

УДК 621.391

СИНТЕЗ ТАЙМЕРНИХ КОДІВ З МАКСИМАЛЬНИМИ ЗНАЧЕННЯМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ ПОСТІЙНІЙ ТРИВАЛОСТІ

Захарченко М.В., Бордан В.Я.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.
bordanvlad@gmail.com*

СИНТЕЗ ТАЙМЕРНЫХ КОДОВ С МАКСИМАЛЬНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Захарченко Н.В., Бордан В.Я.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
Ул. Кузнечная, 1, Одесса, 65029, Украина.
bordanvlad@gmail.com*

SYNTHESIS OF TIMER CODES WITH MAXIMUM VALUES OF INFORMATION PARAMETERS AT CONSTANT DURATION

Zakharchenko N.V., Bordan V.Ya.

*O.S. Popov Odesa national academy of telecommunications,
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
bordanvlad@gmail.com*

Анотація. У даній статті реалізується таймерне кодування, що забезпечує збільшення потужності синтезованого коду за рахунок використання сигнальних конструкцій з різним числом інформаційних відрізків при постійній тривалості кодових слів. Проводиться аналіз і порівняння систем з таймерним і позиційним кодуванням. Розрахунок кількості кодових комбінацій і ентропії кодових слів для таймерних кодів. Більшість досліджень з кодування присвячені ефективності позиційних кодів, до недоліків яких слід віднести: відстань між моментами модуляції кратна елементу Найквіста, що збільшує довжину кодового слова при заданому алфавіті каналу; мінімальна енергетична відстань між використовуваними кодовими словами простого коду дорівнює енергії одного елемента Найквіста ($d = 1$), а для корегуючих кодів енергетична відстань визначається величиною $d \geq 2$; питома вага надлишкових елементів (r) позиційних корегуючих кодів при $d > 6$ може перевищувати величину m ($r > m$). На відміну від позиційного способу кодування, коли інформація про розряд, що передається, визначається видом сигналу на одиничному (найквістовому) інтервалі, в таймерних сигнальних конструкціях (ТСК) інформація закладена в тривалостях (довжинах) кількох (окремих) часових відрізків сигналу на інтервалі кожної сигнальної конструкції ТСК. Кількість кодових слів, що реалізуються на інтервалі ТСК, визначається параметрами: m – число найквістових елементів, на інтервалі яких реалізуються ТСК; i – число інформаційних відрізків, з яких складається кодове слово; s – параметр, що визначає мінімальну відмінність інформаційних відрізків ТСК. При передачі двосимвольних ансамблів російської мови в одному кодовому укрупненому слові необхідно розмістити 1024 різних кодових конструкцій. При використанні таймерних сигнальних конструкцій з різним числом відрізків i на інтервалі $m = 5$ можливо реалізувати 1293 різних кодових слів. Аналогічно можливо реалізувати передачу двох байтів інформації в одному кодовому слові довжиною $m = 8$.

Ключові слова: таймерні сигнальні конструкції, ентропія, інформаційна ємність найквістового елемента, число реалізацій кодових слів.

Аннотация. В данной работе реализуется таймерное кодирование, которое обеспечивает увеличение мощности синтезированного кода за счет использования сигнальных конструкций с

различным числом информационных отрезков при постоянной длительности кодовых слов. Проводится анализ и сравнение систем с таймерным и позиционным кодированием. Расчет количества кодовых комбинаций и энтропии кодовых слов для таймерных кодов. Большинство исследований по кодированию посвященные эффективности позиционных кодов, к недостаткам которых следует отнести: расстояние между моментами модуляции кратная элементу Найквиста, что увеличивает длину кодового слова при заданном алфавите канала; минимальное энергетическое расстояние между используемыми кодовыми словами простого кода равно энергии одного элемента Найквиста ($d = 1$), а для корректирующих кодов энергетическое расстояние определяется величиной $d \geq 2$, удельный вес избыточных элементов (r) позиционных корректирующих кодов при $d > 6$ может превышать величину m ($r > m$). В отличие от позиционного способа кодирования, когда информация о передаваемом разряде определяется видом сигнала на единичном (найквистовом) интервале, в таймерных сигнальных конструкциях (ТСК) информация заложена в длительностях (длинах) нескольких (отдельных) временных отрезков сигнала на интервале каждой сигнальной конструкции ТСК. Количество кодовых слов, реализуемых на интервале ТСК, определяется параметрами: m – число найквистовых элементов, на интервале которых реализуются ТСК; i – число информационных отрезков, из которых состоит кодовое слово; s – параметр, определяющий минимальную отличие информационных отрезков ТСК. При передаче двухсимвольных ансамблей русского языка в одном кодовом укрупненном слове необходимо разместить 1024 различных кодовых конструкций. При использовании таймерных сигнальных конструкций с различным числом отрезков i на интервале $m = 5$ возможно реализовать 1293 различных кодовых слов. Аналогично можно реализовать передачу двух байтов информации в одном кодовом слове длиной $m = 8$.

