

О. М. Кубрак, В. О. Чолпанов, І. М. Дюков

## ОЦІНКА ЙМОВІРНОСТЕЙ БІТОВОЇ ПОМИЛКИ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З ФАЗОВОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

На сьогоднішній день бездротовий зв'язок є однією з найперспективніших сфер у галузі комунікацій. Сучасні системи і засоби радіозв'язку функціонують у складній радіоелектронній обстановці. Розвиток бездротових мереж наступного покоління залежить як від передавального, так і від приймального обладнання, яке має забезпечувати високу швидкість передачі даних, необхідну для підтримки надійного рівня перешкодозахищеності. Основними факторами, що впливають на якість радіозв'язку, є: природні й навмисні завади, що діють у каналі поширення радіохвиль; багатопроменеве поширення; обмеження пропускну здатності та необхідність асинхронного доступу. Один із можливих методів часткового вирішення зазначених вище проблем – використання систем зв'язку з розширеним спектром.

У статті досліджено ефективність різних типів фазової модуляції, які використовуються для систем прямого розширення спектра (*Direct Sequence Spread Spectrum*). За канал поширення радіохвиль обрано ідеалізований канал з адитивним білим гаусівським шумом (*Additive White Gaussian noise*). Було помічено, що системи радіозв'язку з прямим розширенням спектра із двійковою фазовою модуляцією (*Binary phase shift keying*) досягає кращих показників значень імовірності біткової помилки (*Bit error rate*) порівняно з іншими. Дослідження проводилися в середовищі динамічного міждисциплінарного моделювання складних технічних систем – *Simulink* (основному інструменті для модельно-орієнтованого проєктування), основним інтерфейсом якого є графічний інструмент для побудови діаграм і гнучкий набір бібліотек функціональних блоків.

**Ключові слова:** системи зв'язку з розширеним спектром; фазова модуляція; імовірність біткової помилки; перешкодозахищеність; адитивний білий гаусівський шум (*Additive White Gaussian noise*); *Direct Sequence Spread Spectrum*.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Сигнали з розширеним спектром з роками стають усе більш популярними для використання в системах зв'язку завдяки своїй перешкодозахищеності. Найпоширенішого застосування набули три різновиди розширення спектра, описані в Рекомендації ITU-R SM.1055 [1] та в [2, 3], а саме: з прямою послідовністю; зі стрибкоподібною зміною частоти; з поєднанням зазначених вище методів з використанням розширювальної прямої послідовності та стрибкоподібною зміни частоти (*Direct Spread/Frequency Hopping*). Системи радіозв'язку (СРЗ) на основі широкосмугових сигналів (ШСС) для передачі інформації відрізняються тим, що їх ефективна ширина спектра набагато більша за швидкість передачі інформації в бітах за секунду, тому коефіцієнт розширення спектра для сигналу з розширеним спектром набагато більший за одиницю. Другою важливою особливістю, що враховується для проєктування систем зв'язку з використанням сигналів з розширеним спектром, є вплив у каналі розповсюдження різних типів радіоперешкод. Вказані умови розповсюдження

© О. М. Кубрак, В. О. Чолпанов, І. М. Дюков, 2020

призводять до інформаційних втрат, що зумовлює необхідність оцінювання перешкодостійкості сигналів із розширеним спектром.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вагомий внесок у дослідження і розвиток методів радіоподавлення CPЗ з ШСС зробили українські та закордонні вчені: Змієвський В. В., Ємельянов С. Л., Перунов Ю. М., Варакин Л. Є., Купріянов О. І., Сахаров А. В., Борисов В. І., Зінчук В. М., Лимарев А. Е., Torrieri D. J., Burel G., Poisel R. A., Wang H. тощо. У [4] Роберт А. Шольц розглядав розвиток систем зв'язку з розширеним спектром, які є стійкими до сигналів перешкод. Він зазначав, що перешкодостійкість прямого розширення спектра (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS) майже вдвічі перевищує за цією характеристикою розширення спектра з використанням стрибкоподібної зміни частот, однак більший розподіл смуги досягається завдяки технології стрибкоподібної зміни частоти [5]. Якість обслуговування, що надається системою бездротового зв'язку, може бути значно підвищена за допомогою правильного вибору схеми модуляції [6]. Поєднання розширеного спектра сигналу та фазової модуляції (ФМ) може забезпечити дуже надійний канал передачі даних [7], [8]. Wang H. у своїй роботі [8] стверджував, що DSSS-система з  $M$ -розширювальними кодами, отриманими шляхом зміщення однієї і тієї ж PN-послідовності, може збільшити ефективність передачі систем розширеного спектра, а також подолати обмеження швидкості передачі даних. Разом з тим потребує додаткового дослідження питання оцінювання завадостійкості систем зв'язку з розширеним спектром.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою статті є проведення оцінювання ефективності перешкодозахищеності CPЗ із ШСС шляхом розроблення її програмної моделі з різними типами ФМ та визначення ймовірностей бітової помилки (Bit error rate – BER) в разі впливу в каналі розповсюдження адитивного білого гаусівського шуму (Additive White Gaussian noise – AWGN), а також аналіз отриманих результатів.

