

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.I. LUZHANSKY, D.A. MAKARUSHKIN, T.L. HONCHARUK  
Khmelnyskyi National University

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

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 разрядно-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;

$\Delta$  – 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  $s$ .

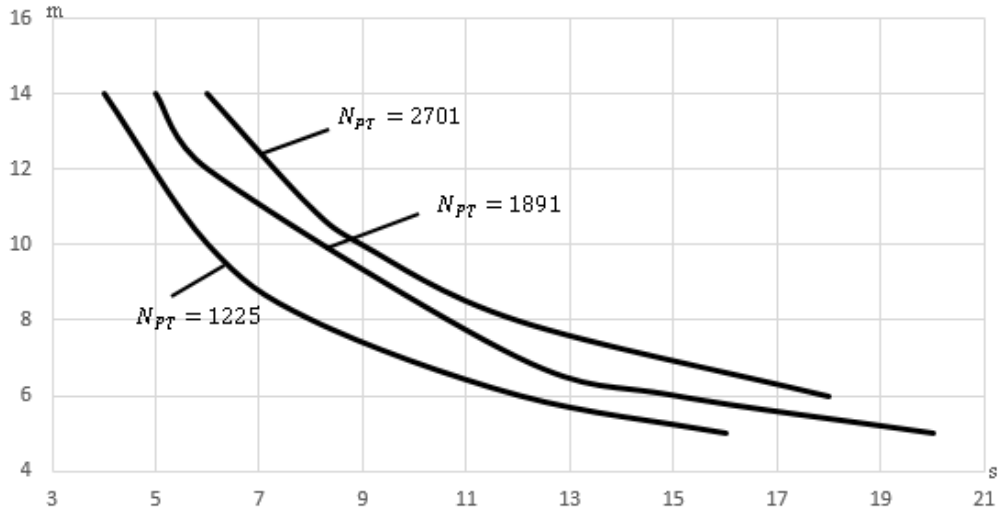


Рис. 1. Залежності  $m = f(s)$  при  $N = \text{const}$

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
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 2

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

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
2	2	$N_{PT}$	1	6	15	28	45	66	91	120	153	190	231	276	325	378
	3	$N_{PT}$	1	10	28	55	91	136	190	253	325	406	496	595	703	820
	4	$N_{PT}$	1	15	45	91	153	231	325	435	561	703	861	1035	1225	1431
	5	$N_{PT}$	1	21	66	136	231	351	496	666	861	1081	1326	1596	1891	2211
	6	$N_{PT}$	1	28	91	190	325	496	703	946	1225	1540	1891	2278	2701	3160
	7	$N_{PT}$	1	36	120	253	435	666	946	1275	1653	2080	2556	3081	3655	4278
	8	$N_{PT}$	1	45	153	325	561	861	1225	1653	2145	2701	3321	4005	4753	5565
	9	$N_{PT}$	1	55	190	406	703	1081	1540	2080	2701	3403	4186	5050	5995	7021
	10	$N_{PT}$	1	66	231	496	861	1326	1891	2556	3321	4186	5151	6216	7381	8646
	11	$N_{PT}$	1	78	276	595	1035	1596	2278	3081	4005	5050	6216	7503	8911	10440
	12	$N_{PT}$	1	91	325	703	1225	1891	2701	3655	4753	5995	7381	8911	10585	12403
	13	$N_{PT}$	1	105	378	820	1431	2211	3160	4278	5565	7021	8646	10440	12403	14553
	14	$N_{PT}$	1	120	435	946	1653	2556	3655	4950	6441	8128	10011	12090	14365	16868
	15	$N_{PT}$	1	136	496	1081	1891	2926	4186	5671	7381	9316	11476	13861	16700	19230
	16	$N_{PT}$	1	153	561	1225	2145	3321	4753	6441	8385	10585	13041	15732	18865	21991
	17	$N_{PT}$	1	171	630	1378	2415	3741	5356	7260	9453	11935	14669	17832	21212	24801
	18	$N_{PT}$	1	190	703	1540	2701	4186	5995	8128	10585	13366	16700	19898	23700	27876
	19	$N_{PT}$	1	210	780	1711	3003	4656	6670	9045	11781	14800	18336	22123	26394	30861
	20	$N_{PT}$	1	231	861	1891	3321	5151	7381	10011	13041	16471	20304	24561	29187	34203