Ключевые слова: таймерные сигнальные конструкции, энтропия, информационная емкость найквистового элемента, число реализаций кодовых слов.

Abstract. In this paper realized timer coding that provides increased power synthesizable code by using signal designs with different number of pieces of information at a constant length codewords. The analysis and comparison of systems with timer and position coding are carried out. Calculating the number of code combinations and entropy code words for the timer code. Most coding studies focus on the effectiveness of position codes, to the disadvantages of which should be attributed: the distance between the moments of modulation of the multiple element of Nyquist, which increases the length of the codeword for a given alphabet of the channel; the minimum energy distance between the codewords used in a simple code is equal to the energy of one Nyquist element ($d = 1$), and for correction codes, the energy distance is determined by the value $d \geq 2$; the proportion of surplus items (r) positional corrective codes with $d > 6$ may exceed the value of m ($r > m$). Unlike the position method of code, when information about a digit that is passed is determined by the type of signal on a single (Nyquist) interval, in timer alarm constructions (TSC) information is stopped up in durations (lengths) of a few (separate) sentinel segments of signal on the interval of every alarm construction of TSC. The number of codewords implemented on the TSC interval is determined by the parameters: m – the number of Nyquist elements, on the interval of which the TSC is implemented; i - number of information segments, of which the codeword is composed; s – is a parameter that determines the minimum difference between TSC information nodes. When transferring two-character ensembles of the Russian language in one code-wide word, it is necessary to place 1024 different code designs. When using timer signal constructions with different number of spacings and in the interval $m = 5$, it is possible to implement 1293 different codewords. Similarly, it is possible to realize the transmission of two bytes of information in one codeword in length $m = 8$.

Key words: timer signal constructions, entropy, information capacity of the Nyquist element, number of implementations of codewords.

Теорію ідеального кодування Шеннона, що використовує нескінченно довгі послідовності, в даний час обмежено застосовують у практичній реалізації пристроїв зв'язку з наступних причин [1]: реальні повідомлення мають кінцеву тривалість; число різних кодових комбінацій зі збільшенням тривалості зростає за експонентою; наближення до умов ідеального кодування за Шенноном внаслідок збільшення тривалості ведуть до практично неприпустимого ускладнення процесу кодування і декодування; кодування і декодування повідомлень за Шенноном може реалізовуватися тільки після накопичення в пам'яті всієї послідовності, що призводить до додаткових затримок повідомлень.

Властивості кодів обмеженої тривалості і пошук оптимальних структур технічно реалізованих алгоритмів вивчає теорія кодування [2]. В даний час теорія кодування розвивається в двох головних напрямках: пошуком кодів, що дозволяють в каналах без завад максимально усунути надмірність джерела [2]; пошуком кодів, що підвищують імовірність передавання інформації в каналах з завадами при тривалості кодових конструкцій менше тривалості порівняно з теорією Шеннона.

При цьому більшість досліджень з кодування присвячені ефективності позиційних кодів, до недоліків яких слід віднести [3, 4]: відстань між моментами модуляції кратна елементу Найквіста, що збільшує довжину кодового слова при заданому алфавіті каналу; мінімальна енергетична відстань між використовуваними кодовими словами простого коду рівна енергії одного елемента Найквіста ($d = 1$), а для коректуючих кодів енергетична відстань визначається величиною $d \geq 2$; питома вага надлишкових елементів позиційних коректуючих кодів при $d > 6$ може перевищувати величину m ($r > m$).

У другому випадку сигнали одного типу перетворюються в сигнали іншого типу. До них можна віднести процеси модуляції, синтезу завадостійких (надлишкових) кодів.

