

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, Т.Л. ГОНЧАРУК
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛУ ЗАЛЕЖНО ВІД ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ТАЙМЕРНИХ СИГНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

В розрядно-цифровому способі кодування інформація про переданий розряд визначається видом сигналу на одиничному (найквістовому) інтервалі. В таймерних сигнальних конструкціях (ТСК), на відміну від розрядно-цифрового способу кодування, інформацію закладено у тривалостях декількох окремих часових відрізків сигналу на інтервалі конструкції і їх взаємному положенні. З метою зменшення міжсимвольних спотворень, тривалість часових відрізків складає не менше найквістового інтервалу. Часовий відрізок показує частину одиничного елемента і визначається завадами у каналі зв'язку та припустимою ймовірністю помилкового приймання сигнальної конструкції.

В науковій статті проведено дослідження ефективності використання таймерних сигнальних конструкцій для збільшення пропускної здатності каналу зв'язку залежно від завадостійкості та інформаційних параметрів таймерних сигнальних конструкцій.

Ключові слова: таймерна сигнальна конструкція, інформація, завадостійкість, найквістовий елемент, значущі моменти модуляції, число реалізацій таймерних сигнальних конструкцій, пропускна здатність каналу зв'язку.

V. LUZHANSKY, D. MAKARUSHKIN, T. HONCHARUK
Khmelnitskyi National University

INVESTIGATION OF CHANNEL PERFORMANCE DEPENDING ON DIFFICULTY AND INFORMATION PARAMETERS OF TIMER SIGNAL STRUCTURES

In timer signal constructions, the information about the transmitted symbol is not laid down in the values of individual binary digits of the code number, but in the locations of significant modulation moments (ZMM) and in the interval of formation of signal constructions. The reason for the increase in channel bandwidth when using TSK is the importance of creating more signal structures at a given time interval than when using a bit-digital code.

Increasing the bandwidth of the communication channel leads to an increase in the transmission rate of digital information flows at a given communication quality. In the bit-digital encoding method, the information about the transmitted bit is determined by the type of signal on a single (quest) interval. In timer signal constructions (TSCs), in contrast to the bit-digital encoding method, the information is laid down in the durations of several separate time segments of the signal on the design interval and their relative position. In order to reduce inter-character distortion, the duration of time intervals is at least the most quiz interval. The time interval shows the part of a single element and is determined by the interference in the communication channel and the allowable probability of erroneous reception of the signal structure. The reason for the increase in channel bandwidth when using TSC is the importance of creating more signal structures at a given time interval than when using bit-digit code. Increasing the bandwidth of the communication channel leads to an increase in the transmission rate of digital information flows at a given communication quality. In the scientific article the research of efficiency of use of timer signal designs for increase in throughput of the communication channel depending on noise immunity and information parameters of timer signal designs is carried out.

Keywords: timer signal construction, information, noise immunity, quest element, significant modulation moments, number of realizations of timer signal constructions, communication channel bandwidth.

Вступ

У таймерних сигнальних конструкціях інформація про переданий символ закладена не в значеннях окремих двійкових цифр кодового числа, а в місцях знаходження значущих моментів модуляції (ЗММ) і на інтервалі формування сигнальних конструкцій. Причина збільшення пропускної здатності каналу при використанні ТСК – важливість створення на заданому часовому інтервалі більше сигнальних конструкцій, ніж при використанні розрядно-цифрового коду.

Збільшення пропускної здатності каналу зв'язку призводить до зростання швидкості передачі цифрових потоків інформації при заданій якості зв'язку.

Метою наукової статті є оцінка ефективності використання таймерних сигнальних конструкцій для збільшення пропускної здатності каналу зв'язку.

Результати дослідження

Потужність реалізованого ансамблю N_{PT} на інтервалі $T_{СК} = m \cdot t_0$ визначається наступним виразом:

$$N_{PT} = \frac{(ms - i(s-1))!}{i!(ms - is)!}, \quad (1)$$

де i – число заданих відрізків сигналу на інтервалі кодового слова довжиною m найквістових елементів;

Δ – частина елемента t_0 ($\Delta = t_0/s$), $s \in (2; 3; \dots; s_0)$ – цілі числа, яка забезпечує розпізнавальну здатність тривалостей окремих відрізків із заданою ймовірністю помилки на виході каналу зв'язку.