**Виклад основного матеріалу.** Як видно з рис. 1, на якому зображено варіант реалізації структурної схеми передавача з DSSS, у системі відбувається двоступенева модуляція. Сигнал даних  $x(t)$  може бути як аналоговим, так і цифровим. У більшості випадків сигнал даних подається в цифровому вигляді, тому він безпосередньо перемножується з кодовим сигналом  $g(t)$ . З метою спрощення аналізу розглянемо бінарну ФМ (Binary phase shift keying – BPSK).

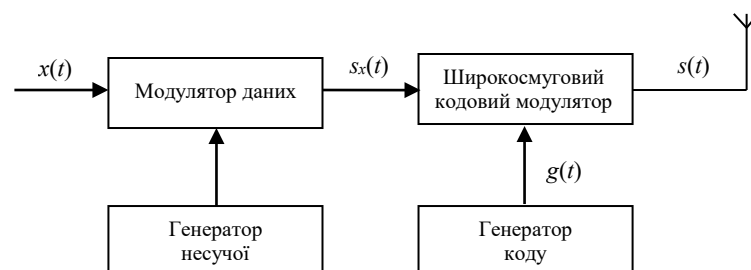


Рис. 1. Структурна схема передавача системи з розширенням спектра за методом DSSS

Як правило, потік інформаційних біт для методу BPSK подається у вигляді біполярної послідовності імпульсів з рівнями +1 і -1. Тоді сам процес модуляції реалізується шляхом простого перемноження даних і сигналу несучого коливання:

$$s_x(t) = \sqrt{2P}x(t)\cos(\omega_0 t). \quad (1)$$

У результаті такої операції відбувається миттєва зміна фази модульованого коливання на  $\pi$  радіан відносно несучого коливання відповідно до інформаційних даних.

Якщо розширювальна послідовність також подається у форматі «без нулів», то результуючий сигнал можна записати як

$$s(t) = \sqrt{2P}x(t)g(t)\cos(\omega_0 t). \quad (2)$$

У приймачі (рис. 2) формується синхронізований у часі псевдовипадковий сигнал  $g(t)$ , який забезпечує зворотну процедуру – стискання спектра і є точною копією сигналу псевдовипадкової послідовності на передавальному боці. Отриманий вузькосмуговий PSK сигнал демодулюється.

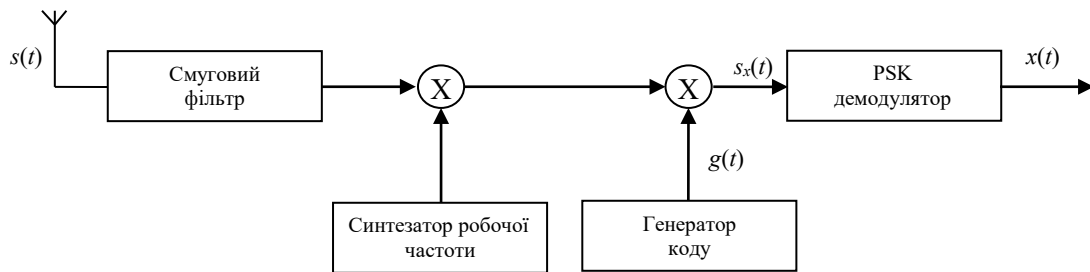


Рис. 2. Структурна схема приймача системи з прямим розширенням спектра

Тобто можна стверджувати, що демодуляція сигналу для DSSS-BPSK систем відбувається також за два етапи. Перший – це стискання спектра прийнятого сигналу, який виконується шляхом визначення кореляції прийнятого сигналу із синхронізованою копією розширювальної послідовності. Другий етап реалізується за допомогою звичайного демодулятора виду радіочастотної модуляції.

