

**Методичні матеріали до вивчення модуля 2 ТЕЗ
“Передача інформації в телекомунікаційних системах”**

Укладачі Іващенко П.В.
Дирда В.Ю.

ЗМІСТ

1. Інформаційний лист до вивчення модуля 2	2
2. Індивідуальні завдання до модуля 2	4
3. Довідковий матеріал до виконання індивідуальних завдань	6
3.1. Кодування джерела дискретних повідомлень	6
3.2. Розрахунок цифрової системи передавання аналогових сигналів	7
3.2.1 Розрахунок параметрів АЦП	7
3.2.2 Розрахунок параметрів ЦАП	8

1. Інформаційний лист до вивчення модуля 2

Характеристика модуля: лекції – 16 г., лабораторні заняття – 8 г., індивідуальні завдання – 10 г., самостійна робота – 20 г.

Теми модуля:

Тема 2.1. Інформаційні характеристики джерел дискретних і неперервних повідомлень [1, розд. 8.1–8.4], [2, розд. 6.2, 6.3], [3, розд. 18], [4, ЛР 2.1].

Тема 2.2. Кодування джерел дискретних і неперервних повідомлень [1, розд. 8.5, 11.6], [2, розд. 6.2, 6.3], [4, ЛР 2.10].

Тема 2.3. Інформаційні характеристики каналів електрозв'язку [1, розд. 8.7], [2, розд. 6.2, 6.3], [3, розд. 18], [4, ЛР 2.1].

Тема 2.4. Потенційні можливості передавання інформації каналами електрозв'язку [1, розд. 8.7, 11.6], [2, розд. 6.2, 6.3], [3, розд. 18].

Індивідуальні завдання:

ІЗ 2.1. Кодування дискретного повідомлення. Здача на 4 тижні.

ІЗ 2.2. Кодування неперервного повідомлення. Здача на 7 тижні.

Здача модуля – 09 і 10 тижні 2-го семестру з 25.01 по 06.02.2010 р.

1. Екзамен з модуля проводиться в письмовій формі з наступною співбесідою.
2. У білеті 5 питань – теоретичне, схемне і три задачі за темами модуля, повна відповідь на кожне питання або рішення задачі оцінюється в 20 балів.
3. Модуль вважається зданим за умови одержання не менш 60 балів.

Основна література до модуля 2

1. **Стеклов В.К.**, Беркман Л.Н. Теорія електричного зв'язку: Підручник для студентів ВУЗів. За ред. В.К. Стеклова – К.: Техніка, 2006.

2. **Теорія передачі сигналів:** Учебник для вузов /Д. Д. Кловский и др. – М.: Радио и связь, 1998 (1999). (Є в Інтернеті).

3. **Панфілов І. П.**, Дирда В. Ю., Капацін А.В. Теорія електричного зв'язку: Підручник для студентів ВУЗів 1-го та 2-го рівнів акредитації. – К.: Техніка, 1998.

4. **Методичні** вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Теорія електричного зв'язку”. Частина друга/ Іващенко П.В. та ін. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2004.

5. **Довідковий матеріал** до модуля 2 (наведений нижче).

Перелік екзаменаційних питань з модуля 2

1. Теоретичні, що потребують відповідних викладень

1. Вивести формулу для обчислення ентропії джерела A дискретних незалежних повідомлень і провести її аналіз.
2. Вивести формули для обчислення умовної, спільної й взаємної ентропій двох джерел (A і B) дискретних залежних повідомлень і провести їхній аналіз.
3. Вивести формули для обчислення диференціальної ентропії джерела неперервних повідомлень, якщо густина ймовірності джерела має гауссів, експоненційний або рівномірний розподіл і провести їхній аналіз.
4. Вивести формули для обчислення епсилон-ентропії джерела неперервних повідомлень у загальному випадку й для конкретного розподілу ймовірностей – гауссового, експоненційного або рівномірного розподілу і провести їхній аналіз.
5. Вивести формули для обчислення пропускну здатності каналу зв'язку з АБГШ або ДСК і провести їхній аналіз.
6. Вивести формулу для обчислення пропускну здатності каналу зв'язку з АБГШ, якщо смуга пропускання каналу не обмежена, і провести її аналіз.
7. Показати, що кількість інформації в повідомленні завжди додатна.
8. Показати, що ентропія дискретного джерела невід'ємна величина.
9. Показати, за яких умов ентропія джерела дискретних незалежних повідомлень дорівнює нулю.