Таблиця 3

Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=3i = 1; s = 2 \div 20$

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
3	2	$N_{PT}$	0	1	10	35	84	165	286	455	680	969	1330	1771	2300	2925
	3	$N_{PT}$	0	1	20	84	220	455	816	1330	2024	2925	4060	5456	7140	9139
	4	$N_{PT}$	0	1	35	165	455	969	1771	2925	4495	6545	9139	12341	16215	20825
	5	$N_{PT}$	0	1	56	286	816	1771	3276	5456	8436	12341	17296	23426	30856	39711
	6	$N_{PT}$	0	1	84	455	1330	2925	5456	9139	14190	20825	29260	39711	52394	67525
	7	$N_{PT}$	0	1	120	680	2024	4495	8436	14190	22100	32509	45760	62196	82160	105995
	8	$N_{PT}$	0	1	165	969	2925	6545	12341	20825	32509	47905	67525	91881	121485	156849
	9	$N_{PT}$	0	1	220	1330	4060	9139	17296	29260	45760	67525	95284	129766	171700	221815
	10	$N_{PT}$	0	1	286	1771	5456	12341	23426	39711	62196	91881	129766	176851	234136	302621
	11	$N_{PT}$	0	1	364	2300	7140	16215	30856	52394	82160	121485	171700	234136	310124	400995
	12	$N_{PT}$	0	1	455	2925	9139	20825	39711	67525	105995	156849	221815	302621	400995	518665
	13	$N_{PT}$	0	1	560	3654	11480	26235	50116	85320	134044	198485	280840	383306	508080	657359
	14	$N_{PT}$	0	1	680	4495	14190	32509	62196	105995	166650	246905	349504	477191	632710	820105
	15	$N_{PT}$	0	1	816	5456	17296	39711	76076	129766	204156	302621	428536	585276	776216	1003316
	16	$N_{PT}$	0	1	969	6545	20825	47905	91881	156849	246905	366145	518665	708561	934343	1212546
	17	$N_{PT}$	0	1	1140	7770	24804	57155	109736	187460	295240	437989	620620	847107	1128205	1464646
	18	$N_{PT}$	0	1	1330	9139	29260	67525	129766	221815	349504	518665	735130	1003316	1329966	1733333
	19	$N_{PT}$	0	1	1540	10660	34220	79079	152096	260130	410040	608685	862903	1179407	1564153	2029478
	20	$N_{PT}$	0	1	1771	12341	39711	91881	176851	302621	477191	708561	1003316	1374788	1827485	2358722