Слід зазначити відмінність між операціями розчленування повідомлень на символи і кодування [5]. Перша операція зазвичай відбувається у самому джерелі, тому що символи повідомлення з інформаційної точки являють неподільні кванти.

Кодування часто розглядається як процес узгодження джерела з каналом зв'язку [4] і як процедура задоволення основних вимог до систем зв'язку.

Основними вимогами до систем зв'язку є:

1. Вірність зв'язку – характеризує міру відповідності прийнятих повідомлень переданим.
2. Стійкість зв'язку – здатність системи зв'язку протистояти шкідливій дії завад.
3. Ефективність зв'язку – оцінюється мірою використання ресурсу системи.
4. Скритність зв'язку – здатність системи працювати в режимі, що ускладнює виявлення передачі.
5. Надійність зв'язку – здатність системи працювати тривалий час без відмов і швидко відновлюватися.
6. Економічність зв'язку – в першу чергу характеризується часом використання всього асортименту та обсягу обладнання, що забезпечує передачу повідомлення.

У зв'язку з цим **метою статті** є збільшення інформаційної ємності найквістового елемента в двійковому симетричному каналі за рахунок використання запропонованих в ОНАЗ ім. О.С. Попова таймерних сигналів.

Таймерне кодування. У системах зв'язку з позиційним кодуванням розглядаються системи кодування, в яких інформаційний параметр елементарних сигналів (складових кодових слів) змінюється через інтервали, кратні тривалості найквістового елемента (t_0), який визначається пропускну здатністю каналу [2].

У зв'язку з цим, для двійкового каналу граничне значення пропускну здатності C не перевищує значення [2]:

$$C = \log_2 2 = 1. \quad (1)$$

Як показано в теорії електричного зв'язку [2] для отримання пропускну здатності $C > 1$ використовуються канали з алфавітом (числом різних значень інформаційного параметра (α)) на виході каналу $\alpha > 2$ [4].

На відміну від позиційного способу кодування, коли інформація про розряд, що передається, визначається видом сигналу на одиничному (найквістовому) інтервалі, в таймерних сигнальних конструкціях (ТСК) інформація закладена в тривалостях (довжинах) кількох (окремих) часових відрізків сигналу τ_{ci} на інтервалі кожної сигнальної конструкції ТСК. З метою зменшення міжсимвольних спотворень тривалість кожного з відрізків τ_{ci} в сигнальній конструкції задовольняє умові [5, 6]:

$$\tau_{ci} = t_0 + z\Delta, \text{ де } z \in 0 \dots z_0 - \text{цілі числа.} \quad (2)$$

Перший доданок виразу (2) забезпечує встановлення перехідного процесу на виході каналу при передачі всіх i інформаційних відрізків, а часовий відрізок Δ показує частину одиничного елемента $t_0 > \Delta = \frac{t_0}{s}$ і визначається завадами в каналі, що забезпечує задану ймовірність помилкового прийому сигнальної конструкції ($s \in 2, 4, \dots, s_0$) [5].

Розглянемо принцип формування ТСК використовуваної при передаванні інформації в бінарному симетричному каналі.

На рис. 1 показані діаграми реалізацій декількох ТСК.

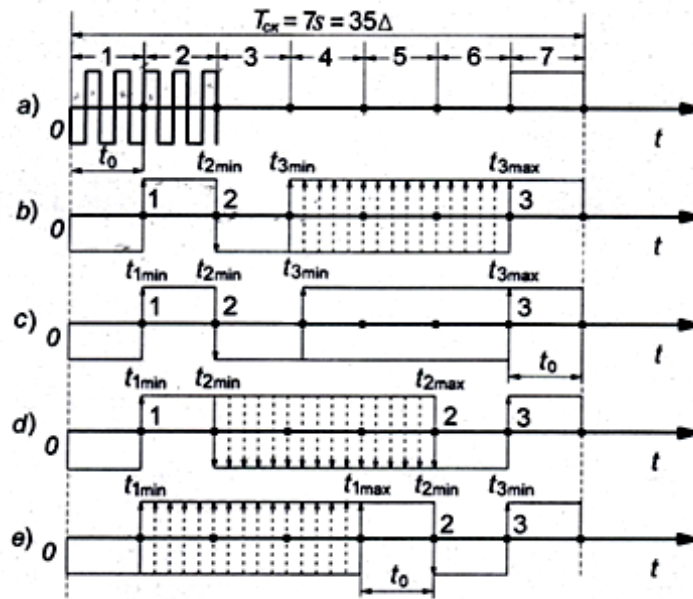


Рисунок 1 – реалізації ТСК при $s = 5; m = 7; i = 3; t_{1min} = 5\Delta; t_{2min} = 10\Delta; t_{3min} = 15\Delta; t_{1max} = 20\Delta; t_{2max} = 25\Delta; t_{3max} = 30\Delta$