Наприклад, для $m = 7$ і $s = 6$ при синтезі сигнальної конструкції з п'яти інформаційних відрізків ($i = 5$):

$$N_{PT} = \frac{17!}{5! \cdot 12!} = 6188.$$

У таблицях 1–8 наведено число реалізацій ТСК, які розраховані при різних значеннях m ($m \in 2 \div 15$) для $i=1;2;3;4;5;6;7;8$; $s \in 2 \div 20$ (рис. 1).

Із таблиць 1–8 випливає:

- 1) число реалізацій ТСК N_{PT} зростає зі збільшенням параметрів m і s ;
- 2) при $i = m$ можлива тільки одна реалізація ($N_{PT} = 1$);
- 3) при $i < m$ число реалізацій $N_{PT} = 0$.

На основі таблиці 2 надано залежності тривалості сигнальних конструкцій за заданої потужності кодових множин і параметра s .

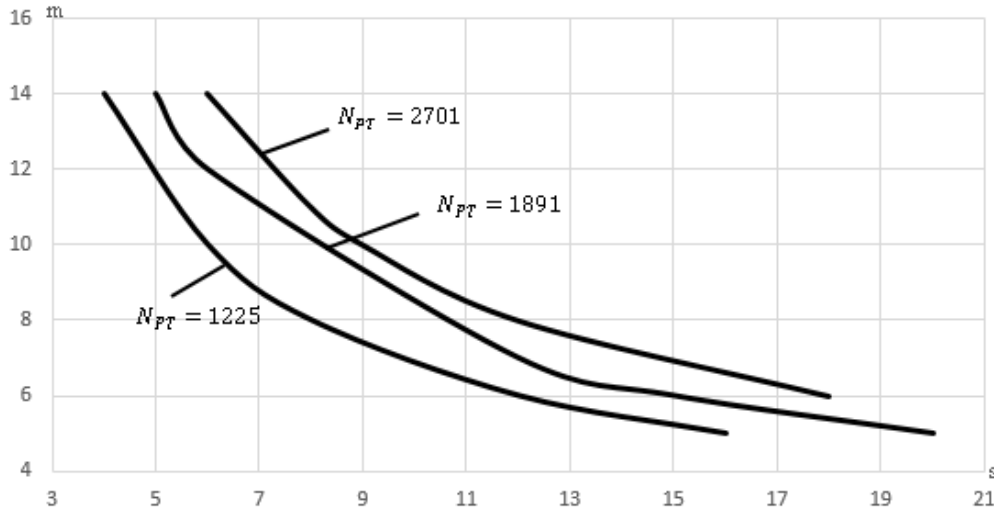


Рис. 1. Залежності $m = f(s)$ при $N = \text{const}$

Далі, на основі даних взятих з таблиці 5, було проведено дослідження залежності пропускної здатності каналів з різним рівнем флуктуаційних шумів за наступними формулами:

- значення пропускної здатності каналу зв'язку:

$$C_m = \frac{1}{m} \cdot (\log_2 N_{PT} - H_{BT}), \tag{2}$$

де H_{BT} – визначає втрати в каналі через невизначеність у прийманні кодової сигнальної конструкції.