10. Показати, за яких умов пропускна здатність ДСК дорівнює нулю й максимальна.

11. Показати, за яких умов пропускна здатність каналу зв'язку з АБГШ дорівнює нулю.

2. Схемні

1. Привести структурні схеми систем електрозв'язку для передавання дискретних повідомлень і неперервних повідомлень цифровими методами.

2. Привести структурні або функціональні схеми АЦП і ЦАП, кодери й декодери для систем передавання з ІКМ, ДІКМ і ДМ. Пояснити принцип роботи цих пристроїв.

3а. Задачі (Блок 1 – Розрахунки інформаційних характеристик джерел дискретних і неперервних повідомлень)

1. Дискретне джерело для видачі повідомлень використовує знаки із заданими ймовірностями. Обчислити кількість інформації в кожному знаку, ентропію, продуктивність і надлишковість джерела (тривалість видачі кожного знака задана).

2. Два джерела повідомлень A і B мають ентропії, біт/пов.: $H(A)$, $H(A/B)$, $H(B)$, $H(B/A)$. Обчислити спільну й взаємну ентропії цих двох джерел.

3. Розрахувати епсилон-ентропію, надлишковість і продуктивність джерела неперервних повідомлень при заданих його ймовірнісних характеристиках.

3б. Задачі

 (Блок 2 – Кодування джерел дискретних і неперервних повідомлень)

1. Знаки від джерела дискретних повідомлень кодуються рівномірним двійковим кодом: довжина коду дорівнює n , тривалість одного знака джерела $T_{\text{зн}} = \tau$ мс. Визначити максимальне число знаків, які можна закодувати цим кодом, тривалість одного символу й швидкість цифрового сигналу (дв.симв./с) на виході кодера.

2. Задано ймовірнісні характеристики джерела дискретних повідомлень, тобто ймовірності знаків. Скласти код для кодування знаків:

- рівномірним двійковим кодом;

- нерівномірним двійковим кодом Шеннона-Фано чи Хаффмена;

Для отриманого коду обчислити середнє число двійкових символів у кодовій комбінації й порівняти його з ентропією джерела.

3. Визначити параметри цифрового сигналу на виході АЦП із рівномірним квантуванням (швидкість цифрового сигналу й відношення сигнал/шум квантування), якщо задані параметри аналогового сигналу – максимальна частота спектра F_{max} , коефіцієнт амплітуди K_A , число рівнів квантування L .

3в. Задачі (Блок 3 – Розрахунки інформаційних характеристик каналів електрозв'язку)

3.1. Обчислити пропускну здатність дискретного симетричного каналу без пам'яті із заданими ймовірністю помилки символу p і швидкістю модуляції B .

3.2. Обчислити пропускну здатність каналу зв'язку з АБГШ, якщо задана смуга пропускання каналу зв'язку, середня потужність сигналу й спектральна густина потужності шуму.

3.3. Визначити, чи можна повідомлення від джерела із заданою продуктивністю передавати з високою якістю каналом зв'язку із заданою пропускною здатністю? Відповідь пояснити.

2. Індивідуальні завдання до модуля 2

Індивідуальне завдання 2.1

на тему “Кодування дискретного повідомлення”

Вихідні дані:

- повідомлення – прізвище й ім'я студента, що виконує завдання;
- таблиця ймовірностей букв у змістовних українських текстах.

Необхідно:

1. Скласти алфавіт з букв, які використовуються для побудови повідомлення.
2. Для букв, які ввійшли до алфавіту, виписати їхні ймовірності з таблиці ймовірностей букв у змістовних українських текстах і виконати нормування цих ймовірностей.
3. Обчислити ентропію заданого повідомлення.
4. Для отриманого алфавіту побудувати код Шеннона-Фано (студентам, у яких непарна остання цифра номера залікової книжки) або код Хаффмена (студентам, у яких парна остання цифра номера залікової книжки).
5. Обчислити середню довжину кодових комбінацій отриманого коду й порівняти її з довжиною кодової комбінації при рівномірному кодуванні.
6. Порівняти числові значення ентропії й середньої довжини кодових комбінацій отриманого коду. У якому співвідношенні вони повинні бути? Чим пояснюється відмінність цих числових значень?
7. Обчислити коефіцієнт стиснення повідомлення отриманим кодом.