На рис. 1, *a* показано 7 найквістових елементів довжиною $t_0 = \frac{1}{\Delta f}$, кожен з яких

складається з п'яти елементів $\Delta \left(\frac{t_0}{\Delta} = s = 5 \right)$. Відзначимо, що окремо елемент Δ є утворюючим елементом для всіх дозволених до передавання кодових слів (сам він по каналу зв'язку не передається, але бере участь у формуванні складових певних відрізків τ_{ci} кожної використовуваної кодової конструкції (2)).

Таким чином, кількість кодових слів, що реалізуються на інтервалі $T_{ск}$, визначається параметрами: m – число найквістових елементів, на інтервалі яких реалізуються ТСК (в нашому випадку $m = 7$); i – число інформаційних відрізків, з яких складається кодове слово; s – параметр, що визначає мінімальну відмінність довжин інформаційних відрізків на інтервалі $T_{ск}$.

З рис. 1, *b* випливає, що в даному випадку використовується три інформаційних відрізки, відлік яких відбувається послідовно від точки 0 на осі t :

1. $0 \dots 1.$
2. $1 \dots 2.$
3. $2 \dots 3.$

Рис. 1, *b* відображає мінімальні значення тривалостей інформаційних відрізків (1, 2, 3), а заштрихована зона є областю, в якій методом зміщення третього переходу на інтервали Δ вправо формується 15 дозволених кодових комбінацій.

Слід зазначити, що при $\tau_{1\min} = t_0$ і $\tau_{2\min} = t_0$ саме за рахунок зміщення третього переходу можна реалізувати 15 комбінацій.

З рис. 1, *b* і 1, *c* видно, що ці два кодових слова відрізняються одним елементом Δ . Її енергія і являє енергетичну відстань між цими словами. Вона в 5 разів менше порівняно з позиційним кодуванням, тобто елементом t_0 .

На рис. 1, *c* показано реалізацію однієї з можливих комбінацій за рахунок зміщення кінця відрізка 3 на величину Δ :

$$\text{Перший відрізок } \tau_{1\min} = 5\Delta = t_0.$$

$$\text{Другий відрізок } \tau_{2\min} = 5\Delta = t_0.$$

$$\text{Третій відрізок } \tau_{3\min} = 5\Delta + \Delta = t_0 + \Delta.$$

Якщо зафіксувати координати 1; 2 на своїх місцях, то зміщуючи тільки координату 3 на величину $\theta = 1\Delta$ вправо, можна синтезувати 15 різних комбінацій.

У статті показано, що за рахунок зміщення всіх трьох моментів модуляції не змінюючи їх черговості можна отримати число реалізацій [3]:

$$N_p = C_{ms-i(s-1)}^i. \quad (3)$$

Після перетворення виразу (3) отримуємо:

$$N_p = \frac{(ms - i(s-1))!}{i!(ms - is)!}. \quad (4)$$

Для розглянутого прикладу $m = 7$, $s = 5$, $i = 3$ число реалізацій N_p дорівнює $N_p = 1771$.

Слід відзначити, що при $s = 5$, величина параметра $\Delta = \frac{t_0}{s} = 0,2t_0$.