Таблиця 1

Число реалізацій ТСК при $m \in 2 \div 15$ для $i=1$; $s = 2 \div 20$

| i | S | m | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----|-----|----------|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------|-------|
| | | 2^m | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | 512 | 1024 | 2048 | 4096 | 8192 | 16384 | 32768 |
| 1 | 2 | N_{PT} | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 |
| | 3 | N_{PT} | 4 | 7 | 10 | 13 | 16 | 19 | 22 | 25 | 28 | 31 | 34 | 37 | 40 | 43 |
| | 4 | N_{PT} | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 | 25 | 29 | 33 | 37 | 41 | 45 | 49 | 53 | 57 |
| | 5 | N_{PT} | 6 | 11 | 16 | 21 | 26 | 31 | 36 | 41 | 46 | 51 | 56 | 61 | 66 | 71 |
| | 6 | N_{PT} | 7 | 13 | 19 | 25 | 31 | 37 | 43 | 49 | 55 | 61 | 67 | 73 | 79 | 85 |
| | 7 | N_{PT} | 8 | 15 | 22 | 29 | 36 | 43 | 50 | 57 | 64 | 71 | 78 | 85 | 92 | 99 |
| | 8 | N_{PT} | 9 | 17 | 25 | 33 | 41 | 49 | 57 | 65 | 73 | 81 | 89 | 97 | 105 | 113 |
| | 9 | N_{PT} | 10 | 19 | 28 | 37 | 46 | 55 | 64 | 73 | 82 | 91 | 100 | 109 | 118 | 127 |
| | 10 | N_{PT} | 11 | 21 | 31 | 41 | 51 | 61 | 71 | 81 | 91 | 101 | 111 | 121 | 131 | 141 |
| | 11 | N_{PT} | 12 | 23 | 34 | 45 | 56 | 67 | 78 | 89 | 100 | 111 | 122 | 133 | 144 | 155 |
| | 12 | N_{PT} | 13 | 25 | 37 | 49 | 61 | 73 | 85 | 97 | 109 | 121 | 133 | 145 | 157 | 169 |
| | 13 | N_{PT} | 14 | 27 | 40 | 53 | 66 | 79 | 92 | 105 | 118 | 131 | 144 | 157 | 170 | 183 |
| | 14 | N_{PT} | 15 | 29 | 43 | 57 | 71 | 85 | 99 | 113 | 127 | 141 | 155 | 169 | 183 | 197 |
| | 15 | N_{PT} | 16 | 31 | 46 | 61 | 76 | 91 | 106 | 121 | 136 | 151 | 166 | 181 | 196 | 211 |
| | 16 | N_{PT} | 17 | 33 | 49 | 65 | 81 | 97 | 113 | 129 | 145 | 161 | 177 | 193 | 209 | 225 |
| | 17 | N_{PT} | 18 | 35 | 52 | 69 | 86 | 103 | 120 | 137 | 154 | 171 | 188 | 205 | 222 | 239 |
| | 18 | N_{PT} | 19 | 37 | 55 | 73 | 91 | 109 | 127 | 145 | 163 | 181 | 199 | 217 | 235 | 253 |
| | 19 | N_{PT} | 20 | 39 | 58 | 77 | 96 | 115 | 134 | 153 | 172 | 191 | 210 | 229 | 248 | 267 |
| | 20 | N_{PT} | 21 | 41 | 61 | 81 | 101 | 121 | 141 | 161 | 181 | 201 | 221 | 241 | 261 | 281 |

Таблиця 8

Число реалізацій ТСК при $m \in 2 \div 15$ для $i=8i = 1; s = 2 \div 20$

| i | S | m | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|----|----------|-------|---|---|----|----|----|-----|---------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | 2^m | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | 512 | 1024 | 2048 | 4096 | 8192 | 16384 |
| 8 | 2 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 45 | 495 | 3003 | 12870 | 43758 | 125970 | 319770 |
| | 3 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 165 | 3003 | 24310 | 125970 | 490314 | 1562275 | 4292145 |
| | 4 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 495 | 12870 | 125970 | 735471 | 3108105 | 10518300 | 30260340 |
| | 5 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1287 | 43758 | 490314 | 3108104 | 13884156 | 48903492 | $1,45 \cdot 10^8$ |
| | 6 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3003 | 125970 | 1562275 | 10518300 | 48903492 | $1,77 \cdot 10^8$ | $5,37 \cdot 10^8$ |
| | 7 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 6435 | 319770 | 4292145 | 30260340 | $1,45 \cdot 10^8$ | $5,37 \cdot 10^8$ | $1,65 \cdot 10^9$ |
| | 8 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 12870 | 735471 | 10518300 | 76904685 | $3,77 \cdot 10^8$ | $1,42 \cdot 10^9$ | $4,43 \cdot 10^9$ |
| | 9 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 24310 | 1562275 | 23535820 | $1,77 \cdot 10^8$ | $8,86 \cdot 10^8$ | $3,38 \cdot 10^9$ | $1,06 \cdot 10^{10}$ |
| | 10 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 43758 | 3108105 | 48903492 | $3,77 \cdot 10^8$ | $1,92 \cdot 10^9$ | $7,39 \cdot 10^9$ | $2,34 \cdot 10^{10}$ |
| | 11 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 75582 | 5852925 | 95548245 | $7,53 \cdot 10^8$ | $3,87 \cdot 10^9$ | $1,51 \cdot 10^{10}$ | $4,81 \cdot 10^{10}$ |
| | 12 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 125970 | 10518300 | $1,77 \cdot 10^8$ | $1,42 \cdot 10^9$ | $7,39 \cdot 10^9$ | $2,9 \cdot 10^{10}$ | $9,31 \cdot 10^{10}$ |
| | 13 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 203490 | 18156204 | $3,14 \cdot 10^8$ | $2,56 \cdot 10^9$ | $1,34 \cdot 10^{10}$ | $5,31 \cdot 10^{10}$ | $1,71 \cdot 10^{11}$ |
| | 14 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 319770 | 30260340 | $5,37 \cdot 10^8$ | $4,43 \cdot 10^9$ | $2,34 \cdot 10^{10}$ | $9,31 \cdot 10^{10}$ | $3,02 \cdot 10^{11}$ |
| | 15 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 490314 | 48903492 | $8,86 \cdot 10^8$ | $7,39 \cdot 10^9$ | $3,94 \cdot 10^{10}$ | $1,57 \cdot 10^{11}$ | $5,12 \cdot 10^{11}$ |
| | 16 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 735471 | 76904685 | $1,42 \cdot 10^9$ | $1,2 \cdot 10^{10}$ | $6,43 \cdot 10^{10}$ | $2,58 \cdot 10^{11}$ | $8,4 \cdot 10^{11}$ |
| | 17 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1081575 | $1,18 \cdot 10^8$ | $2,22 \cdot 10^9$ | $1,89 \cdot 10^{10}$ | $1,02 \cdot 10^{11}$ | $4,1 \cdot 10^{11}$ | $1,34 \cdot 10^{12}$ |
| | 18 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1562275 | $1,77 \cdot 10^8$ | $3,38 \cdot 10^9$ | $2,9 \cdot 10^{10}$ | $1,57 \cdot 10^{11}$ | $6,35 \cdot 10^{11}$ | $2,08 \cdot 10^{12}$ |
| | 19 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2220075 | $2,61 \cdot 10^8$ | $5,05 \cdot 10^9$ | $4,36 \cdot 10^{10}$ | $2,38 \cdot 10^{11}$ | $9,63 \cdot 10^{11}$ | $3,17 \cdot 10^{12}$ |
| | 20 | N_{PT} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3108105 | $3,77 \cdot 10^8$ | $7,39 \cdot 10^9$ | $6,43 \cdot 10^{10}$ | $3,52 \cdot 10^{11}$ | $1,43 \cdot 10^{12}$ | $4,71 \cdot 10^{12}$ |

