимальная ошибка усечения
равна шагу квантования:

0.0110 11
0,421875

0.0110
0,375

$$\max_n |e_y(n)| = Q = 2^{-b} \quad (1)$$

Первый учебный вопрос

Квантование выполняется двумя способами:

1. **Усечение** k -разрядного числа до b значащих разрядов ($k > b$)

Максимальная ошибка усечения
равна шагу квантования:

0.0110 11	0.0110
0,421875	0,375

$$\max_n |e_y(n)| = Q = 2^{-b} \quad (1)$$

2. **Округление** k -разрядного числа до b значащих разрядов ($k > b$)

а) **Округление до ближайшего**

$$x_o(n) = \left[x(n) + \frac{Q}{2} \right] \quad (2)$$

$$\max_n |e_o(n)| = \frac{Q}{2} = 2^{-b-1} \quad (3)$$

0.0110 11	0.0111
0,421875	0,4375

$$\max_n |e_o(n)| = \frac{Q}{2} = 2^{-b-1} \Big|_{b=4} = 2^{-5} = 0,015625 \quad e_o = -0,015625$$



Первый учебный вопрос

$$0 \leq |A| < 1; [A] = \pm 0, \underset{\text{Значащие разряды}}{\overset{\text{Значащие разряды}}{a_1 a_2 \dots a_j \dots a_b}}; \{a_j\}, j = 1, 2, \dots, b$$

Прямой код

$$A > 0 \quad 0. a_1 a_2 \dots a_j \dots a_b$$

$$0.10111$$

$$A \leq 0 \quad 1. a_1 a_2 \dots a_j \dots a_b$$

$$1.10111$$

используется при
выполнении
умножения



Первый учебный вопрос

$$0 \leq |A| < 1; [A] = \pm 0, \underset{\square}{a_1}, \underset{\square}{a_2}, \dots, \underset{\square}{a_j}, \dots, \underset{\square}{a_b}; \{a_j\}, j = 1, 2, \dots, b$$

Значащие разряды

	Прямой код	Обратный код
$A > 0$	0. $a_1 a_2 \dots a_j \dots a_b$	0. $a_1 a_2 \dots a_j \dots a_b$
	0. 1 0 1 1 1	0. 1 0 1 1 1
$A \leq 0$	1. $a_1 a_2 \dots a_j \dots a_b$	1. $\bar{a}_1 \bar{a}_2 \dots \bar{a}_j \dots \bar{a}_b$
	1. 1 0 1 1 1	1. 0 1 0 0 0

используется при
выполнении
умножения

Первый учебный вопрос

$$0 \leq |A| < 1; [A] = \pm 0, \underset{\text{Значащие разряды}}{\overset{\text{Значащие разряды}}{a_1 a_2 \dots a_j \dots a_b}}; \{a_j\}, j = 1, 2, \dots, b$$

	Прямой код	Обратный код	Дополнительный код
$A > 0$	0. $a_1 a_2 \dots a_j \dots a_b$ 0. 1 0 1 1 1	0. $a_1 a_2 \dots a_j \dots a_b$ 0. 1 0 1 1 1	0. $a_1 a_2 \dots a_j \dots a_b$ 0. 1 0 1 1 1
$A \leq 0$	1. $a_1 a_2 \dots a_j \dots a_b$ 1. 1 0 1 1 1	1. $\bar{a}_1 \bar{a}_2 \dots \bar{a}_j \dots \bar{a}_b$ 1. 0 1 0 0 0	1. $\bar{a}_1 \bar{a}_2 \dots \bar{a}_j \dots \bar{a}_b + 2^{-b}$ 1. 0 1 0 0 0 + 2^{-5} 1. 0 1 0 0 1

используется при
выполнении
умножения

Подобен без знаковому
числу: бит, находящийся в
знаковом разряде, участвует
во всех арифметических
операциях