Таблиця 4

Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=4i = 1; s = 2 \div 20$

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
4	2	$N_{PT}$	0	0	1	15	70	210	495	1001	1820	3060	4845	7315	10626	14950
	3	$N_{PT}$	0	0	1	35	210	715	1820	3876	7315	12650	20475	31465	46376	66045
	4	$N_{PT}$	0	0	1	70	495	1820	4845	10626	20475	35960	58905	91390	135751	194580
	5	$N_{PT}$	0	0	1	126	1001	3876	10626	23751	46376	82251	135751	211876	316251	455126
	6	$N_{PT}$	0	0	1	210	1820	7315	20475	46376	91390	163185	270725	424270	635376	916895
	7	$N_{PT}$	0	0	1	330	3060	12650	35960	82251	163185	292825	487635	766480	1150626	1663740
	8	$N_{PT}$	0	0	1	495	4845	20475	58905	135751	270725	487635	814385	1282975	1929501	2794155
	9	$N_{PT}$	0	0	1	715	7315	31465	91390	211876	424270	766480	1282975	2024785	3049501	4421275
	10	$N_{PT}$	0	0	1	1001	10626	46376	135751	316251	635376	1150626	1929501	3049501	4598126	6672876
	11	$N_{PT}$	0	0	1	1365	14950	66045	194580	455126	916895	1663740	2794155	4421275	6672876	9691375
	12	$N_{PT}$	0	0	1	1820	20475	91390	270725	635376	1282975	2331890	3921225	6210820	9381251	13633830
	13	$N_{PT}$	0	0	1	2380	27405	123410	367290	864501	1749060	3183545	5359095	8495410	12840751	18671940
	14	$N_{PT}$	0	0	1	3060	35960	163185	487635	1150626	2331890	4249575	7160245	11358880	17178876	24992045
	15	$N_{PT}$	0	0	1	3876	46376	211876	635376	1502501	3049501	5563251	9381251	14891626	22533126	32795126
	16	$N_{PT}$	0	0	1	4845	58905	270725	814385	1929501	3921225	7160245	12082785	19190605	29051001	42297979
	17	$N_{PT}$	0	0	1	5985	73815	341055	1028790	2441626	4967690	9078630	15329615	24359335	36845730	53904428
	18	$N_{PT}$	0	0	1	7315	91390	424270	1282975	3049501	6210820	11358880	19190605	30507895	46227197	67340067
	19	$N_{PT}$	0	0	1	8855	111930	521855	1581580	3764376	7673835	14043870	23738715	37634408	57248622	83498677
	20	$N_{PT}$	0	0	1	10626	135751	635376	1929501	4598126	9381251	17178876	29051001	46227197	69796954	1,02 · 10 <sup>8</sup>

Таблиця 5

Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=5i = 1; s = 2 \div 20$ 

$i$	$S$	$m$														
			$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384
5	2	$N_{PT}$	0	0	0	1	21	126	462	1287	3003	6188	11628	20349	33649	53130
	3	$N_{PT}$	0	0	0	1	56	462	2002	6188	15504	33649	65780	118755	201376	324632
	4	$N_{PT}$	0	0	0	1	126	1287	6188	20349	53130	118755	237336	435897	749398	1221759
	5	$N_{PT}$	0	0	0	1	252	3003	15504	53130	142506	324632	658008	1221759	2118760	3478761
	6	$N_{PT}$	0	0	0	1	462	6188	33649	118755	324632	749398	1533939	2869685	5006386	8259888
	7	$N_{PT}$	0	0	0	1	792	11628	65780	237336	658008	1533939	3162510	5949147	10424128	17259390
	8	$N_{PT}$	0	0	0	1	1287	20349	118755	435897	1221759	2869685	5949147	11238513	19757815	32801517
	9	$N_{PT}$	0	0	0	1	2002	33649	201376	749398	2118760	5006386	10424128	19757815	34826302	57940519
	10	$N_{PT}$	0	0	0	1	3003	53130	324632	1221759	3478761	8259888	17259390	32801517	57940519	96560646
	11	$N_{PT}$	0	0	0	1	4368	80730	501942	1906884	5461512	13019909	27285336	51971283	91962520	1,53 · 10 <sup>8</sup>
	12	$N_{PT}$	0	0	0	1	6188	118755	749398	2869685	8259888	19757815	41507642	79208745	1,4 · 10 <sup>8</sup>	2,35 · 10 <sup>8</sup>
	13	$N_{PT}$	0	0	0	1	8568	169911	1086008	4187106	12103014	29034396	61124064	1,17 · 10 <sup>8</sup>	2,07 · 10 <sup>8</sup>	3,47 · 10 <sup>8</sup>
	14	$N_{PT}$	0	0	0	1	11628	237336	1533939	5949147	17259390	41507642	87541245	1,68 · 10 <sup>8</sup>	2,98 · 10 <sup>8</sup>	4,98 · 10 <sup>8</sup>
	15	$N_{PT}$	0	0	0	1	15504	324632	2118760	8259888	24040016	57940519	1,22 · 10 <sup>8</sup>	2,35 · 10 <sup>8</sup>	4,17 · 10 <sup>8</sup>	6,99 · 10 <sup>8</sup>
	16	$N_{PT}$	0	0	0	1	20349	435897	2869685	11238513	32801517	79208745	1,68 · 10 <sup>8</sup>	3,21 · 10 <sup>8</sup>	5,72 · 10 <sup>8</sup>	9,59 · 10 <sup>8</sup>
	17	$N_{PT}$	0	0	0	1	26334	575757	3819816	15200324	43949268	1,06 · 10 <sup>8</sup>	2,25 · 10 <sup>8</sup>	4,32 · 10 <sup>8</sup>	7,7 · 10 <sup>8</sup>	1,28 · 10 <sup>8</sup>
	18	$N_{PT}$	0	0	0	1	33649	749398	5006386	19757815	57940519	1,4 · 10 <sup>8</sup>	2,98 · 10 <sup>8</sup>	5,72 · 10 <sup>8</sup>	1,02 · 10 <sup>8</sup>	1,7 · 10 <sup>8</sup>
	19	$N_{PT}$	0	0	0	1	42504	962598	6471002	25621596	75287520	1,83 · 10 <sup>8</sup>	3,88 · 10 <sup>8</sup>	7,45 · 10 <sup>8</sup>	1,33 · 10 <sup>8</sup>	2,23 · 10 <sup>8</sup>
	20	$N_{PT}$	0	0	0	1	53130	1221759	8259888	32801517	96560646	2,35 · 10 <sup>8</sup>	4,98 · 10 <sup>8</sup>	9,59 · 10 <sup>8</sup>	1,7 · 10 <sup>8</sup>	2,87 · 10 <sup>8</sup>

