

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ МАНІПУЛЯЦІЇ ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ В СИСТЕМІ МОДЕЛЮВАННЯ MATLAB

С. Б. Приходько, д-р техн. наук, доц.;
Т. В. Константинов, інж.

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Розроблено програмне забезпечення для моделювання процесу передачі цифрової інформації на основі маніпуляції випадкового процесу в системі моделювання MATLAB.

Ключові слова: маніпуляція випадкового процесу, система моделювання, цифрова інформація.

Аннотация. Разработано программное обеспечение для моделирования процесса передачи цифровой информации на основе манипуляции случайного процесса в системе моделирования MATLAB.

Ключевые слова: манипуляция случайного процесса, система моделирования, цифровая информация.

Abstract. The software for the digital information transmission process simulation based on the stochastic process manipulation in the MATLAB simulation system has been developed.

Keywords: stochastic process manipulation, simulation system, digital information.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У сучасних системах передачі цифрової інформації існує проблема завадостійкості цифрового зв'язку. Для підвищення завадостійкості систем цифрового зв'язку робляться спроби використання негармонічних сигналів як інформаційних несучих та нових видів маніпуляції. Однією з таких є маніпуляція випадкового процесу (stochastic process shift keying, SPSK) [8].

Для дослідження систем передачі цифрової інформації використовуються системи моделювання. Однією з розповсюджених систем моделювання є MATLAB. У цій системі є бібліотека (Communications System Toolbox) для моделювання процесу передачі цифрової інформації, але не реалізована передача цифрової інформації на основі маніпуляції випадкового процесу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Існує значна кількість публікацій з моделювання процесу передачі цифрової інформації в системі моделювання MATLAB [1, 7]. У цих публікаціях описані питання формування та передачі цифрових сигналів у MATLAB, але не розглядаються питання щодо передачі цифрової інформації на основі маніпуляції випадкового процесу. Зазначимо, що SPSK відображає спосіб кодування цифрової інформації, при якому на заданому часовому інтервалі один випадковий процес представляє значення біта, рівне нулю, а інший – рівне одиниці. У роботі [8] як випадкові процеси запропоновано застосовувати процеси авторегресії / ковзного середнього та продемонстрована можливість практичної реалізації на прикладі двох процесів авторегресії третього порядку. Отримані в [8] результати з точки зору відношення енергії інформаційного сигналу, що припадає на один переданий біт, до енергії

шуму (E_b/E_n) виявилися дуже скромними: 20 дБ при ймовірності появи бітової помилки 10^{-5} .

У роботі [5] запропоновано створювати інформаційні випадкові процеси (сигнали) за допомогою стохастичної диференціальної системи (СДС), через параметри якої у випадковий процес підмішуються дані і синхросигнал. Вилучення даних у приймачі здійснюється за прийнятим випадковим сигналом на основі двох основних процедур: детектування синхросигналу і детектування інформації (оцінки параметрів СДС). Поліпшити детектування синхронізації можна із застосуванням пілот-сигналів, які широко використовуються в системах зв'язку [6]. Це забезпечить стабільну передачу даних за наявності в каналі зв'язку широкосмугових завад до значень відношення енергії сигналу до енергії шуму, рівних $-1,6$ дБ.

Для систем передачі цифрової інформації на основі SPSK не існує формул для оцінки ймовірності бітової помилки, що вимагає розроблення відповідних імітаційних моделей.

МЕТА СТАТТІ – розробка імітаційної моделі передачі цифрової інформації на основі SPSK із застосуванням нелінійної СДС у системі моделювання MATLAB для оцінки ймовірності бітової помилки.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

В основу імітаційної моделі, що розробляється, була покладена математична модель на основі SPSK із застосуванням нелінійної СДС [4].

Суть моделі полягає в наступному. Випадковий сигнал $x(t)$ генерується СДС, поведінка якої описується стохастичним диференціальним рівнянням

$$\ddot{x} + b_1\dot{x} + b_2|x|\dot{x} + c_1x + c_3x^3 + c_5x^5 + c_7x^7 + c_9x^9 = n(t), \quad (1)$$

де $n(t)$ – білий шум з інтенсивністю N_0 .