Методичні вказівки до виконання завдання 2.1

1. Інформаційні характеристики джерела повідомлень детально описані в [1, розд. 8], [3, розд. 18], [4, ЛР 2.1].
2. Ефективне кодування кодом Шеннона-Фано описане в [1, с. 309], кодом Хаффмена описане в [5].
3. Ймовірності букв у змістовних українських і російських текстах наведені в [4, ЛР 2.1].
4. Для розрахунків ентропії й середньої довжини кодових комбінацій букв ймовірності використаних букв “Прізвища й ім'я” і пробілу між ними повинні бути нормовані так, щоб сума ймовірностей дорівнювала одиниці. Для цього необхідно ймовірності використаних букв поділити на їхню суму.
5. Середня довжина кодових комбінацій обчислюється як математичне сподівання кількості двійкових символів у кодових комбінаціях отриманого нерівномірного коду Шеннона-Фано або Хаффмена.

Індивідуальне завдання 2.2

на тему “Кодування неперервного повідомлення”

Неперервне повідомлення джерела після перетворення в неперервний первинний сигнал $b(t)$ передається каналом зв'язку методом ІКМ із рівномірним квантуванням.

Необхідно:

1. Скласти й описати структурні схеми АЦП і ЦАП.
2. Визначити такі параметри АЦП і ЦАП:
 - частоту дискретизації f_d ;
 - число рівнів квантування L ;
 - довжину двійкового коду n ;
 - швидкість цифрового сигналу на виході АЦП R ;
 - відношення сигнал/шум квантування $\rho_{\text{кв}}$ при розрахованих (обраних) параметрах АЦП;
 - допустиму ймовірність помилки символу (біта) p на вході ЦАП;
 - робочі параметри фільтра, що інтерполює, ЦАП;
 - порядок фільтра Баттерворта, який можна використовувати як інтерполюючий фільтр ЦАП.

Вихідні дані для розрахунків АЦП і ЦАП наведені в табл. 1:

- максимальна частота спектра первинного сигналу F_{\max} ;
- середня потужність первинного сигналу P_b ;
- квадрат коефіцієнта амплітуди первинного сигналу K_A^2 ;
- допустиме відношення сигнал/шум квантування $\rho_{\text{кв.доп}}$;
- відношення сигнал/похибка на виході ЦАП $\rho_{\text{вих}}$ прийняти на 3 дБ меншим за $\rho_{\text{кв.доп}}$.

Таблиця 1 - Вихідні дані до виконання індивідуального завдання 2.2

№ вар	P_b, B^2	K_A^2	$F_{\max}, \text{кГц}$	$\rho_{\text{кв.доп}}, \text{дБ}$	№ вар	P_b, B^2	K_A^2	$F_{\max}, \text{кГц}$	$\rho_{\text{кв.доп}}, \text{дБ}$
01	1,2	8,0	12,0	34	16	1,8	4,5	12,0	39
02	2,5	3,0	2,4	41	17	2,0	4,8	14,0	45
03	0,1	5,0	6,5	45	18	2,2	3,0	14,5	41
04	0,3	5,5	8,0	45	19	2,4	3,5	12,0	42
05	0,5	3,5	2,4	47	20	2,6	3,8	1,5	48
06	0,7	3,0	2,7	43	21	2,8	3,7	3,8	47
07	0,9	4,0	3,5	40	22	0,5	4,5	2,7	39
08	1,2	4,5	1,5	53	23	0,6	4,5	7,4	45
09	1,5	3,5	2,5	42	24	0,7	3,0	5,0	53
10	1,8	4,5	12,0	39	25	0,8	5,5	16,0	38
11	2,0	5,0	3,5	41	26	0,9	5,5	12,5	44
12	2,5	4,5	14,0	45	27	1,2	9,0	0,8	41
13	2,8	6,5	16,0	36	28	1,4	6,5	15,0	42
14	3,0	3,0	8,0	47	29	1,6	7,0	2,8	42
15	0,2	7,ПРО	12,5	42	30	1,8	3,0	10,0	47
Номер виконуваного студентом варіанта вибирається за вказівкою лектора									