Первый учебный вопрос

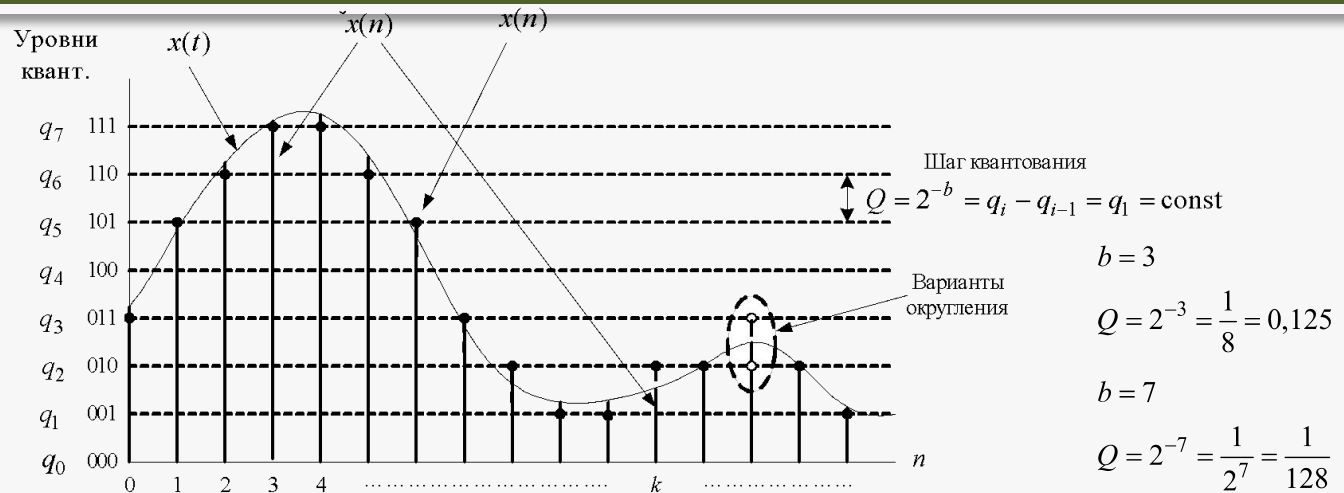


Рис. 2. Формирование цифрового сигнала (квантование по времени и по уровню)

$x(t)$ – аналоговый сигнал, подвергающийся дискретизации,
 $\tilde{x}(n)$ – дискретный сигнал с неограниченной точностью представления отсчётов,
 $x(n)$ – цифровой сигнал, значения которого отмечены точками.

Количество уровней квантования (включая нулевой) $R = 2^b$; $b = \text{int}[\log_2 R]$
 $\text{int}[a]$ - ближайшее целое, не меньшее a

Пример 1:
 $b = \text{int}[\log_2 8] = 3$; $b = \text{int}[\log_2 120] = \text{int}[6,9068904] = 7$

В системах ЦОС с фиксированной точкой (запятой):

$$0 \leq |A| < 1 \rightarrow 0 \leq |A| \leq 1 - 2^{-b}.$$



Второй учебный вопрос

18

Шум аналого-цифрового преобразования

2. Оценки шума АЦП при округлении чисел

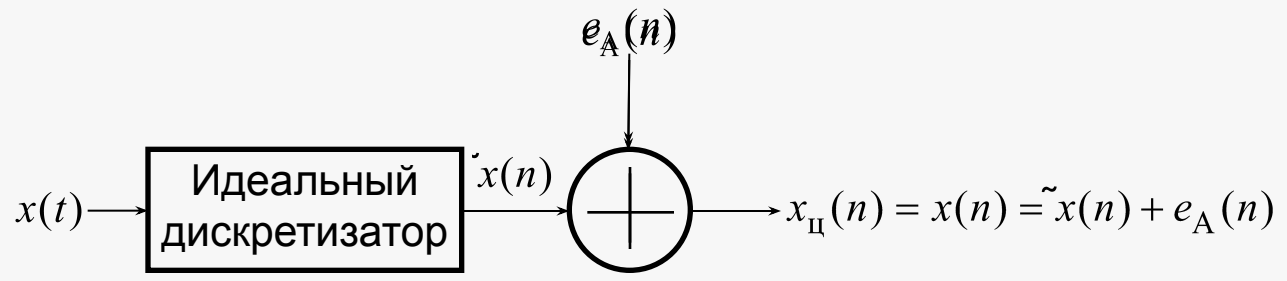


Рис. 5

Второй учебный вопрос

2. Оценки шума АЦП при округлении чисел

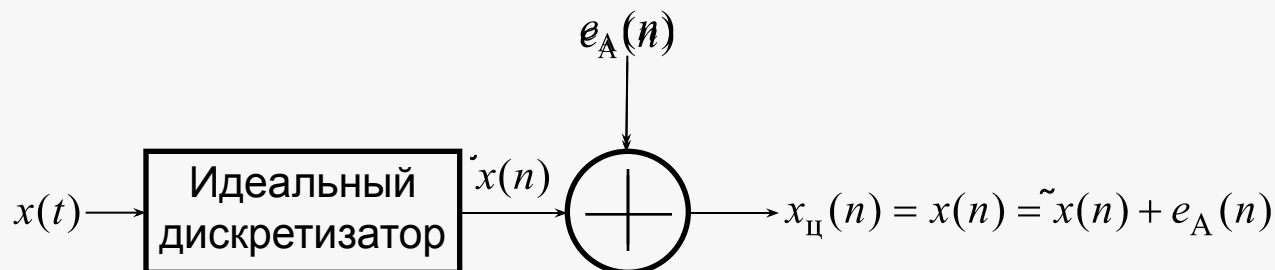


Рис. 5

Вероятностные оценки:

Математическое
ожидание:

$$\mu_A = E[e_A(n)] = \int_{-\infty}^{\infty} e(n) p_A(e) de = \int_{-Q_A/2}^{Q_A/2} e(n) \frac{1}{Q_A} de = \frac{1}{Q} \left. \frac{e^2(n)}{2} \right|_{-Q_A/2}^{Q_A/2} = 0.$$

Дисперсия:

$$\sigma_A^2 = E[(e_A(n) - \mu_A)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} e_A^2(n) p_A(e) de = \int_{-Q_A/2}^{Q_A/2} e_A^2(n) \frac{1}{Q_A} de = \frac{1}{Q_A} \left. \frac{e^3(n)}{3} \right|_{-Q_A/2}^{Q_A/2} = \frac{Q_A^2}{12}.$$

Второй учебный вопрос

2. Оценки шума АЦП при округлении чисел

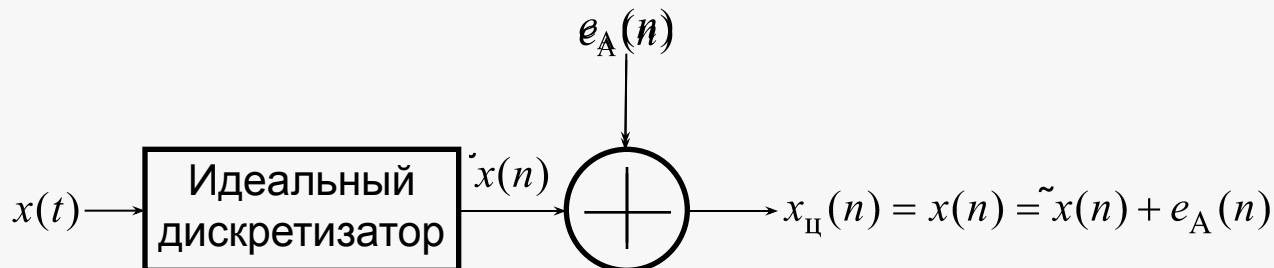


Рис. 5

Вероятностные оценки:

Математическое
ожидание:

$$\mu_A = E[e_A(n)] = \int_{-\infty}^{\infty} e(n) p_A(e) de = \int_{-Q_A/2}^{Q_A/2} e(n) \frac{1}{Q_A} de = \frac{1}{Q_A} \left[\frac{e^2(n)}{2} \right]_{-Q_A/2}^{Q_A/2} = 0.$$

Дисперсия:

$$\sigma_A^2 = E[(e_A(n) - \mu_A)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} e_A^2(n) p_A(e) de = \int_{-Q_A/2}^{Q_A/2} e_A^2(n) \frac{1}{Q_A} de = \frac{1}{Q_A} \left[\frac{e^3(n)}{3} \right]_{-Q_A/2}^{Q_A/2} = \frac{Q_A^2}{12}.$$

Мощность шума
квантования:

$$P_A = 10 \lg \frac{Q_A^2}{12} = 10 \lg \frac{2^{-2b_A}}{12} = -[20b_A \lg 2 + 10 \lg 12] \approx -(6,02b_A + 10,79) \text{ [дБ]}$$

Детерминированная
оценка:

абсолютная граница
шума АЦП

$$E_A = \max_n |e_A(n)| = \frac{Q_A}{2} = 2^{-b_A-1}.$$

Второй учебный вопрос

2. Оценки шума АЦП при округлении чисел

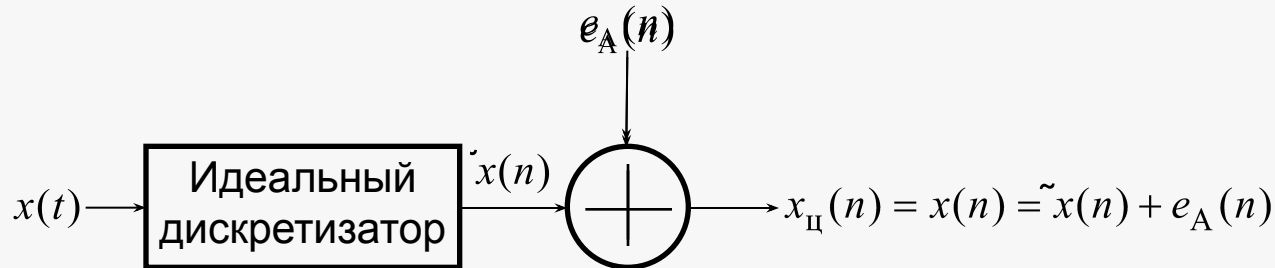


Рис. 5

Вероятностные оценки:

Математическое
ожидание:

$$\mu_A = E[e_A(n)] = \int_{-\infty}^{\infty} e(n) p_A(e) de = \int_{-Q_A/2}^{Q_A/2} e(n) \frac{1}{Q_A} de = \frac{1}{Q_A} \left[\frac{e^2(n)}{2} \right]_{-Q_A/2}^{Q_A/2} = 0.$$

Дисперсия:

$$\sigma_A^2 = E[(e_A(n) - \mu_A)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} e_A^2(n) p_A(e) de = \int_{-Q_A/2}^{Q_A/2} e_A^2(n) \frac{1}{Q_A} de = \frac{1}{Q_A} \left[\frac{e^3(n)}{3} \right]_{-Q_A/2}^{Q_A/2} = \frac{Q_A^2}{12}.$$

Мощность шума
квантования:

$$P_A = 10 \lg \frac{Q_A^2}{12} = 10 \lg \frac{2^{-2b_A}}{12} = -[20b_A \lg 2 + 10 \lg 12] \approx -(6,02b_A + 10,79) \text{ [дБ]}$$

Детерминированная
оценка:

абсолютная граница
шума АЦП

$$E_A = \max_n |e_A(n)| = \frac{Q_A}{2} = 2^{-b_A-1}.$$

Пример:

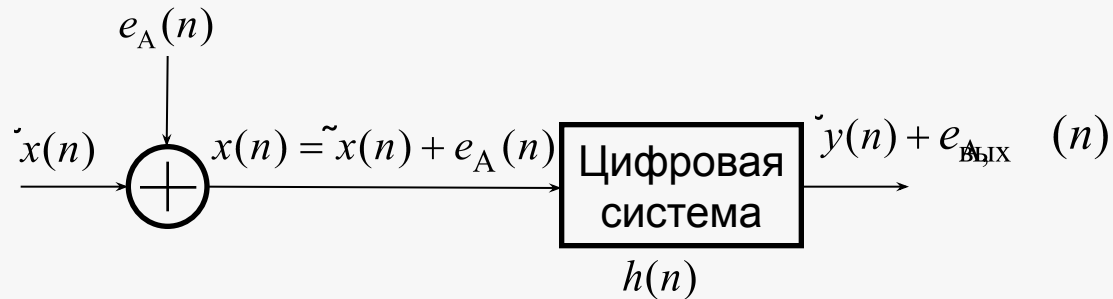
$$\begin{aligned} b_A = 8, & \quad \mu_A = 0, & \quad P_A = -58.8, & \quad E_A = 2^{-9} = 0.001953125 \\ b_A = 12, & \quad \mu_A = 0, & \quad P_A = -82.8, & \quad E_A = 2^{-13} \cong 0.000122 \end{aligned}$$

Второй учебный вопрос

2. Шум АЦП, приведённый к выходу цифровой системы

Условия:

- коэффициенты системы и все арифметические операции реализуются точно;
- шум АЦП аддитивный.

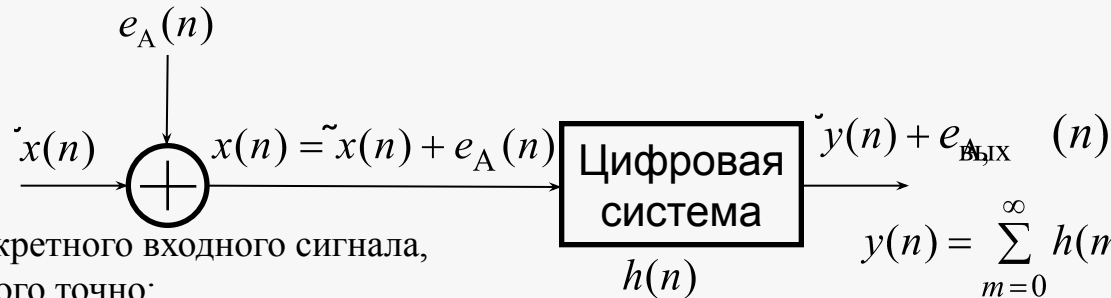


Второй учебный вопрос

2. Шум АЦП, приведённый к выходу цифровой системы

Условия:

- коэффициенты системы и все арифметические операции реализуются точно;
- шум АЦП аддитивный.