Перешкодостійкість ШСС визначають за широко відомим співвідношенням, що зв'язує відношення сигнал-шум на виході приймача  $q^2$  з відношенням сигнал-шум на вході приймача  $\rho^2$  [9]:

$$q^2 = 2B\rho^2, \quad (3)$$

де  $\rho^2 = P_c/P_n$  ( $P_c, P_n$  – потужності ШСС і перешкоди);

$q^2 = 2E/N_n$ , де  $E$  – енергія ШСС;  $N_n$  – спектральна щільність потужності перешкоди в смузі ШСС. Відповідно,  $E = P_c T$ , а  $N_n = P_n/F$ ;

$B$  – база ШСС.

Відношення сигнал-шум на виході  $q^2$  визначає робочі характеристики прийому ШСС, а відношення сигнал-шум на вході  $\rho^2$  – енергетику сигналу й перешкоди. Як видно зі співвідношення (3), прийом ШСС узгодженим фільтром або корелятором супроводжується посиленням сигналу (або зменшенням впливу перешкоди) у  $2B$  рази. Саме тому величину

$$K_{ШСС} = q^2/\rho^2 \quad (4)$$

називають коефіцієнтом посилення ШСС у разі обробки або просто її посилення [9]. З (3), (4) випливає, що коефіцієнт посилення обробки  $K_{ШСС} = 2B$ .

Відомо, що вплив адитивної перешкоди в СРЗ із ШСС зводиться до збільшення спектральної щільності потужності шуму на виході змішувача приймача. Вираз для оцінювання  $P_{ном}$  у разі впливу загороджувальної шумоподібної перешкоди (типу «білий шум») на приймач має такий вигляд [10]:

$$P_{ном} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{K_c P_c}{\eta P_n}}, \quad (5)$$

де  $K_c$  – коефіцієнт розширення спектра сигналу ( $K_c = W_c / F_c$ ),  $W_c$  – ширина смуги частот ШСС, Гц;  $F_c$  – ширина смуги частот інформаційного символу, Гц;

$P_c$  – потужність сигналу на вході приймача СРЗ із ШСС, Вт;

$P_n$  – потужність перешкоди на вході приймача СРЗ із ШСС, Вт;

$\eta$  – параметр перешкоди ( $\eta = \sin^2 c^2 [(f_n - f) \tau_{имп}]$ );

$f_n$  – несуча частота сигналу перешкоди, Гц;

$f_c$  – несуча частота ШСС, Гц;

$\tau_{имп}$  – тривалість імпульсу кодової послідовності, с;

$\operatorname{erfc}(x)$  – додатковий інтеграл помилок  $\left( \operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \right)$ .

Отже, одним з основних призначень СРЗ із ШСС є забезпечення надійного прийому інформації в разі впливу потужних перешкод, коли відношення сигнал-шум на вході приймача  $\rho^2$  може бути набагато менше одиниці. Необхідно ще раз відзначити, що наведені співвідношення справедливі для перешкоди у вигляді гаусівського випадкового процесу з рівномірною спектральною щільністю потужності (білий шум).