Методичні вказівки до виконання завдання 2.2

1. Принцип побудови АЦП і ЦАП описаний у багатьох підручниках по ТЕЗ, наприклад, [3, розд. 17].
2. Методика детальних розрахунків АЦП і ЦАП описана в [5].
3. Похибка на виході ЦАП визначається сумою шуму квантування й шуму, викликаного помилками в цифровому каналі зв'язку. Значення відношення сигнал/похибка на виході ЦАП $\rho_{\text{вих}}$ вибирається на 3 дБ меншим за допустиме відношення сигнал/шум квантування $\rho_{\text{кв.доп}}$.
4. При проведенні розрахунків усі задані в децибелах відношення потужностей необхідно перевести в рази $Z = 10^{0,1Z[\text{дБ}]}$.

При оформленні виконаного завдання (ІЗ 2.1 і ІЗ 2.2) необхідно обов'язково вказувати, з якого літературного джерела взята конкретна інформація для виконання кожного пункту завдання (вказувати номер джерела за списком, номери підрозділів або сторінок).

3. Довідковий матеріал до виконання індивідуальних завдань

3.1. Кодування джерела дискретних повідомлень

Розрахункові формули до кодування джерел дискретних повідомлень наведені в табл.

2.

Таблиця 2 - Розрахункові формули

Но-мер	Назва параметра	Розрахункова формула
1	Кількість кодових комбінацій рівномірного коду M	$M = m^n$
2	Довжина рівномірного двійкового коду n	$n = \log_2 M$
3	Співвідношення між об'ємом алфавіту (кількістю знаків) джерела повідомлень M_A й кількістю можливих кодових комбінацій коду M	$M_A \leq M$
4	Тривалість двійкового символу (біта) T_6	$T_6 = T_{\text{зн}}/n$
5	Середня довжина кодових комбінацій нерівномірного коду \bar{n}	$\bar{n} = \sum_{k=1}^{M_A} P(a_k)n_k$
6	Коефіцієнт стиснення нерівномірного коду η	$\eta = n/\bar{n}$
7	Коефіцієнт ефективності нерівномірного коду μ	$\mu = H(A)/\bar{n}$
<p><i>Пояснення:</i> n_k – довжина k-ої комбінації нерівномірного коду; $P(a_k)$ – імовірність знака a_k; $T_{\text{зн}}$ – час видачі знака джерелом повідомлень; m – основа коду; $H(A)$ – ентропія джерела повідомлень A</p>		

Алгоритм побудови коду Хаффмена

Наочним поданням алгоритму побудови коду Хаффмена є побудова кодового дерева. Кодове дерево складається з вузлів і віток (рис. 1). Воно будується шляхом виконання послідовності наступних процедур.

1. Упорядковують знаки, що кодуються, шляхом розміщення їх у порядку убутання їхніх імовірностей у вигляді стовпця. Знаки утворюють вихідні вузли кодового дерева. Біля кожного вузла записують його ймовірність.

2. Із двох вузлів з найменшими ймовірностями проводять дві вітки, що сходяться в об'єднаному вузлі. Цим двом гілкам приписують символи “1” і “0”, наприклад, верхній гілці – “1”. Визначають імовірність об'єднаного вузла як суму ймовірностей вузлів, з яких вийшли вітки, і записують її біля вузла.

3. Процедури 1 і 2 повторюють із вихідними й об'єднаними вузлами, що залишились, доти, поки не буде отриманий об'єднаний вузол з імовірністю 1 – корінь дерева. Якщо об'єм алфавіту знаків, що кодуються, невеликий, можна не вдаватись до впорядкування знаків, а вибирати зорозво знаки з мінімальними ймовірностями (рис. 1).

4. Кодова комбінація кожного із знаків, що кодуються, утворюється в результаті запису символів “1” і “0” при проходженні по вітках від кореня кодового дерева до відповідного вихідного вузла.