Таблиця 6

Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=6i = 1; s = 2 \div 20$ 

$i$	$S$	$m$														
			$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384
6	2	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	28	210	924	3003	8008	18564	38760	74613	134596
	3	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	84	924	5005	18564	54264	134596	296910	593775	1107568
	4	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	210	3003	18564	74613	230230	593775	1344904	2760681	5245786
	5	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	462	8008	54264	230230	736281	1947792	4496388	9366819	18009460
	6	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	924	18564	134596	593775	1947792	5245786	12271512	25827165	50063860
	7	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	1716	38760	296010	1344904	4496388	12271512	28989675	61474519	1,2 · 10 <sup>8</sup>
	8	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	3003	74613	593775	2760681	9366819	25827165	61474519	1,31 · 10 <sup>8</sup>	2,57 · 10 <sup>8</sup>
	9	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	5005	134596	1107568	5245786	18009460	50063860	1,2 · 10 <sup>8</sup>	2,57 · 10 <sup>8</sup>	5,05 · 10 <sup>8</sup>
	10	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	8008	230230	1947792	9366819	32468436	90858768	2,19 · 10 <sup>8</sup>	4,7 · 10 <sup>8</sup>	9,27 · 10 <sup>8</sup>
	11	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	12376	376740	3262623	15890700	55525372	1,56 · 10 <sup>8</sup>	3,77 · 10 <sup>8</sup>	8,14 · 10 <sup>8</sup>	1,61 · 10 <sup>9</sup>
	12	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	18564	593775	5245786	25827165	90858768	2,57 · 10 <sup>8</sup>	6,23 · 10 <sup>8</sup>	1,35 · 10 <sup>9</sup>	2,67 · 10 <sup>9</sup>
	13	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	27132	906192	8145060	40475358	1,43 · 10 <sup>8</sup>	4,06 · 10 <sup>8</sup>	9,88 · 10 <sup>8</sup>	2,14 · 10 <sup>9</sup>	4,25 · 10 <sup>9</sup>
	14	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	38760	1344904	12271512	61474519	2,19 · 10 <sup>8</sup>	6,23 · 10 <sup>8</sup>	1,52 · 10 <sup>9</sup>	3,3 · 10 <sup>9</sup>	6,55 · 10 <sup>9</sup>
	15	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	54264	1947792	18009460	90858768	3,25 · 10 <sup>8</sup>	9,27 · 10 <sup>8</sup>	2,26 · 10 <sup>9</sup>	4,93 · 10 <sup>9</sup>	9,8 · 10 <sup>9</sup>
	16	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	74613	2760681	25827165	1,31 · 10 <sup>8</sup>	4,7 · 10 <sup>8</sup>	1,35 · 10 <sup>9</sup>	3,3 · 10 <sup>9</sup>	7,18 · 10 <sup>9</sup>	1,43 · 10 <sup>10</sup>
	17	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	100947	3838380	36288252	1,85 · 10 <sup>8</sup>	6,67 · 10 <sup>8</sup>	1,91 · 10 <sup>9</sup>	4,69 · 10 <sup>9</sup>	1,02 · 10 <sup>10</sup>	2,04 · 10 <sup>10</sup>
	18	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	134596	5245786	50063860	2,57 · 10 <sup>8</sup>	9,27 · 10 <sup>8</sup>	2,67 · 10 <sup>9</sup>	6,55 · 10 <sup>9</sup>	1,43 · 10 <sup>10</sup>	2,85 · 10 <sup>10</sup>
	19	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	177100	7059052	67945521	3,5 · 10 <sup>8</sup>	1,27 · 10 <sup>9</sup>	3,65 · 10 <sup>9</sup>	8,98 · 10 <sup>9</sup>	1,96 · 10 <sup>10</sup>	3,92 · 10 <sup>10</sup>
	20	$N_{PT}$	0	0	0	0	1	230230	9366819	90858768	4,7 · 10 <sup>8</sup>	1,71 · 10 <sup>9</sup>	4,93 · 10 <sup>9</sup>	1,21 · 10 <sup>10</sup>	2,65 · 10 <sup>10</sup>	5,3 · 10 <sup>10</sup>