$$H_{BT} = - \left[P_B \cdot \log_2 P_B + (1 - P_B) \cdot \log_2 \frac{1 - P_B}{N_{PT} - 1} \right], \tag{3}$$

де P_B – ймовірність вірного приймання сигнальної конструкції з i – переходами:

$$P_B = \left[2\Phi \left(\frac{\Delta_{OPT}}{2 \cdot \sigma_K} \right) \right]^i, \tag{4}$$

де $\Delta_{OPT} = (3,8...5,5)$; $\Phi(x)$ – інтеграл імовірностей:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^x \frac{e^{-z^2}}{2} dz. \tag{5}$$

Середнє число моментів модуляції дорівнює:

$$\bar{i} = \sum_{i=1}^m P[N_P(i)] \cdot i, \tag{6}$$

$$P[N_P(i)] = \frac{N_P}{N_{P\Sigma}}$$

Середньоквадратичне відхилення зміщення фронту сигналу на виході каналу:

$$\sigma_K = \frac{4}{h}, \tag{7}$$

де h – відношення сигнал/завада, $h = U_c/U_z$.

Граничне значення пропускної здатності каналу зв'язку буде визначатися виразом:

$$C_{max} = \frac{\log_2 N_{P\Sigma}}{T_{СК}}, \tag{8}$$

де $N_{P\Sigma}$ – загальна кількість реалізацій, які використовуються з урахуванням кількості значущих моментів модуляції (i);

$T_{СК}$ – часовий інтервал сигнальної конструкції в числі найквістових елементів:

$$T_{СК} = m \cdot t_0, \tag{9}$$

де $t_0 = 0,9575c$.

Результати досліджень подані в таблицях 9 та 10.