Позначимо $x_1 = x$, а $x_2 = \dot{x}$ та перетворимо рівняння (1) в систему рівнянь 1-го порядку і тоді, застосувавши метод Ейлера для цієї системи, отримаємо наступні різниці рівняння:

$$\begin{aligned} x_{1,i+1} &= x_{1,i} + x_{2,i} \Delta t; \\ x_{2,i+1} &= x_{2,i} - (b_1 x_{2,i} + b_2 |x_{2,i}| x_{2,i} + c_1 x_{1,i} + \\ &+ c_3 x_{1,i}^3 + c_5 x_{1,i}^5 + c_7 x_{1,i}^7 + c_9 x_{1,i}^9) \Delta t + \zeta_i \sqrt{N_0 \Delta t}, \end{aligned} \quad (2)$$

де ζ_i – i -те значення нормально розподіленої випадкової величини з нульовим математичним сподіванням і дисперсією, рівною одиниці.

Рівняння (2) застосовуються для генерації випадкового сигналу $x(t)$, в ролі якого обрана компонента x_2 . Такі ж рівняння застосовуються для генерації сигналу $y(t)$, в ролі якого вибирається компонента y_2 . Пілот-сигнали (x_2) формують шляхом зміни параметрів c_3, c_5, c_7 і c_9 . Ці ж параметри змінюються при формуванні інформаційних несучих сигналів (y_2): через c_3, c_5 і c_7 задають дані, а c_9 використовують для контролю правильності декодування інформації.

На виході КАМ-модулятора отримується сигнал $s(t)$, значення якого знаходяться як $s(t_i) = x_{2,i} \cos \omega_c t_i + y_{2,i} \sin \omega_c t_i$.

Модель реалізується із завадами в каналі з адитивним білим гауссівським шумом, тому на $s(t)$ діє адитивний білий шум $m(t)$ з інтенсивністю N_m . У приймач надходить сигнал $z(t)$. Його значення обчислюються як

$$z(t_i) = s(t_i) + \zeta_i \sqrt{N_m / \Delta t}.$$

На вході приймача маємо випадковий сигнал $z(t)$ зі значеннями $z(t_i) = s(t_i) + m(t_i)$. Сигнал $z(t)$ надходить на вхід демодулятора КАМ. У результаті демодуляції відновлюємо сигнали $x(t)$ і $y(t)$, значення оцінок яких знаходимо як $\hat{x}(t_i) = z(t_i) \cos \omega_c t_i$ та $\hat{y}(t_i) = z(t_i) \sin \omega_c t_i$.

Для вирішення завдання відновлення синхросигналу використовується кореляційний приймач, що складається з M кореляторів. Кожен вихід корелятора описується як

$$r_k(T) = \int_0^T \hat{x}(t) w_k(t) dt, \quad k = 1, \dots, M, \quad (3)$$

де $w_k(t)$ – k -й опорний сигнал, що надходить у k -й корелятор.

Формування випадкового сигналу $w_k(t)$ здійснюється за допомогою наступних рівнянь:

$$\begin{aligned} w_{1,i+1} &= w_{1,i} + w_{2,i} \Delta t; \\ w_{2,i+1} &= w_{2,i} - (b_1 w_{2,i} + b_2 |w_{2,i}| w_{2,i} + c_1 w_{1,i} + \\ &+ c_3 w_{1,i}^3 + c_5 w_{1,i}^5 + c_7 w_{1,i}^7 + c_9 w_{1,i}^9) \Delta t + \hat{x}(t) \Delta t. \end{aligned}$$

Пропонований кореляційний приймач відрізняється від відомих [6] тим, що містить після кожного корелятора пристрій для обчислення $\tilde{r}_k(T)$. Значення $\tilde{r}_k(T)$ надходять у компаратор, який обирає сигнал з максимальним $\tilde{r}_k(T)$, що визначається відношенням (3), до множини оцінок середньоквадратичних відхилень (СКВ) сигналів $\hat{x}(t)$ та $w_k(t)$:

$$\tilde{r}_k(T) = \frac{r_k(T)}{\text{СКВ}(\hat{x}(t)) \cdot \text{СКВ}(w_k(t))}.$$

На рис. 1 наведена схема імітаційної моделі передачі цифрової інформації на основі SPSK із застосуванням нелінійної СДС (без синхронізації), побудована за допомогою елементів бібліотеки Simulink та S-функцій MATLAB.