Таблиця 7

Число реалізацій ТСК при  $m \in 2 \div 15$  для  $i=7i = 1; s = 2 \div 20$ 

$i$	$S$	$m$														
			$2^m$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384
7	2	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	36	330	1716	6435	19448	50388	116280	245157
	3	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	120	1716	11440	50388	170544	480700	1184040	2629575
	4	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	330	6434	50388	245157	888030	2629575	6724520	15380937
	5	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	792	19448	170544	888030	3365856	10295472	26978328	62891499
	6	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	1716	50388	480700	2629575	10295472	32224114	85900584	2,03 · 10 <sup>8</sup>
	7	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	3432	116280	1184040	6724520	26978328	85900584	2,32 · 10 <sup>8</sup>	5,53 · 10 <sup>8</sup>
	8	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	6435	245157	2629575	15380937	62891499	2,03 · 10 <sup>8</sup>	5,53 · 10 <sup>8</sup>	1,33 · 10 <sup>9</sup>
	9	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	11440	480700	5379616	32224114	1,34 · 10 <sup>8</sup>	4,36 · 10 <sup>8</sup>	1,2 · 10 <sup>9</sup>	2,9 · 10 <sup>9</sup>
	10	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	19448	888030	10295472	62891499	2,64 · 10 <sup>8</sup>	8,7 · 10 <sup>8</sup>	2,4 · 10 <sup>9</sup>	5,84 · 10 <sup>9</sup>
	11	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	31824	1560780	18643560	1,16 · 10 <sup>8</sup>	4,92 · 10 <sup>8</sup>	1,63 · 10 <sup>9</sup>	4,53 · 10 <sup>9</sup>	1,11 · 10 <sup>10</sup>
	12	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	50388	2629275	32224114	2,03 · 10 <sup>8</sup>	8,7 · 10 <sup>8</sup>	2,9 · 10 <sup>9</sup>	8,09 · 10 <sup>9</sup>	1,98 · 10 <sup>10</sup>
	13	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	77520	4272048	53524680	3,41 · 10 <sup>8</sup>	1,47 · 10 <sup>9</sup>	4,94 · 10 <sup>9</sup>	1,38 · 10 <sup>10</sup>	3,4 · 10 <sup>10</sup>
	14	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	116280	6724520	85900584	5,53 · 10 <sup>8</sup>	2,4 · 10 <sup>9</sup>	8,09 · 10 <sup>9</sup>	2,28 · 10 <sup>10</sup>	5,6 · 10 <sup>10</sup>