$\tilde{x}(n)$ - отсчеты дискретного входного сигнала, представленного точно;

$e_A(n)$ - шум АЦП;

$x(n)$ - квантованный сигнал;

$\tilde{y}(n)$ - отсчеты дискретного выходного сигнала, представленного точно;

$e_{\text{вых}}(n)$ - шум АЦП, приведённый к выходу цифровой системы;

$$y(n) = \sum_{m=0}^{\infty} h(m) x(n-m)$$

$$e_{\text{вых}}(n) = \sum_{m=0}^{\infty} h(m) e_A(n-m)$$

Второй учебный вопрос

$$\underline{\mu_{A, \text{ВЫХ}} = E[e_{A, \text{ВЫХ}}] = E\left[\sum_{m=0}^{\infty} h(m)e_A(n-m)\right] = \sum_{m=0}^{\infty} h(m) \underbrace{E[e_A(n-m)]}_{E_A=0} = 0;}$$

$$\underline{\sigma_{\text{ВЫХ}}^2 = E\left[\left(e_{A, \text{ВЫХ}}(n) - \underbrace{\mu_{A, \text{ВЫХ}}}_{0}\right)^2\right] = E[e_{A, \text{ВЫХ}}^2(n)] = \sum_{m=0}^{\infty} h^2(m) \underbrace{E[e_A^2(n-m)]}_{\sigma_A^2 = \frac{Q_A}{12}} = \frac{Q_A^2}{12} \sum_{m=0}^{\infty} h^2(m)}$$



Третий учебный вопрос

Собственный шум цифровой системы



Третий учебный вопрос

Определение:

Собственный шум цифровой системы — это выходной шум квантования, обусловленный округлением результатов операций умножения.

Для анализа собственного шума *необходимо:*

1. *Составить линейную модель* цифровой системы, учитывающую шумы квантования в тех точках системы, в которых выполняется операция умножения.
2. *Вычислить все реакции системы* на каждый шумовой сигнал, формируемый умножителем (составляющие собственного шума).
3. *Найти оценки собственного шума* цифровой системы на основе полученных составляющих.



Третий учебный вопрос

Определение:

Собственный шум цифровой системы — это выходной шум квантования, обусловленный округлением результатов операций умножения.

Для анализа собственного шума *необходимо:*

1. *Составить линейную модель* цифровой системы, учитывающую шумы квантования в тех точках системы, в которых выполняется операция умножения.
2. *Вычислить все реакции системы* на каждый шумовой сигнал, формируемый умножителем (составляющие собственного шума).
3. *Найти оценки собственного шума* цифровой системы на основе полученных составляющих.

Третий учебный вопрос

1. Собственный шум умножителя

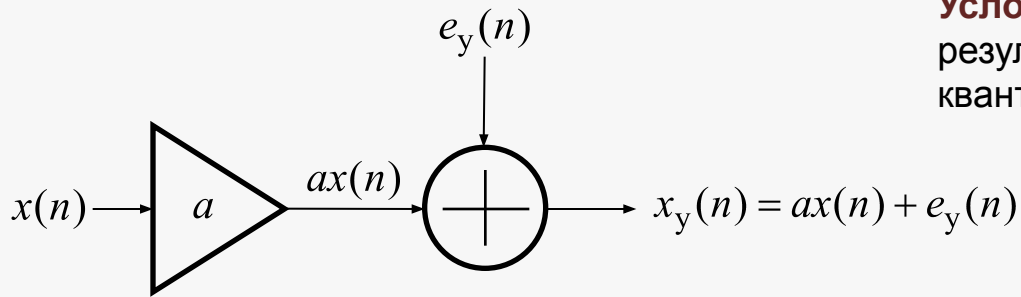


Рис. 7. Линейная модель умножителя с квантованием

Условие: умножение осуществляется точно, а к результату подмешивается аддитивная ошибка квантования.

Параметры:

- ошибка квантования $e_y(n)$,
- разрядность результата умножения
- шаг квантования

Оценки шума:

☒ математическое ожидание $\mu_y = 0$;

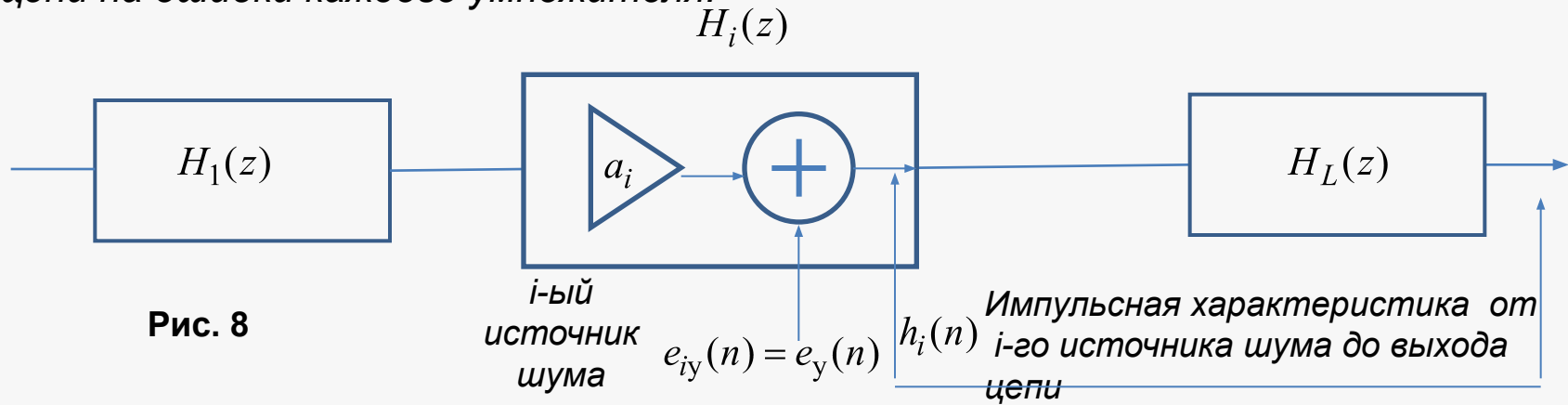
☒ дисперсия $\sigma_y^2 = Q_y^2 / 12$;