Таблиця 9

Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів s , m та $h = 8$

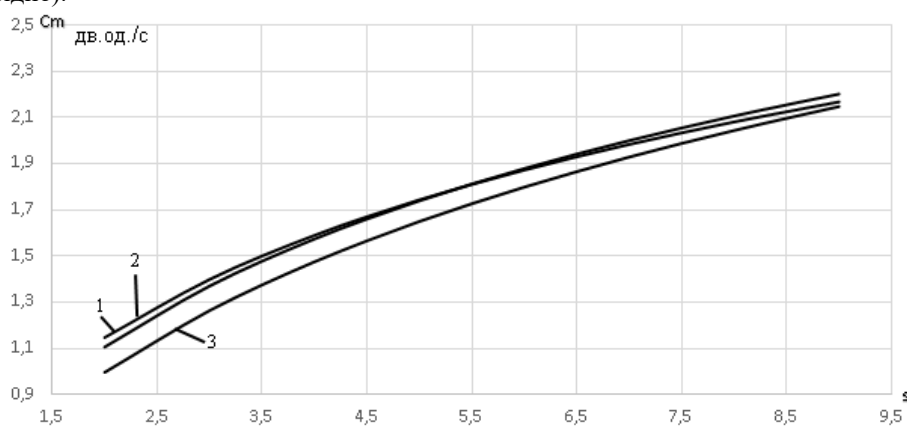
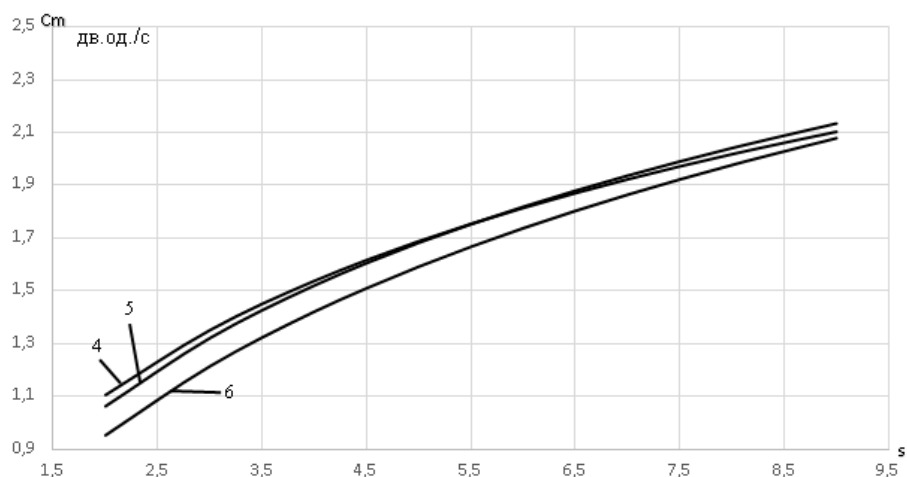
| S | m | | | N_{BT} | | | C_m | | | |
|-----|-------|--------|--------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| | 7 | 8 | 9 | | | | | | | |
| 2 | 126 | 462 | 1287 | 0,000722 | 0,00078 | 0,000825 | 0,9966512 | 1,106371 | 1,147663 | |
| 3 | 462 | 2002 | 6188 | 0,00078 | 0,000845 | 0,000895 | 1,2644242 | 1,370798 | 1,399374 | |
| 4 | 1287 | 6188 | 20349 | 0,000825 | 0,000895 | 0,000948 | 1,4755673 | 1,574295 | 1,590191 | |
| 5 | 3003 | 15504 | 53130 | 0,000863 | 0,000936 | 0,000991 | 1,6501894 | 1,739927 | 1,744028 | |
| 6 | 6188 | 33649 | 118755 | 0,000895 | 0,000971 | 0,001027 | 1,7991946 | 1,879663 | 1,872956 | |
| 7 | 11628 | 65780 | 237336 | 0,000923 | 0,001001 | 0,001058 | 1,9291988 | 2,000545 | 1,983946 | |
| 8 | 20349 | 118755 | 435897 | 0,000948 | 0,001027 | 0,001085 | 2,0445317 | 2,107075 | 2,081394 | |
| 9 | 33649 | 201376 | 749398 | 0,000971 | 0,00105 | 0,001109 | 2,1481865 | 2,20231 | 2,168252 | |
| | | | | | | | C_{max} | 2,4173169 | 2,38246 | 2,311689 |

Таблиця 10

Значення пропускної здатності каналу в залежності від інформаційних параметрів s , m та $h = 5$