	15	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	170544	10295472	1,34 · 10 <sup>8</sup>	8,7 · 10 <sup>8</sup>	3,8 · 10 <sup>9</sup>	1,28 · 10 <sup>10</sup>	3,62 · 10 <sup>10</sup>	8,94 · 10 <sup>10</sup>
	16	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	245157	15380937	2,03 · 10 <sup>8</sup>	1,33 · 10 <sup>9</sup>	5,84 · 10 <sup>9</sup>	1,98 · 10 <sup>10</sup>	5,6 · 10 <sup>10</sup>	1,38 · 10 <sup>11</sup>
	17	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	346104	22481940	3,01 · 10 <sup>8</sup>	1,98 · 10 <sup>9</sup>	8,76 · 10 <sup>9</sup>	2,98 · 10 <sup>10</sup>	8,44 · 10 <sup>10</sup>	2,09 · 10 <sup>11</sup>
	18	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	480700	32224114	4,36 · 10 <sup>8</sup>	2,9 · 10 <sup>9</sup>	1,28 · 10 <sup>10</sup>	4,38 · 10 <sup>10</sup>	1,24 · 10 <sup>11</sup>	3,08 · 10 <sup>11</sup>
	19	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	657800	45379620	6,21 · 10 <sup>8</sup>	4,15 · 10 <sup>9</sup>	1,85 · 10 <sup>10</sup>	6,31 · 10 <sup>10</sup>	1,8 · 10 <sup>11</sup>	4,46 · 10 <sup>11</sup>
	20	$N_{PT}$	0	0	0	0	0	1	888030	62891499	8,7 · 10 <sup>8</sup>	5,84 · 10 <sup>9</sup>	2,61 · 10 <sup>10</sup>	8,94 · 10 <sup>10</sup>	2,55 · 10 <sup>11</sup>	6,33 · 10 <sup>11</sup>

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	32768
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:

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

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

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

Середнє число моментів модуляції дорівнює:

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

$$P[N_P(i)] = \frac{N_P}{N_{P\Sigma}} \tag{6}$$

Середньоквадратичне відхилення зміщення фронту сигналу на виході каналу:

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

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

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  $h = 8$ 

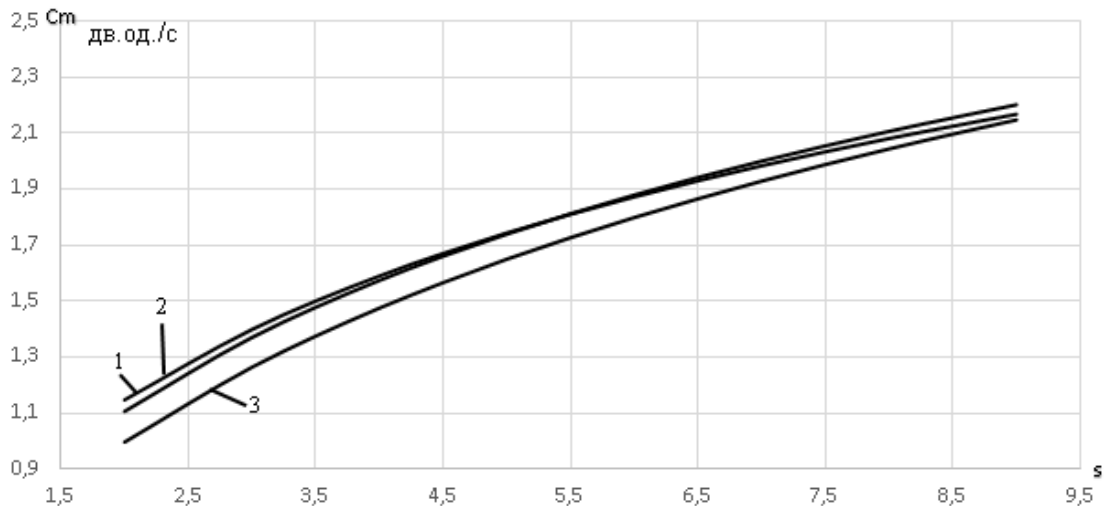
$S$	$m$			$H_{BT}$			$C_m$		
	7	8	9						
2	126	462	1287	0,000722	0,00078	0,000825	0,9966512	1,106371	1,147663
3	462	2002	6188	0,00078	0,000845	0,000895	1,2644242	1,370798	1,399374
4	1287	6188	20349	0,000825	0,000895	0,000948	1,4755673	1,574295	1,590191
5	3003	15504	53130	0,000863	0,000936	0,000991	1,6501894	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	2,311689

