

**ОЦІНЮВАННЯ БІТОВИХ ПОМИЛОК ПРИ РІЗНИХ ВИДАХ
ДЕМОДУЛЯЦІЇ ДИСКРЕТНИХ СИГНАЛІВ¹**

Кичак В. М., д-р техн. наук, Тромсюк В. Д., аспірант

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

**EVALUATION OF BIT ERRORS IN DIFFERENT TYPES OF DEMODULATION
DISCRETE SIGNALS**

Kychak V. Doc. Of Sci (Technics), Professor; Tromsyuk V. postgraduate student

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, tvd1989@mail.ru

Вступ

Сучасні системи передачі/прийому інформації використовують широкий спектр аналогових та дискретних методів модуляції/демодуляції. У всіх випадках цифрової модуляції (маніпуляції), аналоговий несучий сигнал модулюється дискретним сигналом. Це можна охарактеризувати як форму аналого-дискретного перетворення. Зміни в несучому сигналі вибираються для певного числа альтернативних символів (модуляційний алфавіт) [1]. Для оцінювання якості демодуляції таких сигналів виникає потреба у оцінці коефіцієнта бітових помилок BER (Bit error rate).

В реальних дискретних каналах крім бітових помилок можуть спостерігатися вставки або випадання символів (біт) в потоці даних.

Походження бітових помилок в різних каналах різне. В дискретних каналах, приймальні пристрої яких використовуються для формування сигналу синхронізації, бітові помилки можуть виникати в періоди сильного впливу завад [2].

Частковим випадком бітових помилок є прослизання. Прослизанням називається повторення або виключення групи символів в синхронній або квазісинхронній (майже синхронній) послідовності символів в результаті різниці між швидкостями зчитування і запису в буферній пам'яті. У випадку відсутності буферної пам'яті прослизання виникають по мірі накопичення фазового зсуву (вандера) сигналів передачі і прийому. На практиці прослизання проявляються у вигляді секунд неготовності каналу (UAS) [2]. Вимірювання коефіцієнта бітової помилки BER проводиться не тільки при втраті великого масиву даних. Вимірювання BER проводять сучасними методами без відключення основного інформаційного каналу [1]. В цьому випадку час, протягом якого відбувалася втрата (для прослизання втрачається 1-3 цикли інформації), зчитується як час неготовності каналу. На практиці такі причини, як порушення зв'язку лінії, частковий обрив проводу, також будуть визивати появу параметра UAS, в такому випадку

¹ <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1154>

визначити працездатність системи синхронізації і її вплив на параметри мережі шляхом простого контролю параметрів цифрового каналу по BER не завжди можливо. Тому в системі зв'язку повинні проводитися окремі вимірювання по знаходженню і визначенню параметрів бітових помилок, в іншому випадку неможливо гарантувати, що система синхронізації не може стати причиною погіршення якості прийому [2]. Нормування параметрів прослизання приведено в рекомендації ITU-T G.822 [3].

Результати аналізу досліджень і публікацій показали, що оцінювання бітової помилки при різних видах демодуляції дискретних сигналів достатньо детально розглянуто в роботах українських вчених: А.Г. Зюко, І.П. Панфілова, В.К. Стеклова, Д.Д. Кловського, І.Г. Бакланова та інших авторів. Стосовно питань сучасної теорії оцінювання бітової помилки, яка стосується розробки та розвитку загальнотеоретичного та математичного апарату, то необхідно відзначити ряд зарубіжних вчених та дослідників: E. James Gilley, K. Chy Deepak, Md. Khaliluzzaman, A. Sudhir Babu, K.V Sambasiva Rao, D.H. Wolaver, A. Morello, O. Edfors, M. Sandell, J.- J. van de Beek, S.K. Wilson, P.O. Borjesson, Y. Li, L. J. Cimini, N.R. Solenberger, T. Onizawa, M. Mizoguchi та M. Morikura.

Проте застосування результатів досліджень цих авторів зв'язане з численними наближеннями, при яких контроль бітових помилок зводиться до імовірнісних співвідношень. Дослідники вважають, що контроль бітової помилки має велике значення для забезпечення якісного і безперебійного зв'язку [4, 5]. На їхню думку важливим є оцінювання оптимальних значень співвідношень сигнал-шум при випадкових значеннях бітової помилки. Але вони практично не проводять оцінки бітової помилки прийнятих дискретних сигналів при мінімальних значеннях сигнал-шум. Тому важливим є проведення теоретичного дослідження і моделювання процесів в цифрових каналах зв'язку для здійснення оцінювання похибки вимірювання та прогнозування коефіцієнта бітових помилок BER в залежності від співвідношення С/Ш.