Таблиця 1 – Число реалізацій ТСК

$m \backslash s$	4	5	6	7	8	9	10
N_{pn}	16	32	64	128	256	512	1024
2	10	35	84	165	286	455	680
3	20	84	220	455	816	1330	2024
4	35	165	455	969	1771	2925	4495
5	56	286	816	1771	3276	5456	8436
6	84	455	1330	2925	5456	9139	14190
7	120	680	2024	4495	8436	14190	22100
8	165	969	2925	6545	12341	20825	32509
9	220	1330	4060	9139	17296	29260	45760
10	286	1771	5456	12341	23426	39711	62196

Таблиця 2 – Інформаційна ємність найквістового елемента при $i = 3$

$m \backslash s$	4	5	6	7	8	9	10
2	0,8830482	1,025857	1,065386	1,052332	1,019984	0,98108	0,940939
3	1,080482	1,278463	1,26893	1,261389	1,209053	1,153023	1,098299
4	1,282321	1,473264	1,47162	1,417193	1,348794	1,279358	1,213411
5	1,451839	1,631974	1,612071	1,541478	1,459715	1,379292	1,304234
6	1,598079	1,765945	1,729535	1,644889	1,551703	1,46198	1,379259
7	1,726723	1,881878	1,830499	1,733444	1,630293	1,53251	1,443176
8	1,841581	1,984071	1,919037	1,810882	1,698896	1,594003	1,498855
9	1,94534	2,075442	1,997877	1,879689	1,759769	1,648516	1,54818
10	2,039968	2,15807	2,068938	1,941596	1,814478	1,697472	1,592453

В табл. 1 надано число реалізацій ТСК, розрахованих за формулою (4) для $m \in 4...10$ та $s \in 2...10$, а в табл. 2 інформаційна ємність найквістового елемента I_H для числа реалізацій N_p кодових слів (табл. 1) розраховані через ентропію H [5]:

$$H = \log_2 N_p ; \quad (5)$$

$$I_H = \frac{H}{m} = \frac{\log_2 N_p}{m}.$$

З табл. 1 та 2 випливає наступне.

При збільшенні m та $s = \text{const}$ число реалізацій ТСК збільшується більше ніж у 7 разів (число реалізацій при позиційному кодуванні збільшується тільки в 2 рази при збільшенні довжини кодового слова на величину t_0).

При $m = \text{const}$ і збільшенні s число реалізацій теж збільшується.

Головна перевага таймерних сигналів полягає в набагато більшій кількості реалізацій порівняно з позиційним кодуванням. Наприклад, згідно з табл. 1 при $s = 7$ на інтервалі одного байта ($m = 8$) число реалізацій складає $N_p = 8436$ кодових слів, що в 33 рази більше порівняно з позиційним кодуванням ($8436 / 256 = 32,95 \approx 33$).

В табл. 2 бачимо, що при $s > 4$ для всіх значень $m \in 4...10$ інформаційна ємність одного елемента максимальна при $m = 5$.

На жаль підсумовувати числа реалізацій за різних значень s неможливо технологічно (тому що для цього необхідно змінювати тактову частоту за значеннями Δ).

Збільшити число реалізацій можливо тільки при синтезі ансамблів з різною кількістю i при $m = \text{const}$.

У табл. 3 надано число N_p , розрахованих за формулою (4) при $m \in 4...10$, $i \in 1 \div 6$ для $s = 7$.

Таблиця 3 - Залежність $N_p = f(m, i)$ при $s = 7$

m	4	5	6	7	8	9	10
-----	---	---	---	---	---	---	----

$i \backslash N_{mk}$	$2^4=16$	$2^5=32$	$2^6=64$	$2^7=128$	$2^8=256$	$2^9=512$	$2^{10}=1024$
1	22	29	36	43	50	57	64
2	120	253	435	666	946	1275	1653
3	120	680	2024	4495	8436	14190	22100
4	1	330	3060	12650	35960	82251	163185
5		1	792	11628	65780	237336	658008
6			1	1716	3876	296080	1344904
Σ	263	1293	6348	31198	115048	631189	2189914

З табл. 3 випливає, що при $m = 5$ сумарне число реалізацій дорівнює $N_p = 29 + 253 + 680 + 330 + 1 = 1293$, що достатньо для передачі двох символних ансамблів в одному слові ($32 \times 32 = 1024 < 1293$).

З наведеного вище розрахунку слідує, що на інтервалі реалізації $m = 5$ можна передати в одному кодовому слові інформацію про два символи російського тексту.

Оцінимо можливості передачі двох байтів інформації на інтервалі одного байта ($m = 8$).

Число двобайтових реалізацій $N_p(2б)$ буде дорівнювати

$$N_p(2б) = 2^8 \times 2^8 = 65536.$$

Наведені розрахунки таблиці 3 показують, що на інтервалі реалізації $m = 8$ при $i = 5$ можна синтезувати 65780, що більше значення $N_p = 65536$.