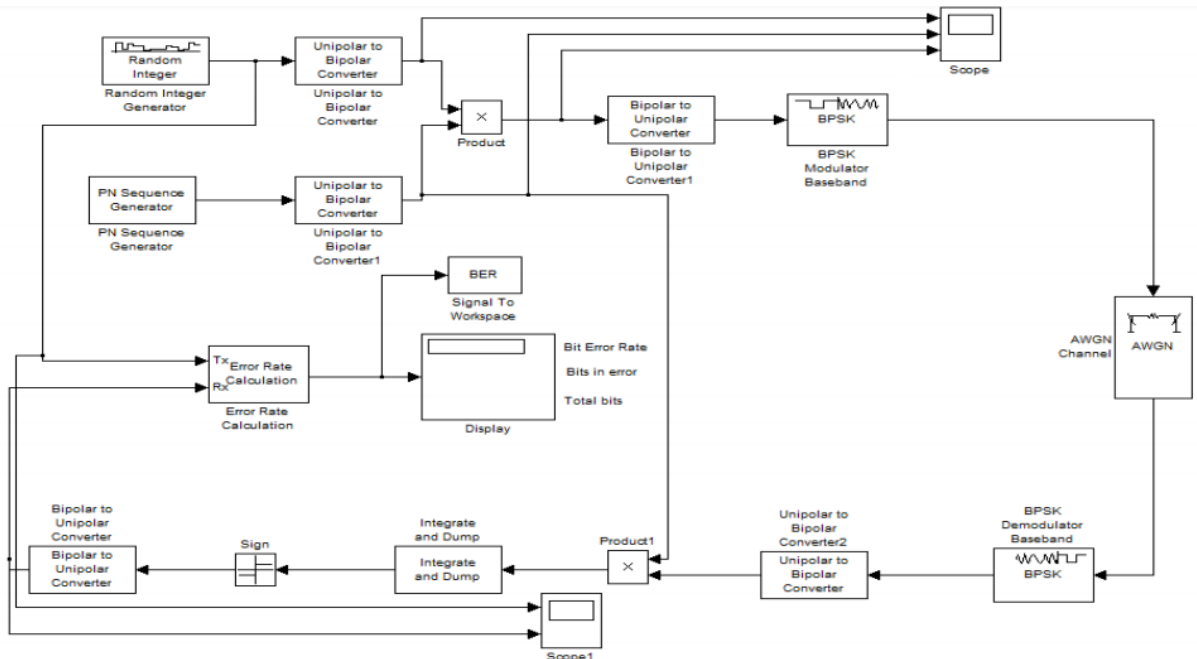


Рис. 3. Модель системи зв'язку з використанням DSSS у програмному середовищі MATLAB Simulink

Зображена на рис. 3 модель CP3 із ШСС розроблена для системи з використанням сигналу з прямим розширенням спектра й каналом AWGN в програмному середовищі MATLAB Simulink (основному інструменті для модельно-орієнтованого проектування) із використанням відповідних підсистемних блоків.

Джерело даних – це генератор випадкових цілих чисел (random Integer generator), який генерує випадкові рівномірно-розподілені двійкові цілі числа (0 і 1) з тривалістю біта 1 мс та швидкістю передачі даних 1 Кб/с (рис. 4). Блок генератора послідовності PN (PN-Sequence generator), який використовується з підбібліотеки генераторів послідовностей джерел зв'язку, генерує послідовність псевдовипадкових двійкових чисел, як показано на рис. 5. Передані дані надходять із PN-послідовністю до суматора за модулем 2 для отримання результуючого сигналу, який наведено на рис. 6. BPSK-модулятор перетворює отриману послідовність на біполярну зі зворотною фазою (0 або 180), як зображено на рис. 7. На рис. 8 показано переданий у каналі з AWGN сигнал у разі відношення сигнал-шум, що дорівнює 10 дБ. Якщо в приймачі використовується правильний розширювальний PN-код, то отримані дані від BPSK-демодулятора є такими, як продемонстровано на рис. 9, де отримана послідовність еквівалентна переданій.