| S | m | | | N_{BT} | | | C_m | | | |
|-----|-------|--------|--------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| | 7 | 8 | 9 | | | | | | | |
| 2 | 126 | 462 | 1287 | 0,309447 | 0,351426 | 0,384424 | 0,9525476 | 1,06254 | 1,105041 | |
| 3 | 462 | 2002 | 6188 | 0,351426 | 0,398645 | 0,434953 | 1,2143319 | 1,321073 | 1,351145 | |
| 4 | 1287 | 6188 | 20349 | 0,384424 | 0,434953 | 0,473247 | 1,4207675 | 1,520038 | 1,537714 | |
| 5 | 3003 | 15504 | 53130 | 0,411692 | 0,4645 | 0,504118 | 1,5914995 | 1,681982 | 1,688125 | |
| 6 | 6188 | 33649 | 118755 | 0,434953 | 0,489426 | 0,52999 | 1,7371863 | 1,818606 | 1,814182 | |
| 7 | 11628 | 65780 | 237336 | 0,455246 | 0,510988 | 0,552262 | 1,8642956 | 1,936797 | 1,922701 | |
| 8 | 20349 | 118755 | 435897 | 0,473247 | 0,52999 | 0,571816 | 1,9770604 | 2,040955 | 2,017979 | |
| 9 | 33649 | 201376 | 749398 | 0,489426 | 0,546977 | 0,589245 | 2,0784072 | 2,134069 | 2,102903 | |
| | | | | | | | C_{max} | 2,4173169 | 2,38246 | 2,311689 |

На рис. 2 та рис. 3 наведено залежності пропускної здатності каналів з різним рівнем флукуаційних шумів як функцій s з даних таблиць 9 та 10 (криві 1...3 для $h = 8$ і $m = 9,8,7$ відповідно, криві 4...6 для $h = 5$ і $m = 9,8,7$ відповідно).

Рис. 2. Залежності пропускної здатності каналу $C_i = f(s)$ при $h = 8$, $m = 9,8,7$ Рис. 3. Залежності пропускної здатності каналу $C_i = f(s)$ при $h = 5$, $m = 9,8,7$

Висновки

З наведеної вище інформації слід зробити висновок, що у двійковому каналі на m -елементному інтервалі часу, за рахунок значення $\Delta(s)$ можливо отримати одне й те саме число реалізацій таймерних сигнальних конструкцій на різних інтервалах часу $T_{ск}$ (рис. 1).

1. При збільшенні S з 2 до 9 зростає число реалізацій ТСК та пропускна здатність каналу. При $s = 2$ та збільшенні m з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 15,2%. При $s = 9$ та збільшенні m з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 0,93% (відношення сигнал/завада $h = 8$).

2. При збільшенні S з 2 до 9 зростає число реалізацій ТСК та пропускна здатність каналу. При $s = 2$ та збільшенні m з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 16%. При $s = 9$ та збільшенні m з 7 до 9 пропускна здатність каналу зростає на 0,2% (відношення сигнал/завада $h = 5$).

3. Максимальна пропускна здатність каналу зв'язку ($C_{max}=2,417$ дв.од./с) досягається за умови, що $t_0=0,9575с$, $m=7$, $N_{p\Sigma}=992687$.

Література

1. Захарченко М.В. Системи передавання даних. Т. 1: Завадостійке 3-38 кодування : підручник [для студентів вищих технічних навчальних закладів] / М.В. Захарченко. – Одеса : Фенікс, 2009. – 448 с.

2. Захарченко М.В. Системи передавання даних. Т. 1: Ефективність блокового кодування / [Захарченко М.В., Кільдішев В.Й., Мартинова О.М., Ільїн Д.Ю., Трінтіна Н.А.]. – Одеса : ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014. – 488 с.

3. Захарченко Н.В. Информационные параметры позиционных и таймерных кодов. Том 1. Информационные параметры позиционных кодов : учеб. пособ. / [Н.В. Захарченко, С.М. Горохов, А.В. Кочетков]. – Одесса : ОНАС им. А.С. Попова, 2018. – 212 с.

References

1. Zakharchenko M.V. Systemy peredavannia danykh. T. 1: Zavadostiike Z-38 koduvannia : pidruchnyk [dlia studentiv vyshcheykh tekhnichnykh navchalnykh zakladiv] / M.V. Zakharchenko. – Odesa : Feniks, 2009. – 448 s.

2. Zakharchenko M.V. Systemy peredavannia danykh. T. 1: Efektyvnist blokovooho koduvannia / [Zakharchenko M.V., Kildishev V.I., Martynova O.M., Ilin D.Iu., Trintina N.A.]. – Odesa : ONAZ im. O.S. Popova, 2014. – 488 s.

3. Zaharchenko N.V. Informacionnye parametry pozicionnyh i tajmernih kodov. Tom 1. Informacionnye parametry pozicionnyh kodov : ucheb. posob. / [N.V. Zaharchenko, S.M. Gorohov, A.V. Kochetkov]. – Odessa : ONAS im. A.S. Popova, 2018. – 212 s.

Надійшла / Paper received : 07.10.2020 Надрукована/Printed : 27.11.2020