Теоретичний аналіз

Повідомлення, які складаються з N сигналів, найкраще характеризувати за допомогою автокореляційної функції і спектральної густини. Кореляційна функція описується виразом [1]:

$$R_{ij}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T u_{si}(t) \cdot u_{ij}(t - \tau) dt,$$

де T – тривалість сигналу, $i = \overline{1, N}$ і $j = \overline{1, N}$ – номер сигналу; $R_{ij}(i \neq j)$ – взаємокореляційна функція, R_{ij} – автокореляційна функція; $u_{si}(t)$ і $u_{ij}(t - \tau)$ – спектральна густина сигналу і його копії зсуненої в часі на τ .

Спектральна густина потужності визначається як пряме перетворення Фур'є від автокореляційної функції:

$$u_s(f) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{ij}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} dt.$$

При цьому енергетична відстань між сигналами:

$$D_{ij} = \int_0^T ((u_{si}(t) - u_{sj}(t)) \cdot (u_{si}(t) - u_{sj}(t))^*) dt,$$

де знак * – це знак комплексного спряження.

Відстань між сигналами, яку отримують в точці прийому, зв'язана з ймовірністю бітової помилки $P_{ном}$. Для прикладу наведемо визначення ймовірності бітової помилки для гаусівського каналу і двійкової модуляції:

$$P_{ном} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{D_{1,2}}{2 \cdot k \cdot T_{ш} \cdot \Delta F}} \right) \right], \quad (1)$$

де k – коефіцієнт Больцмана, $T_{ш}$ – температура шуму, ΔF – смуга приймального тракту, $\Phi(x)$ – функція Лапласа, $D_{1,2}$ – відстань між 1 і 2 складовими сигналами.

У випадку двійкової фазової маніпуляції (ФМн) спектральна густина визначається з формули:

$$u_s(t) = A^2 \cdot T_c \frac{\sin^2(2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_c)}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_c)},$$

де $A^2 \cdot T_c = E_c$ – енергія сигналу.

Відстань між сигналами для такого виду маніпуляції визначається з формули:

$$D_{1,2} = 2 \cdot \sqrt{E}$$

Взаємкореляційна функція $R_{1,2} = -1$, тому ці сигнали часто називають протилежними.

При цьому ймовірність бітової помилки при двійковій ФМн (PSK) визначається згідно виразу (4):

$$P_{номPSK} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{2 \cdot E}{N_0}} \right) \right],$$

де N_0 – спектральна густина білого шуму, E – енергія ФМн сигналу.

При використанні в системах передачі інформації багатопозиційних сигналів ФМн, відстань між ними визначається за виразом:

$$D_{i,i+1} = \sqrt{E \left(2 - 2 \cos \frac{2 \cdot \pi}{M} \right)} = 2 \cdot \sqrt{E} \sin \frac{\pi}{M}, \quad (2)$$

Тобто $D_{1,2} = 2 \cdot \sqrt{E}$ при $M=4$, а $D_{1,2} = 2 \cdot \sqrt{0,6E}$ при $M=8$, де M – кількість альтернативних символів бітової послідовності.

В подальшому із збільшенням M відстань між складовими сигналу буде зменшуватися в $k = \log_2 M$, тому багатопозиційна ФМн використовується тільки у випадках $M \leq 8$.

Ймовірність бітової помилки в гаусівському каналі для багатопозиційної ФМн визначається згідно виразу (1):

$$P_{\text{пом MPSK}} = 2 \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_0 \log_2 M}{N_0} \sin \frac{\pi}{M}} \right) \right], \quad (3)$$

де $E_0 \log_2 M$ – енергія на один символ.

Зважаючи на вирази (2) і (3) для оцінювання параметрів бітових помилок, важливим є збільшення відстані між складовими сигналу, оскільки за рахунок цього значно зменшується ймовірності бітової помилки.