☒ абсолютная граница $E_y = \max_n |e_y(n)| \leq Q_y / 2 = 2^{-b_y - 1}$.

Третий учебный вопрос

3.2. Полный собственный шум цепи

Составляющие полного собственного шума — это реакции цифровой цепи на ошибки каждого умножителя.



По свойству линейности цифровой системы:

$$e_{y, \text{ВЫХ}}(n) = \sum_{i=1}^L e_{yi, \text{ВЫХ}}(n) \quad e_{yi, \text{ВЫХ}}(n) = \sum_{m=1}^{\infty} h_i(m) e_{yi}(n-m) \Big|_{e_{yi}=e_y} = \sum_{m=1}^{\infty} h_i(m) e_y(n-m)$$

$$\underline{\mu_{yi, \text{ВЫХ}}} = \sum_{m=0}^{\infty} h_i(m) E[e_y(n-m)] = \sum_{m=0}^{\infty} h_i(m) \underbrace{\mu_{yi}}_0 = \underline{0} \quad \underline{\sigma_{yi, \text{ВЫХ}}^2} = \sigma_{yi}^2 \sum_{m=0}^{\infty} h_i^2(m) = \underline{\frac{Q_y^2}{12} \sum_{m=0}^{\infty} h_i^2(m)}$$

$$\underline{E_{yi, \text{ВЫХ}}} = \max_n |e_{yi, \text{ВЫХ}}(n)| \leq E_{yi} \sum_{m=0}^{\infty} |h_i(m)| = \underline{\frac{Q_y}{2} \sum_{m=0}^{\infty} |h_i(m)|}$$

Третий учебный вопрос

Полный собственный шум цепи

Математическое ожидание $\mu_{y, \text{ВЫХ}} = \sum_{i=1}^L \mu_{y_i, \text{ВЫХ}} = 0$

Дисперсия $\sigma_{y, \text{ВЫХ}}^2 = \sum_{i=1}^L \sigma_{y_i, \text{ВЫХ}}^2 = \frac{Q_y^2}{12} \sum_{i=1}^L \sum_{m=0}^{\infty} h_i^2(m)$

Абсолютная граница $E_{y, \text{ВЫХ}} = \sum_{i=1}^L E_{y_i, \text{ВЫХ}} \leq \frac{Q_y}{2} \sum_{i=1}^L \sum_{m=0}^{\infty} |h_i(m)|$

Полный выходной шум цепи

$$e_{\text{ВЫХ}}(n) = e_{A, \text{ВЫХ}}(n) + e_{y, \text{ВЫХ}}(n)$$

$$\mu_{\text{ВЫХ}} = \mu_{A, \text{ВЫХ}} + \mu_{y, \text{ВЫХ}} = 0$$

$$\sigma_{\text{ВЫХ}}^2 = \sigma_{A, \text{ВЫХ}}^2 + \sigma_{y, \text{ВЫХ}}^2$$

$$E_{\text{ВЫХ}} = \max_n |e_{\text{ВЫХ}}(n)| = E_{A, \text{ВЫХ}} + E_{y, \text{ВЫХ}}$$



Четвертый учебный вопрос

32

Эффекты квантования в цифровых цепях



Четвертый учебный вопрос

33

1. Эффекты квантования коэффициентов

Квантование коэффициентов эквивалентно изменению значений нулей и полюсов передаточной функции, что приводит к изменению частотных характеристик цепи.

В БИХ-цепях ***квантование коэффициентов может привести к потере устойчивости цепи!***



Четвертый учебный вопрос

34

1. Эффекты квантования коэффициентов

Квантование коэффициентов эквивалентно изменению значений нулей и полюсов передаточной функции, что приводит к изменению частотных характеристик цепи.

В БИХ-цепях **квантование коэффициентов может привести к потере устойчивости цепи!**

$$H(z) = \frac{1}{1 - 1,603z^{-1} + 0,645z^{-2}}$$

$$z_{*1,2} \approx 0,8 \pm 0,05j \approx 0,8016 e^{\pm j3,6^\circ}$$

$$|z_{*1,2}| < 1$$



Рис. 9

Четвертый учебный вопрос

1. Эффекты квантования коэффициентов

Квантование коэффициентов эквивалентно изменению значений нулей и полюсов передаточной функции, что приводит к изменению частотных характеристик цепи.