З огляду на те, що в кожен момент часу джерело може передавати конкретну інформацію з різною кількістю інформаційних відрізків i при $m = \text{const}$, то їх ентропія буде підсумовуватися при об'єднанні як елементів для незалежних ансамблів.

У табл. 4 надані значення ентропії H та інформаційної ємності найквістового елемента для чисел реалізацій кодових конструкцій (табл. 3) за формулами (5).

Внизу табл. 4 надані граничні значення H для кожного інтервала реалізації m .

Таблиця 4 – Ентропія кодових слів при $m \in 4..10$.

$m \backslash i$	4		5		6		7		8		9		10	
	H	I_n	H	I_n	H	I_n	H	I_n	H	I_n	H	I_n	H	I_n
1	4,46	1,11	4,86	0,97	5,17	0,86	5,43	0,78	5,64	0,71	5,83	0,65	6	0,60
2	6,91	1,73	7,98	1,60	8,76	1,46	9,38	1,34	9,89	1,24	10,32	1,15	10,69	1,07
3	6,91	1,73	9,41	1,88	10,98	1,83	12,13	1,73	13,04	1,63	13,79	1,53	14,43	1,44
4	0	0	8,37	1,67	11,58	1,93	13,63	1,95	15,13	1,89	16,33	1,81	17,32	1,73
5			0	0	9,63	1,60	13,51	1,93	16,01	2,00	17,86	1,98	19,33	1,93
6					0	0	10,74	1,53	11,92	1,49	18,18	2,02	20,36	2,04
Σ	18,27	4,57	30,62	6,12	46,13	7,69	64,82	9,26	71,63	8,95	82,30	9,14	88,13	8,81

Отже, таймерні коди дозволяють передачу двосимвольних ансамблів на інтервалі тривалості, яка забезпечує передачу односимвольних ансамблів (при $m = 6$ або $m = 8$)

Використовуючи таймерні коди можна забезпечити інформаційну ємність найквістового елемента в двійковому каналі більшою у 2 рази порівнянно з позиційним кодуванням $I_H = \log_2 2 = 1$.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шеннон К. Э. Математическая теория связи / К. Э. Шеннон // Сб. научн. тр. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Издательство иностранной литературы – 1963. – С. 243–332.
2. Теория передачи сигналов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М. Финк. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
3. Блох Э.Л. Модели источника ошибок в канале связи / Блох Э.Л., Попова О.В., Турин В.Я.. – М.: Связь, 1971. – 312 с.
4. Бородин Л.Ф. Введение в теорию корректирующих кодов / Л.Ф.Бородин - Москва: Советское радио, 1968.– 408 с.
5. Захарченко М.В. Системи передавання даних: навч. посіб. Т. 1. Ефективність блокового кодування / [Захарченко М.В., Кільдішев В.Й., Мартинова О.М., та ін.] – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014. – 440 с..
6. Основи теорії систем зв'язку : навч. посіб. / М. В. Захарченко, В. В. Поповський, С. М. Горохов, В. Ф. Олійник; за ред.: М. В. Захарченка; – О. : РВЦ ОНАЗ ім.. О.С. Попова, 2001. – 146 с. – Бібліогр.: с. 144. - укр.

REFERENCES:

1. Shannon, K.E.. "Matematicheskaya teoriya svyazi ." Publ. Foreign Lit. "Raboty` po teorii informacii i kibernetike" (1963): 243-332.
2. Zyuko, A.G., et al. *Teoriya peredachi signalov* . Moskva: Radio i svyaz`, 1986.
3. Blox, E.L., Popova O.V., and Turin V.Y.. *Modeli istochnika oshibok v kanale svyazi*. Moskva: Svyaz`, 1971.
4. Borodin, L.F. *Vvedenie v teoriyu korrektruyushhix kodov*. Moskva: Sovetskoe radio, 1968.
5. Zaxarchenko, M.V., Kil`dishev, V.J., Martinova, O.M., & et al. (2014). *Sistemi peredavannya danix. – T.1: Efektivnist` blokovogo koduvannya*. Odesa: ONAZ im. O.S.Popova.
6. Zaxarchenko, M.V. *Osnovi teorii sistem zv'yazku*. Odessa: ONAZ im. O.S.Popova, 2001.

DOI 10.33243/2518-7139-2019-1-1-72-79