Таблиця 10

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

$S$	$m$			$H_{BT}$			$C_m$		
	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	2,311689

На рис. 2 та рис. 3 наведено залежності пропускної здатності каналів з різним рівнем флуктуаційних 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  $h = 8$ ,  $m = 9,8,7$

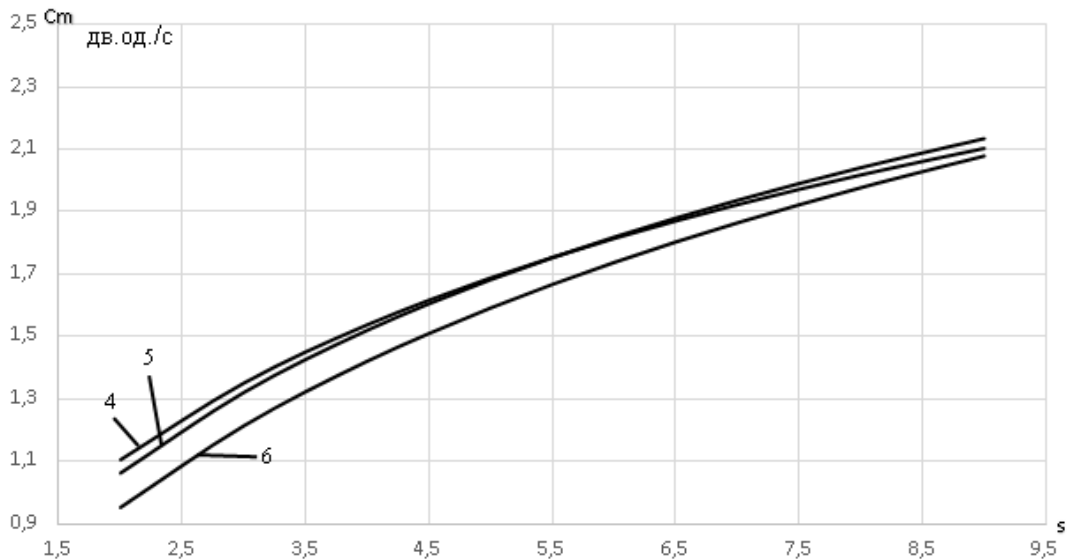


Рис. 3. Залежності пропускної здатності каналу  $C_i = f(s)$  при  $h = 5$ ,  $m = 9,8,7$

### Висновки

1. 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).

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

3. 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  $h = 5$ ).

4. Максимальна пропускна здатність каналу зв'язку ( $C_{max} = 2,417$  дв.од./с) досягається за умови, що  $t_0 = 0.9575s$ ,  $m = 7$ ,  $N_{p\Sigma} = 992687$ .

### 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 vyshchykh 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. Zakharchenko 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 р. Надрукована/Printed : 27.11.2020 р.