В свою чергу для частотної маніпуляції (ЧМн або FSK) кореляційні функції системи складових сигналу визначаються:

$$R_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

Це свідчить про те, що сигнали є ортогональними. Рознесення між сигналами зазвичай обирають $\Delta f = 1/2T$. Завадостійкість цих сигналів залежить від типу приймача (когерентний або не когерентний прийом).

$$P_{\text{пом FSK}} = 0,5 \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right], \quad (4)$$

де E_b/N_0 – відношення енергії сигналів, що витрачається на передачу одного символу, до питомої потужності шуму.

Можливість оцінювання бітових помилок модульованих сигналів залежить від типу приймача і відстані між сигналами, яку можна обирати в залежності від типу двійкової інформації [6]. Тому ефективність модуляції характеризують значенням ймовірності бітової помилки на виході приймача, яку визначають за виразом (4). Отримані ймовірнісні співвідношення також будуть виконуватися для інших видів (MSK, FSK, GMSK, PAM, QAM) демодуляції дискретних сигналів.

Контроль BER при демодуляції дискретних сигналів

Кожен тип дискретної модуляції вимагає певного мінімального значення відношення рівня сигналу до шуму. Крім відношення сигнал-шум (С/Ш) важливим є значення BER після демодуляції дискретних сигналів [4]. Будь-яка дискретна модуляція буде вважатися достатньо ефективною, якщо значення бітової помилки не буде перевищувати допустимого рівня.

Знаючи, як змінюється значення коефіцієнта бітових помилок при зміні співвідношення сигнал-шум, можна досить легко за вимірним більш високим значенням BER визначити дійсне. Для того, щоб використати цей метод, треба знати спосіб модуляції та тип завадостійкого кодування, що використовуються в даній системі зв'язку [1].

Використовуючи середовище програми MATLAB [6], проведемо оцінювання завадостійкості двійкової ЧМн у випадку когерентної і некогерентної демодуляції. Для цього змодельємо випадковий інформаційний сигнал і промодулюємо його за законами ЧМн. Після цього додамо до нього шум і дослідимо ефективність різних методів демодуляції. Для цього згенеруємо М-файл в системі MATLAB:

```

N = 100000; % число переданих біт
x = randint(N, 1); % цифрове повідомлення
M = 2; % двійкова ЧМн маніпуляція
Fd = 360; % символна швидкість
Fs = 9600; % частота дискретизації
f0 = 1180; % частота "нуля"
f1 = 980; % частота "одиниці"
Fc = (f1 + f2)/2; % середня частота
tone = f2 - f1; % різниця частот
s = dmod(x, Fc, Fd, Fs, 'fsk', M, tone); % ЧМн сигнал
snr = -10:10; % вектор відношення С/Ш (в децибелах)
for k = 1:length(snr)
    sn = awgn(s, snr(k), 'measured'); % додавання шуму
    y_c = ddemod(sn, Fc, Fd, Fs, 'fsk', M, tone); % когерентна демодуляція
    % некогерентна демодуляція
    y_nc = ddemod(sn, Fc, Fd, Fs, 'fsk/noncoherence', M, tone);
    % розрахунок імовірності бітових помилок на виході приймача
    [n_err, er_c(k)] = sumerr(x, y_c);
    [n_err, er_nc(k)] = sumerr(x, y_nc);
end
% побудова графіка
semilogy(snr, er_c, snr, er_nc)

```

Приведений графік (рис. 1) показує залежність BER від відношення С/Ш (сигнал/шум у децибелах). Перша крива відповідає когерентній демодуляції, друга – некогерентній. Видно, що програш некогерентного варіанту демодуляції когерентному складає від 1 до 2,5 дБ.