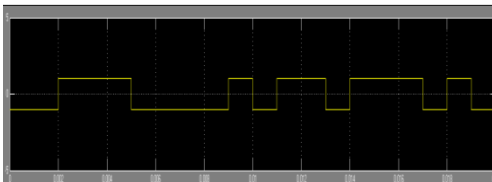


Рис. 4. Корисний сигнал

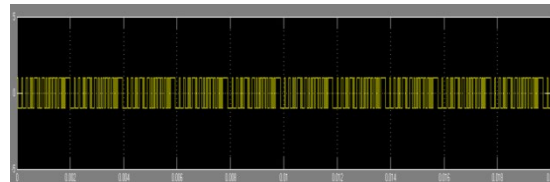


Рис. 5. Генерована послідовність псевдовипадкових двійкових чисел

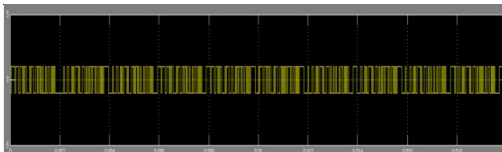


Рис. 6. Результат перемноження корисного сигналу та розширюючого коду

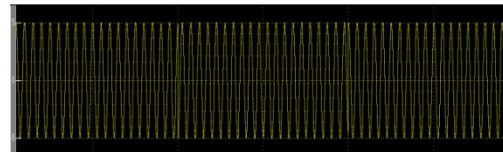


Рис. 7. Сигнал з виходу BPSK-модулятора

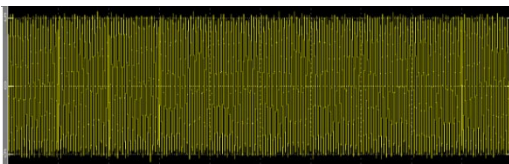


Рис. 8. Сигнал на вході BPSK-демодулятора

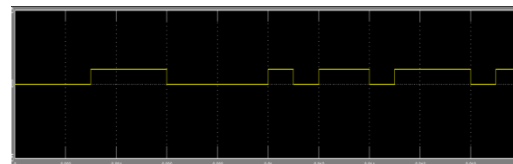


Рис. 9. Отримані дані, які відповідають переданому корисному сигналу

За допомогою моделі системи з DSSS у програмному середовищі MATLAB Simulink (рис. 3) було проведено оцінювання системи щодо такого параметра, як імовірність помилки на біт інформації (табл. 1, рис. 10). Було виявлено, що в разі роботи системи протягом 10 мс та загальної сумарної кількості переданих бітів, що становила 1000, BER виявився 0,008 для значення відношення сигнал-шум 5 дБ.

Порівняння залежності BER від  $\frac{E_b}{N_0}$  для різних схем модуляції DSSS

$\frac{E_b}{N_0}$ , (дБ)	Тип ФМ, що застосовується до ШСС				
	DSSS-BPSK	DSSS-QPSK	DSSS-8PSK	DSSS-16PSK	DSSS-QAM
1	2	3	4	5	6
-5	0,1934	0,3008	0,4279	0,6706	0,3723
-4	0,1774	0,2494	0,3796	0,591	0,3434
-3	0,1611	0,2182	0,3351	0,6084	0,3114
-2	0,1323	0,1826	0,2831	0,5664	0,2944
-1	0,1119	0,1505	0,2419	0,5185	0,2481
0	0,073	0,1202	0,1841	0,4603	0,2153
1	0,062	0,081	0,1228	0,4123	0,181
2	0,05	0,053	0,083	0,3745	0,13
3	0,03	0,031	0,051	0,33	0,112
4	0,018	0,005	0,028	0,2724	0,082
5	0,008	0,003	0,016	0,2262	0,054
6	0,003	0,002	0,08	0,1818	0,04
7	0	0,001	0,004	0,0117	0,02
8	0	0	0,001	0,078	0,001
9	0	0	0	0,046	0,004
10	0	0	0	0,022	0
11	0	0	0	0,014	0
12	0	0	0	0,008	0