Схема містить компонент для генерації псевдовипадкових чисел з нормальним розподілом (Random Number), два блоки для формування інформаційних та пілот-сигналів (S-Function 0 та 1), блоки для модуляції та демодуляції сигналів (S-Function 2, 3 та 4), блок білого адитивного гауссівського шуму AWGN_Channel (S-Function 11).

Зображені на схемі корелятори (S-Function 6, 7, 8, 9) та компаратор (S-Function 10) застосовуються для розпізнавання сигналу. Блоки Signal To Workspace лише записують сигнал, що надійшов від інших блоків, вони необхідні для перевірки та налагодження імітаційної моделі. Блок Score дозволяє наочно зобразити інформаційні сигнали: початковий, після КАМ-модуляції та в каналі.

У зв'язку з тим, що компоненти для генерації псевдовипадкових чисел з нормальним розподілом відіграють важливу роль у формуванні сигналів, попередньо було здійснено перевірку якості генераторів псевдовипадкових чисел системи моделювання MATLAB [2, 3].

Формування інформаційних сигналів здійснювалось у блоці (S-Function 0), де сигнали послідовно чергувалися один за іншим. При цьому перший інформаційний сигнал формувался через коефіцієнти $c_3 = 5$, $c_5 = -12$ та $c_9 = -18,9$. Потім передавався другий сигнал, що формувался через коефіцієнти $c_3 = 9$, $c_5 = -12$ та $c_9 = -63,12$. На рис. 2 як приклад зображено інформаційні сигнали, що формуються на інтервалах $[0, 200)$ та $[200, 400)$.

На рис. 3 зображено інформаційний сигнал після КАМ-модуляції та сигнал у каналі з відношенням енергії сигналу до енергії шуму -7 дБ.

Дані в табл. 1 та 2, наведені як приклад, свідчать про застосовність способу детектування інформації, заснованого на використанні кореляційного приймача, що складається з M кореляторів ($k = 1..4$). Як видно з табл. 1, при різних відношеннях енергії сигналу до енергії шуму (73 та -7 дБ) \tilde{r}_k максимальне на третьому кореляторі. Звідси виходить, що було передано інформаційний сигнал, сформований через коефіцієнти $c_3 = 5$, $c_5 = -12$ та $c_9 = -18,9$.