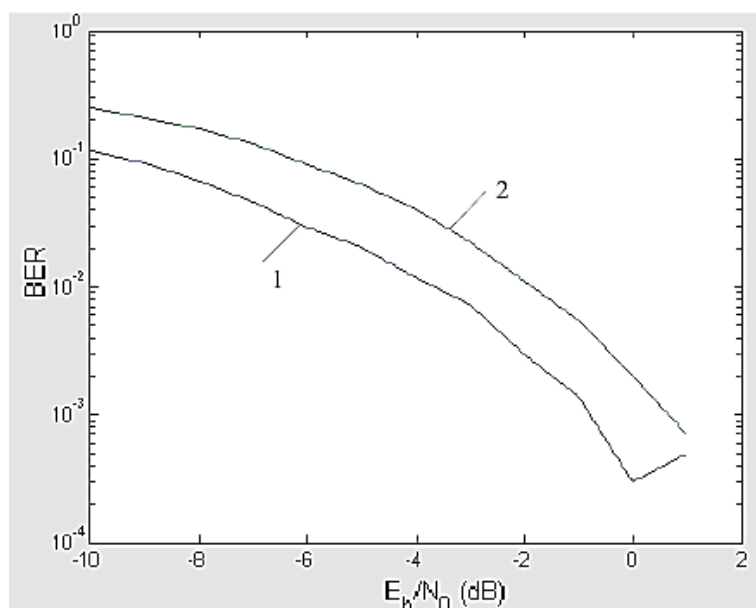


Рис. 1. Значення BER для ЧМн при когерентній (1) і некогерентній (2) демодуляції

З графіка добре видно, що значення коефіцієнта BER для ЧМн сигналів не високе навіть при відношенні С/Ш=0 дБ. При цьому імовірність помилки складає $2 \cdot 10^{-4}$ для когерентної демодуляції і $1,5 \cdot 10^{-3}$ для некогерентної. Це означає, що контроль бітової помилки має значення тільки при значеннях співвідношення С/Ш ≤ 0 .

Використовуючи інструмент моделювання BERTool програмного середовища MATLAB, проведемо розрахунок зміни BER в системі зв'язку з двійковою ФМн від відношення С/Ш у дБ (E_b/N_0). Використовуючи засоби MATLAB Simulink, отримуємо модуляційну модель системи прийому/передачі дискретних сигналів, див. рис. 2.

Ініціалізація параметрів моделі зв'язку здійснюється у вікні MATLAB Command Window командою `set_param('New 1','preLoadFcn','EbNo=0; maxNumErrs = 100; maxNumBits = 1e8;')`.

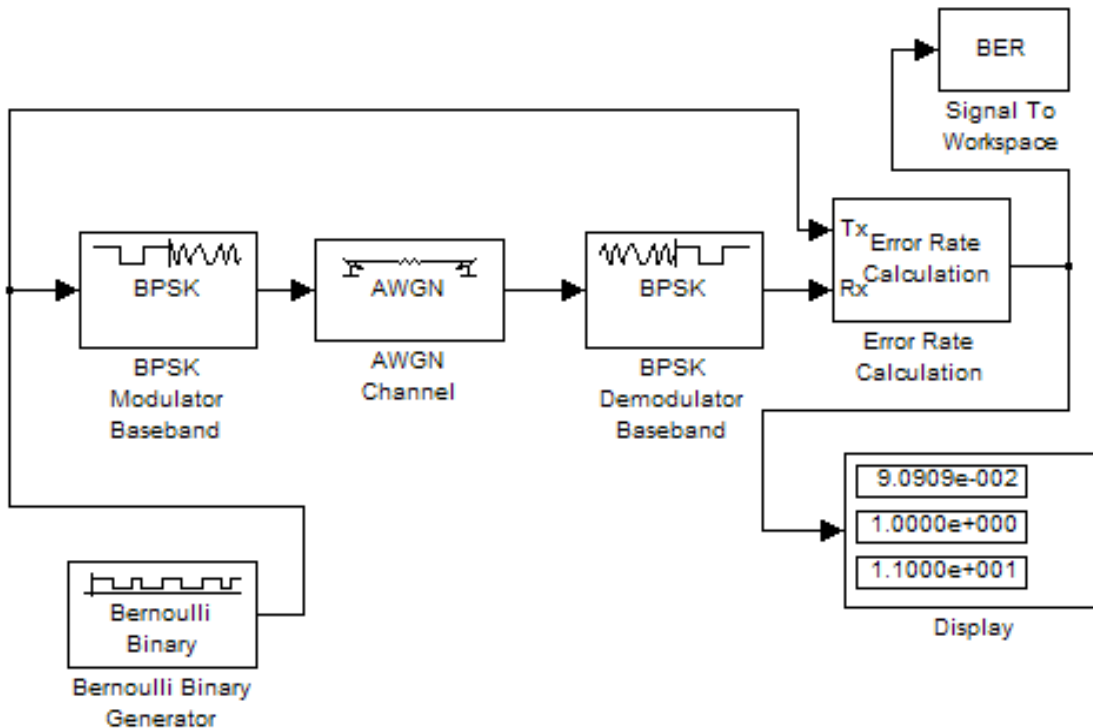


Рис. 2 Модель системи передачі/прийому інформації з BPSK

В якості каналу зв'язку в системі зв'язку використано AWGN (Additive White Gaussian Noise) канал з білим гаусівським шумом, який близький до реального, складного вхідного сигналу. Вікно інструменту BERTool та результати теоретичної кривої, яка була отримана в результаті симуляції залежності відношення С/Ш при зміні BER, зображено на рис. 3.