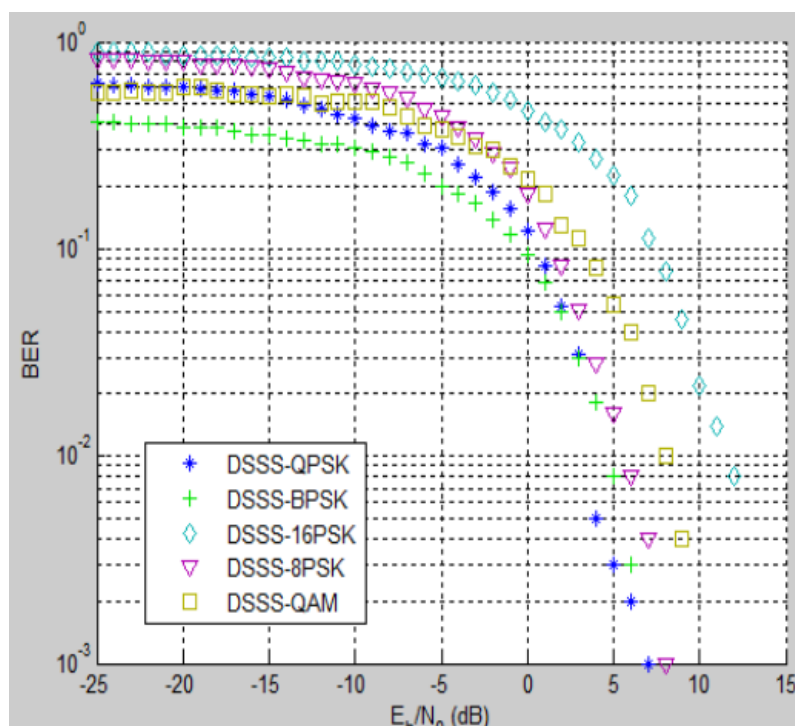


Рис. 10. Графік залежності BER від  $E_b/N_0$  для різних схем модуляції DSSS

**Висновки.** Бездротові системи зв'язку вразливі до впливу навмисних та ненавмисних перешкод, таких як втрати на шляху розповсюдження, радіоперешкоди тощо. Ці фактори обмежують дальність дії та надійність таких систем. Канал розповсюдження з AWGN – це модель каналу, у якій погіршення зв'язку є результатом лінійного додавання до корисного сигналу широкосмугового або білого шуму з постійною спектральною щільністю.

Встановлено, що система з DSSS-BPSK, у разі впливу в каналі розповсюдження AWGN, ефективніша щодо BER порівняно з іншими типами цифрових методів модуляції, такими як: QPSK, 8PSK, 16PSK та QAM, – як показано на графіку (рис. 10). На зображенні видно, що для досягнення  $BER = 10^{-3}$  необхідне значення  $\frac{E_b}{N_0} = 6$ , тоді як система з DSSS-

QPSK, DSSS-4PSK, DSSS-16PSK та DSSS-QAM потребує вищих значень  $\frac{E_b}{N_0}$  для досягнення того самого значення BER.

Результати моделювання показали, що для заданої швидкості передачі даних та за умови впливу AWGN на канал розповсюдження DSSS-BPSK виявилась більш стійкою до негативного впливу білого шуму. Майбутні дослідження будуть спрямовані на оцінювання ефективності системи зв'язку із ШСС у разі впливу різних типів перешкод.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Recommendation ITU-R SM. 1055 the use of spread spectrum technique. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1055-0-199407-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1055-0-199407-I!!PDF-E.pdf) (last accessed: 25.08.2020).
2. Григорьев В. А., Лагутенхо О. И., Распаев Ю. А. Сети и системы радиодоступа. Москва : Эко-Трендз, 2005. 384 с.
3. Вишнеvский В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. Москва : Техносфера, 2005. 592 с.
4. Robert A. Scholtz. The Origins of Spread Spectrum Communications // IEEE transactions on Communications. Nov. 1982. Vol. 30, № 05. P. 822–852.
5. Donald Schilling, Laurence B. Milstein, Marvin Kullback, Frank Miller. Spread spectrum for commercial applications // IEEE communication magazine. April 1991. Vol. 29, Iss. 4. P. 66–79.
6. Manoj Barnela and Dr. Suresh Kumar. Digital Modulation Schemes Employed in Wireless Communication: A Literature review // International Journal of Engineering, Applied and Management Sciences Paradigms. April 2014. Vol. 14, Iss. 01. P. 1–9.
7. Kai Yang Narayan Prasad and Xiaodong Wang. A Message-Passing Approach to Distributed Resource Allocation in Uplink DFT-SpreadOFDMA Systems // IEEE transactions on Communications. April 2011. Vol. 59, № 4. P. 1099–1113.
8. Wang Ding, Zhao Yi-Xuas. Multi-subchannel spread spectrum for anti-jam communications // IEEE industrial conference on industrial control and electronics engineering. 2012. P. 161–165. ISBN: 978-1-4673-1450-3.
9. Феер К. Беспроводная цифровая связь. / Пер. з англ. Москва : Радио и связь, 2000. 519 с.
10. Скляр В. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. (2-е изд.). Прентис Холл, Нью-Джерси, 2001. 1104 с.