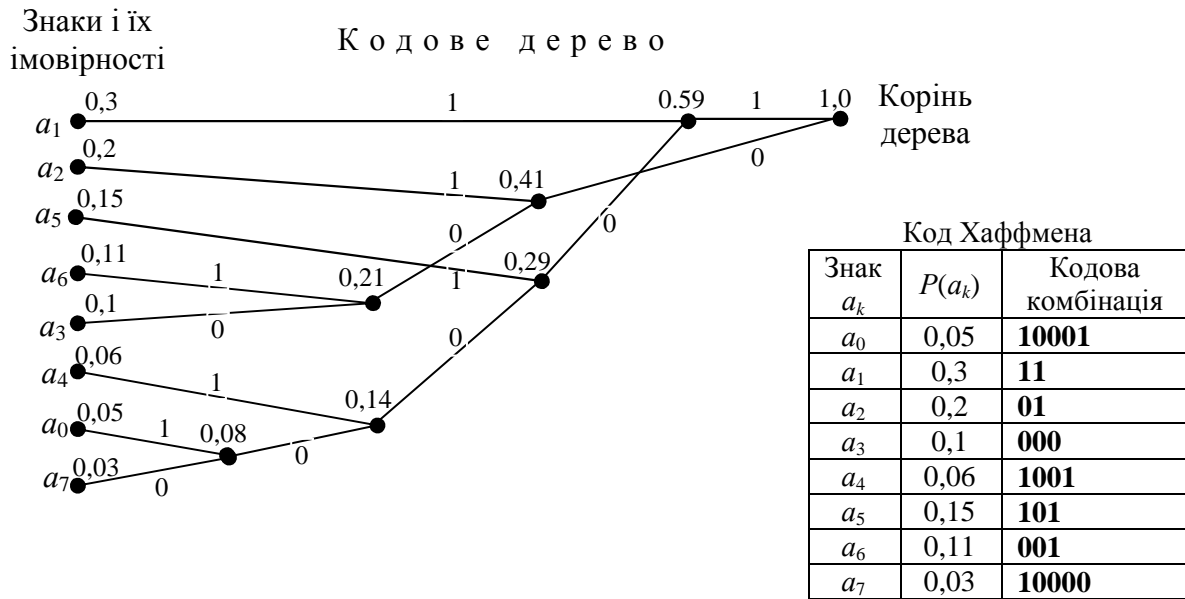


Рисунок 1 – Алгоритм побудови коду Хаффмена

3.2 Розрахунок цифрової системи передавання аналогових сигналів

Опис схем АЦП і ЦАП можна знайти в [1, 2] й інших посібниках. Іноді на рисунках схема АЦП починається із ФНЧ, що називається передфільтром. Його призначення – зменшити максимальну частоту спектра аналогового сигналу, що підлягає перетворенню в цифровий сигнал, з метою зменшення частоти дискретизації й швидкості цифрового сигналу на виході АЦП. Якщо така задача не ставиться, то передфільтр не використовується. Зрозуміло, що передфільтр вносить лінійні спотворення в аналоговий сигнал.

Розрахункові формули наведені в табл. 3.

3.2.1 Розрахунок параметрів АЦП

1. Відповідно до теореми Котельникова частота дискретизації повинна задовольняти умові (1). Частоту дискретизації вибирають з умови $f_d = (2,2-2,4)F_{\max}$, за якої інтерполюючий фільтр відносно простий.

2. За формулою (7) визначається допустиме число рівнів квантування. За формулою (8) вибирається довжина коду. За формулою (9) визначається число рівнів квантування АЦП.

3. Крок квантування визначається за формулами (3) і (4).

4. За розрахованими і вибраними значеннями f_d , L і n визначаються інші параметри АЦП:

- відношення сигнал/шум квантування – формула (6);
- швидкість цифрового сигналу – формули (2), (10) і (11);
- потужність шуму квантування – формула (5).