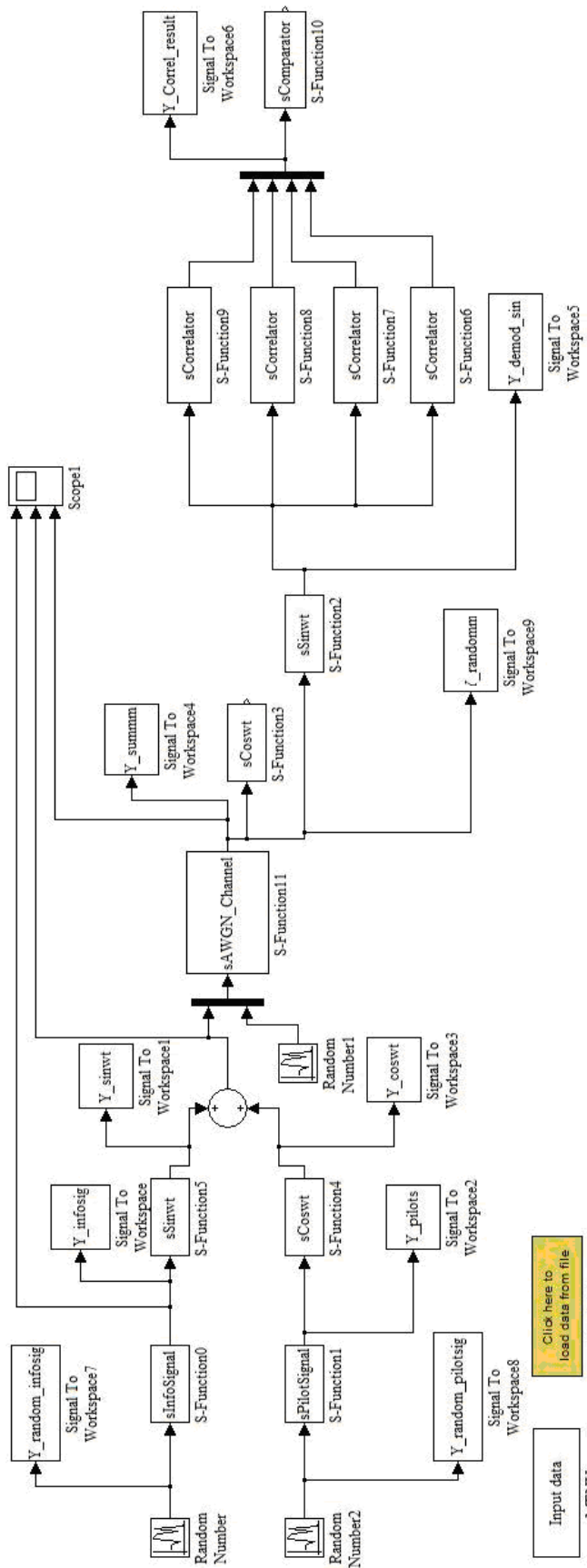


Рис. 1. Simulink-схема імітаційної моделі передачі цифрової інформації на основі PSK

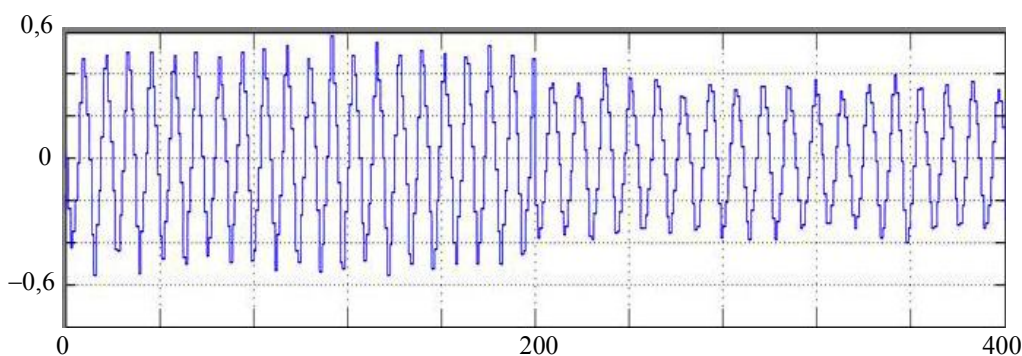
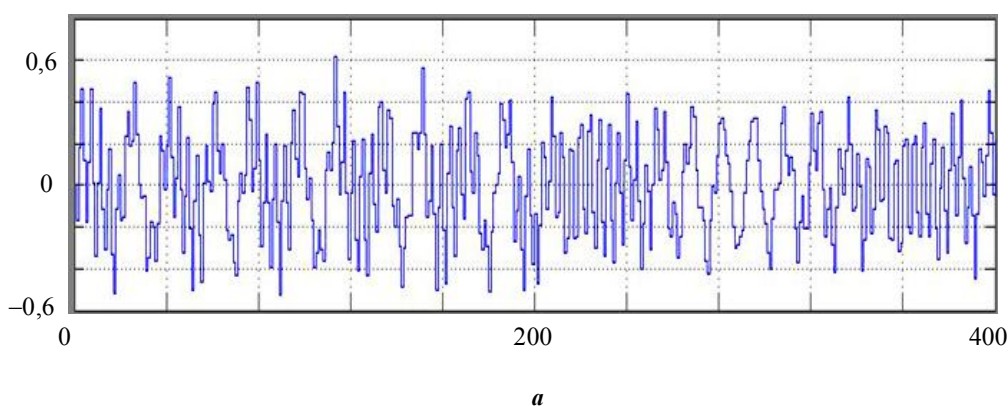
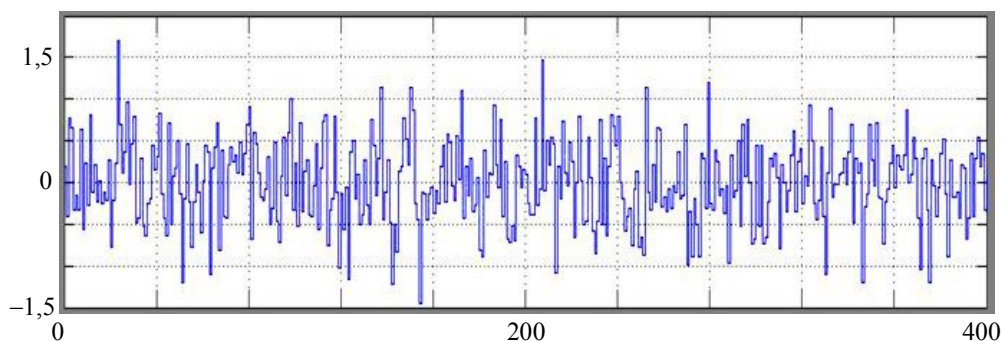