## REFERENCES

1. Recommendation ITU-R SM. 1055 the use of spread spectrum technique. (n.d.). Retrieved from [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1055-0-199407-1!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1055-0-199407-1!!PDF-E.pdf).
2. Grigor'ev, B. A., Lagutenkho, O. I., & Raspaev, Iu. A. (2005). *Seti i sistemy radiodostupa [Radio access networks and systems]*. Moscow: Eko-Trendz [in Russian].
3. Vishnevskii, V. M., Liakhov, A. I., Portnoi, S. L., & Shakhnovich, I. V. (2005). *Shirokopolosnye besprovodnye seti peredachi informatsii [Broadband wireless information transmission networks]*. Moscow: Tekhnosfera [in Russian].
4. Robert A. Scholtz. (1982). The Origins of Spread Spectrum Communications. *IEEE transactions on Communications, Vol. 30, № 05*, 822–852.
5. Donald Schilling, Laurence B. Milstein, Marvin Kullback, Frank Miller. (1991). Spread spectrum for commercial applications. *IEEE communication magazine, Vol. 29, Iss. 4*, 66–79.
6. Manoj Barnela & Dr. Suresh Kumar. (2014). Digital Modulation Schemes Employed in Wireless Communication: A Literature review. *International Journal of Engineering, Applied and Management Sciences Paradigms, Vol. 14, Iss. 01*, 1–9.
7. Kai Yang Narayan Prasad & Xiaodong Wang. (2011). A Message-Passing Approach to Distributed Resource Allocation in Uplink DFT-SpreadOFDMA Systems. *IEEE transactions on Communications, Vol. 59, № 4*, 1099–1113.
8. Wang Ding, Zhao Yi-Xuas. (2012). Multi-subchannel spread spectrum for anti-jam communications. *IEEE industrial conference on industrial control and electronics engineering*, 161–165. ISBN: 978-1-4673-1450-3.
9. Feer, K. (2000). *Besprovodnaia tsifrovaia sviaz' [Wireless digital communication]*. Trans. from English. Moscow [in Russian].
10. Skliar, V. (2001). *Tsifrovaia sviaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye [Digital Communications: fundamentals and applications]*. 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey [in Russian].

**O. M. Kubrak, V. O. Cholpanov, I. M. Dyukov**

**ESTIMATION OF BIT ERROR PROBABILITIES OF COMMUNICATION SYSTEMS WITH FM BROADBAND SIGNALS**

*Today, wireless communication is one of the most promising areas in the field of communications. Modern radio communication systems and facilities operate in a complex electronic environment. The development of next-generation wireless networks depends on both transmitting and receiving equipment, which must provide the high data rates needed to maintain a reliable level of interference protection. The main factors influencing the quality of radio communication are natural and intentional interference in the radio wave propagation channel, multi-beam propagation, bandwidth limitation and the need for asynchronous access. One of the possible methods of partial solution of the above problems is the use of extended spectrum communication systems.*

*The article investigates the effectiveness of different types of phase modulation used for Direct Sequence Spread Spectrum systems. An idealized channel with additive white Gaussian noise was chosen as the radio wave propagation channel. It has been observed that Binary*



*phase shift keying radio systems achieve better Bit error rate values than other systems. The research was conducted in the environment of dynamic interdisciplinary modeling of complex technical systems - Simulink (the main tool for model-oriented design), whose main interface is a graphical tool for charting and a flexible set of libraries of functional blocks.*

*The simulation results showed that for a given data rate and under the influence of AWGN on the propagation channel, DSSS-BPSK was more resistant to the negative effects of white noise. Future research will focus on evaluating the effectiveness of the SSS communication system in the event of different types of interference.*

**Keywords:** *extended spectrum communication systems; phase modulation; bit error probability; noise immunity; Binary phase shift keying, Additive White Gaussian noise; Direct Sequence Spread Spectrum.*