Таблиця 3 - Розрахункові формули цифрової системи передачі аналогових сигналів

Номер	Назва параметра	Розрахункова формула	Номер формули
1	Частота дискретизації f_d	$f_d \geq 2F_{\max}$	(1)
2	Інтервал дискретизації T_d	$T_d = 1/f_d$	(2)
3	Максимальне значення сигналу b_{\max}	$b_{\max} = \sqrt{P_b K_A^2}$	(3)
4	Крок квантування Δb	$\Delta b = \frac{b_{\max} - b_{\min}}{L - 1} = \frac{2b_{\max}}{L - 1}$	(4)
5	Середня потужність шуму квантування $\overline{e_{\text{КВ}}^2}$	$\overline{e_{\text{КВ}}^2} = (\Delta b)^2 / 12$	(5)
6	Відношення сигнал/шум квантування $\rho_{\text{КВ}}$	$\rho_{\text{КВ}} = 3(L - 1)^2 / K_A^2$	(6)
7	Допустиме число рівнів квантування $L_{\text{доп}}$ для досягнення заданого відношення сигнал/шум квантування $\rho_{\text{КВ, доп}}$	$L_{\text{доп}} \geq \sqrt{K_A^2 \rho_{\text{КВ, доп}} / 3} + 1$	(7)
8	Довжина коду АЦП n	$n \geq \log_2 L_{\text{доп}}$	(8)
9	Число рівнів квантування АЦП L	$L = 2^n$	(9)
10	Тривалість двійкового символу на виході АЦП T_6	$T_6 = T_d / n$	(10)
11	Швидкість цифрового сигналу на виході АЦП R	$R = 1/T_6 = n f_d$	(11)
12	Потужність шуму, викликаного помилками в цифровому каналі зв'язку $\overline{e_{\text{ЦК}}^2}$	$\overline{e_{\text{ЦК}}^2} = p(\Delta b)^2 (4^n - 1) / 3$	(12)
13	Співвідношення між $\overline{e_{\text{КВ}}^2}$ і $\overline{e_{\text{ЦК}}^2}$	$\overline{e_{\text{ЦК}}^2} = \overline{e_{\text{КВ}}^2} (c_{\text{КВ}} / c_{\text{Вих}} - 1)$	(13)
<p>Пояснення: b_{\max} і b_{\min} – максимальне й мінімальне значення сигналу $b(t)$; p – імовірність помилки біта на вході ЦАП (виході цифрового каналу зв'язку); $c_{\text{КВ}} = P_b / \overline{e_{\text{КВ}}^2}$ – відношення сигнал/шум квантування; $c_{\text{Вих}} = P_b / (\overline{e_{\text{КВ}}^2} + \overline{e_{\text{ЦК}}^2})$ – відношення сигнал/шум на виході ЦАП</p>			

3.2.2 Розрахунок параметрів ЦАП

1. За формулою (13) визначається потужність шуму, викликаного помилками в цифровому каналі зв'язку $\overline{e_{\text{ЦК}}^2}$.

2. Потужність шуму, викликаного помилками в цифровому каналі зв'язку, залежить від імовірності помилки біта p на вході ЦАП і визначається формулою (12). Допустима ймовірність помилки біта в цифровому каналі зв'язку

$$p = \frac{3\overline{e_{\text{ЦК}}^2}}{(\Delta b)^2 (4^n - 1)}. \quad (14)$$

3. Вимоги до інтерполюючого ФНЧ ЦАП відповідно до рекомендацій [1]:

- гранична частота смуги пропускання $F_{\text{сп}} = F_{\max}$ з ослабленням 3 дБ;
- гранична частота смуги затримки $F_{\text{сз}} = f_d - F_{\max}$ з ослабленням $A(F_{\text{сз}})$, не меншим 10...20 дБ (слід задатись).

4. У якості інтерполюючого фільтра, як правило, використовується фільтр Баттерворта. Необхідно визначити порядок фільтра n .

5. Нормована АЧХ фільтра Баттерворта описується виразом

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / F_{\text{СП}})^{2n}}}, \quad (15)$$

6. Ослаблення, забезпечуване фільтром Баттерворта на частоті $F_{\text{СЗ}}$,

$$A(F_{\text{СЗ}}) = 20 \lg \frac{1}{H(F_{\text{СЗ}})} = 10 \lg \left(1 + (F_{\text{СЗ}} / F_{\text{СП}})^{2n} \right). \quad (16)$$

7. Необхідний порядок фільтра визначається шляхом рішення рівності (16) відносно n

$$n \geq \frac{\lg(10^{0,1A(F_{\text{СЗ}})} - 1)}{2 \lg(A_{\text{СЗ}} / F_{\text{СП}})}. \quad (17)$$

Знак нерівності з'являється, оскільки n – ціле число.

8. Якщо значення $n \geq 6$, то аналоговий фільтр Баттерворта відносно складний, тому для зменшення порядку фільтра варто застосувати фільтр Чебышева або збільшити частоту дискретизації в АЦП.