Рис. 2. Інформаційні сигнали



a



б

Рис. 3. Інформаційний сигнал після КАМ-модуляції (*a*) та сигнал у каналі з адитивним білим гауссівським шумом (*б*)

Таблиця 1. Значення кореляційних моментів для першого інформаційного сигналу

k	c_3	c_5	c_9	\tilde{r}_k (73 дБ)	\tilde{r}_k (-7 дБ)
1	9	-12	-63,12	-0,02172340	-0,05828356
2	9	-34	46,06	-0,02384756	-0,01774748
3	5	-12	-18,9	0,5246688	0,271184
4	5	-34	90,2	-0,1282849	-0,06834858

Як видно з табл. 2, \tilde{r}_k максимальне на першому кореляторі. Звідси виходить, що було передано си-

гнал, сформований через коефіцієнти $c_3 = 9$, $c_5 = -12$ та $c_9 = -63,12$.

Таблиця 2. Значення кореляційних моментів для другого інформаційного сигналу

k	c_3	c_5	c_9	\tilde{r}_k (73 дБ)	\tilde{r}_k (-7 дБ)
1	9	-12	-63,12	0,4730708	0,1872776
2	9	-34	46,06	0,1539595	0,145493
3	5	-12	-18,9	-0,00866142	-0,04852243
4	5	-34	90,2	0,0308254	-0,009218377

Розроблена імітаційна модель процесу передачі цифрової інформації на основі маніпуляції випадкового процесу була застосована для оцінки ймовірності бітової помилки при різних відношеннях сигнал/шум (*SNR*). Дослідження моделі проводилось наступним чином. Здійснювалась передача 10000 біт, що формувались випадково за рівномірним законом розподілу. Далі було отримано залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум (відношення дисперсії інформаційного сигналу на 1 біт до дисперсії шуму в каналі). Слід зазначити, що лише один розрахунок на комп'ютері із шестиядерним процесором AMD займає приблизно 6 годин.

Значення оцінок відповідних ймовірностей помилок при різних відношеннях сигнал/шум наведено в табл. 3 та на рис. 4.

Таблиця 3. Значення оцінок відповідних ймовірностей помилок

<i>SNR</i> , дБ	<i>P</i>
-24,1352	0,5306
-21,6259	0,4949
-18,3871	0,3594
-16,9174	0,3016
-14,8074	0,2163
-13,5538	0,1338
-11,8597	0,0643
-10,6014	0,0461
-9,8043	0,0283
-8,1121	0,0111
-5,5501	0,0019
-2,0510	0,0008
0,0302	1E-07