В БИХ-цепях **квантование коэффициентов может привести к потере устойчивости цепи!**

$$H(z) = \frac{1}{1 - 1,603z^{-1} + 0,645z^{-2}}$$

Округление до
десятых \rightarrow

$$H(z) = \frac{1}{1 - 1,6z^{-1} + 0,6z^{-2}}$$

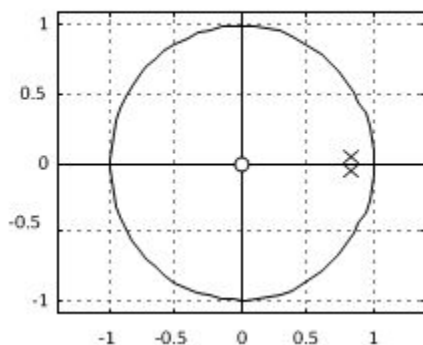
$$z_{*1,2} \approx 0,8 \pm 0,05j \approx 0,8016 e^{\pm j3,6^\circ}$$

$$|z_{*1,2}| < 1$$

$$z_{*1} = 1 + j0,2 \cong 1,02 e^{j11,3^\circ}$$

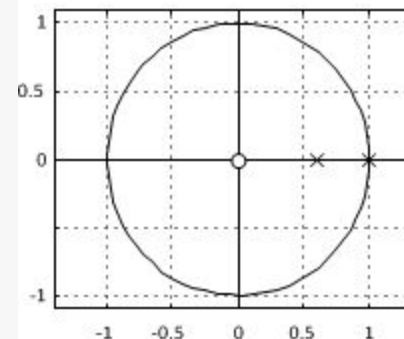
$$z_{*2} = 0,6 + j0,2 \cong 0,63 e^{j18,5^\circ}$$

Карта нулей и полюсов



а)

Карта нулей и полюсов



б)

Рис. 9



Четвертый учебный вопрос

2. Понятие о предельных циклах

Виды предельных циклов:

- *предельные циклы низкого уровня*, связанные с квантованием отсчетов обрабатываемого сигнала;
- *предельные циклы высокого уровня*, связанные с переполнениями регистров сумматоров.

Определение:

Предельными циклами низкого уровня называют незатухающие колебания, которые могут возникать в рекурсивных системах при отсутствии (или малом уровне) воздействия и ненулевых начальных условиях.

Появление этих колебаний обусловлено ошибками округления при квантовании сигналов на выходах умножителей.

$$y(n) = 0,8y(n-1) + c \quad ; \quad (-1) = 1$$

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...
$y(n) = 0,8y(n-1)$	0,8	0,64	0,48	0,4	0,32	0,24	0,16	0,16	0,16	...
$y(n) \text{ с округлением}$	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	...

предельный цикл низкого уровня



Четвертый учебный вопрос

37

3. Переполнение в сумматорах и коэффициенты масштабирования

Определение:

Переполнением называют такое состояние сумматора, когда при сложении отсчётов одинаковых знаков, значения которых по абсолютной величине не превышают единицы, сумма оказывается больше единицы.



Четвертый учебный вопрос

38

3. Переполнение в сумматорах и коэффициенты масштабирования

Определение:

Переполнением называют такое состояние сумматора, когда при сложении отсчётов одинаковых знаков, значения которых по абсолютной величине не превышают единицы, сумма оказывается больше единицы.

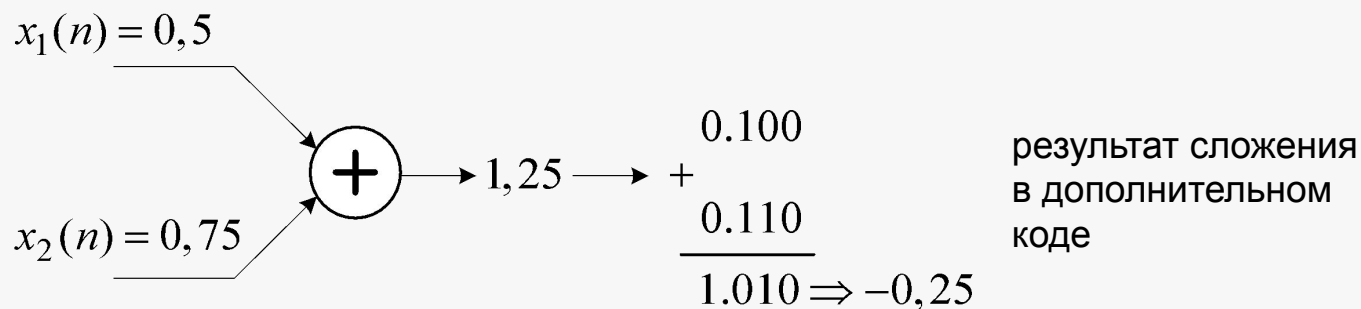


Рис. 10. Эффект переполнения



Четвертый учебный вопрос

3. Переполнение в сумматорах и коэффициенты масштабирования

Определение:

Переполнением называют такое состояние сумматора, когда при сложении отсчётов одинаковых знаков, значения которых по абсолютной величине не превышают единицы, сумма оказывается больше единицы.