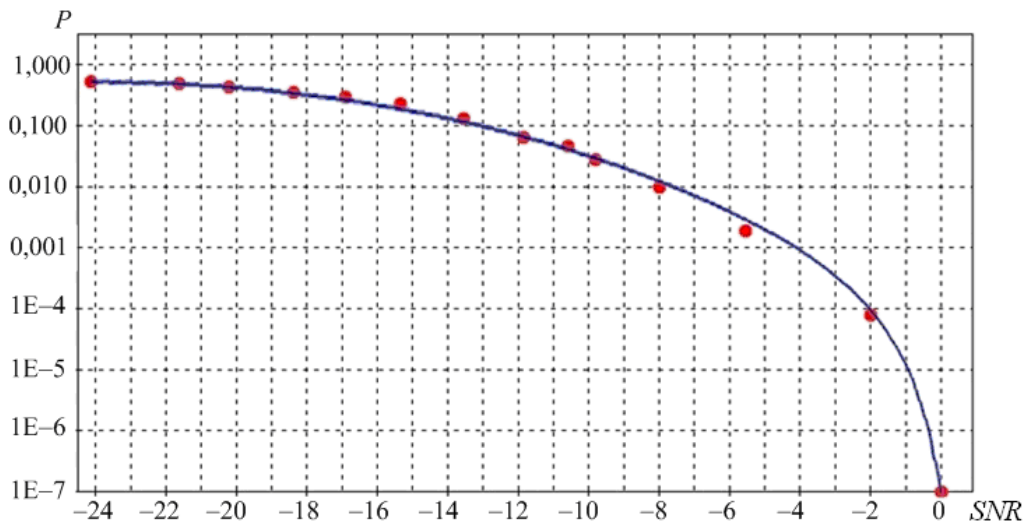


Рис. 4. Ймовірності помилки *P* при різних відношеннях енергії сигналу до енергії шуму *SNR*

Дослідження показало, що застосування пілот-сигналів у системі цифрового зв'язку на основі SPSK і КАМ може забезпечити стабільну передачу даних за наявності в каналі зв'язку широкосмугових завад. Цю тенденцію можна побачити на рис. 4.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена імітаційна модель процесу передачі цифрової інформації на основі маніпуляції випадкового процесу із застосуванням нелінійної СДС у системі моделювання MATLAB. Результати, отримані за допомогою моделі, збіглися з результатами, які

наведені в [4], що свідчить про працездатність розробленої моделі.

2. З'ясовано, що застосування пілот-сигналів у системі цифрового зв'язку на основі SPSK і КАМ дозволяє забезпечити передачу даних при впливі на сигнал у каналі зв'язку широкосмугових завад до значень відношення енергії сигналу до енергії шуму, рівних -1,6 дБ, а в ряді випадків – і при менших значеннях.

3. У подальшому планується дослідження в напрямку вдосконалення імітаційної моделі з точки зору розпізнавання синхронізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Дьяконов, В. П. Matlab 6/6.1/6.5 + SIMULINK 4/5 в математике и моделировании [Текст] / В. П. Дьяконов. – М. : Изд. дом «Солон-Пресс», 2005. – 576 с.
- [2] Приходько, С. Б. Перевірка якості генераторів псевдовипадкових чисел з нормальним законом розподілу в системі моделювання MATLAB [Текст] / С. Б. Приходько, Т. В. Константинов // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2012. – № 5–6 (445). – С. 99–102.

- [3] **Приходько, С. Б.** Перевірка якості генераторів псевдовипадкових чисел з рівномірним законом розподілу у системі моделювання MATLAB [Текст] / С. Б. Приходько, Т. В. Константинов // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2012. – № 2(443). – С. 92–97.
- [4] **Приходько, С. Б.** Применение пилот-сигналов для повышения помехозащищенности системы цифровой связи, основанной на использовании манипуляции случайного процесса [Текст] / С. Б. Приходько // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 7(34). – С. 165–170.
- [5] **Приходько, С. Б.** Сумісне застосування маніпуляції випадкового процесу і дворівневої квадратурної амплітудної модуляції для передачі цифрової інформації в системах зв'язку [Текст] / С. Б. Приходько // Вісник ХНУ. – Хмельницький : ХНУ, 2007. – № 2, т. 2(90). – С. 192–196.
- [6] **Скляр, Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение [Текст] / Б. Скляр. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
- [7] **Черных, И. В.** Simulink. Среда создания инженерных приложений [Текст] / И. В. Черных. – М. : Диалог-МИФИ, 2004. – 496 с.
- [8] **Salberg, A. B.** Secure digital communication by means of stochastic process shift keying: Principles and properties [Text] / A. B. Salberg, A. Hansen // Proceedings of NORSING-99. – Asker, Norway. – 1999. – P. 48–53.

© С. Б. Приходько, Т. В. Константинов

Надійшла до редколегії 13.03.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. К. В. Кошкін