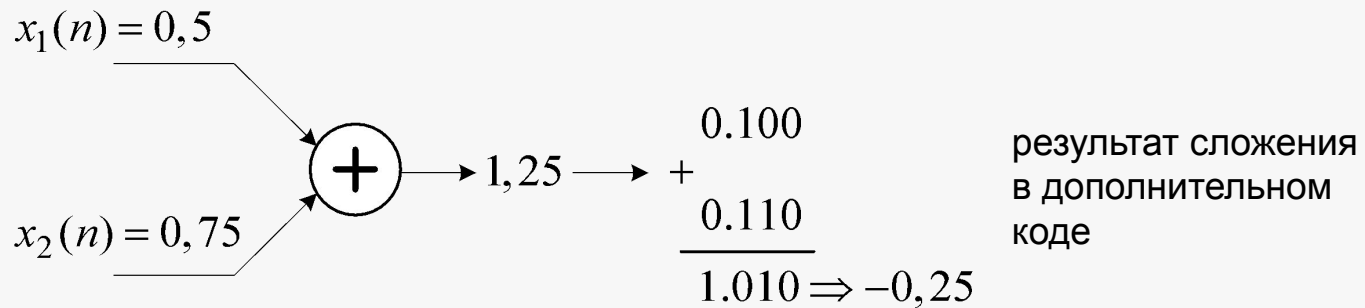


Рис. 10. Эффект переполнения

Масштабирование сигналов: подбирается такая положительная константы $\gamma < 1$, умножение на которую отсчётов обрабатываемой последовательности (сигнала) исключает переполнение сумматора.



Четвертый учебный вопрос

Пример (рис. 11) простейшего масштабирования по количеству звеньев второго порядка

$$\gamma = \frac{1}{2} = 2^{-1}$$

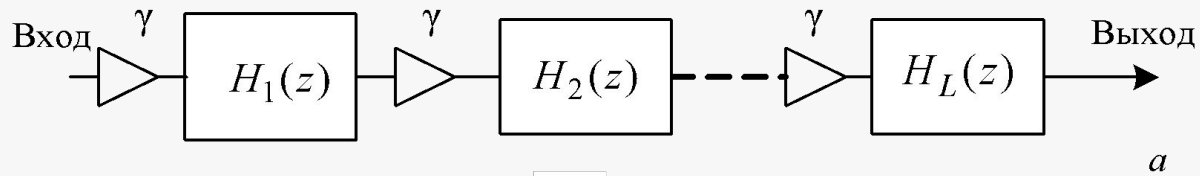
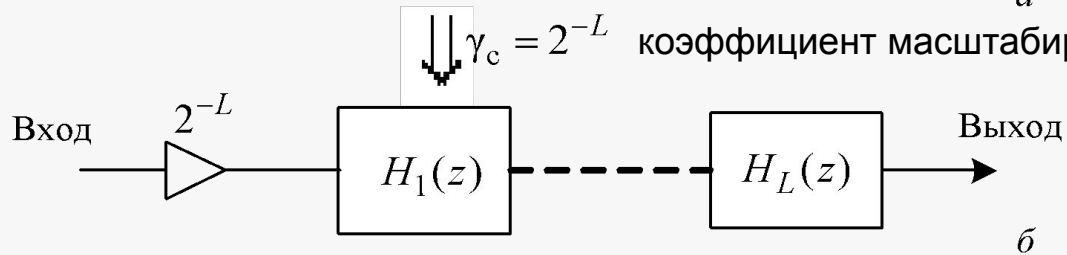


Рис. 11 $\Downarrow \gamma_c = 2^{-L}$ коэффициент масштабирования системы





Заключение

В цифровых системах проблема точности представления параметров системы (коэффициентов передаточных функций и иных констант) и результатов арифметических вычислений является чрезвычайно актуальной. Без учёта эффектов их квантования всегда возможно получить ошибочный результат. По этой причине при реализации того или иного алгоритма в процессорах с фиксированной точкой применяют представление чисел с двойной точностью; если же и это не спасает, то переходят к процессорам с плавающей точкой, что далеко не всегда эффективно.



ЛЕКЦИЯ ЗАВЕРШЕНА!