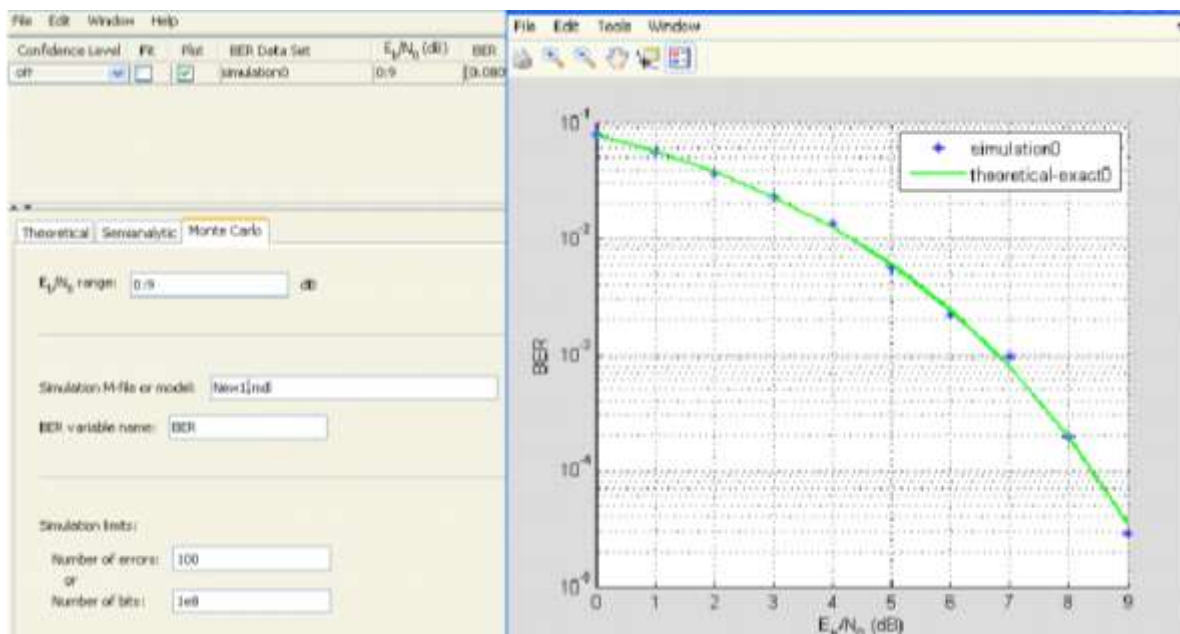


Рис. 3. Результати оцінювання BER в системі зв'язку з BPSK (двійкова ФМн)

Отже, однією з головних проблем, що виникають під час вимірювання BER, є значна тривалість вимірювання. Вимірюване значення BER є лише оцінкою його справжньої величини. Слід особливо підкреслити, що ця оцінка BER буде абсолютно точною тільки при нескінченно великій кількості переданих бітів. А передача нескінченного числа бітів займає нескінченно великий проміжок часу. Строго кажучи, коли число бітів обмежене, результатом вимірювання BER є не ймовірність помилки, а її оцінка. Очевидно, що рівень достовірності цієї оцінки (Confidential Level, CL), який також називають довірчою ймовірністю, залежить від кількості зареєстрованих помилок і від загального числа переданих бітів. Тому в подальшому важливим є дослідження і оцінювання вставок і випадань бітів в інформаційній послідовності, що дозволить значно зменшити час вимірювання.

Висновки

1. Проведене порівняння цифрових видів модуляції з метою ефективного використання їх в системах передачі інформації. Порівняння було здійснене за допомогою кореляційної функції, спектральної густини та енергетичної відстані між сигналами. Було доведено, що за рахунок цього можна здійснювати оцінювання значення BER для деяких видів модуляції дискретних сигналів.

2. Визначено, що важливими параметрами для визначення завадостійкості сигналів дискретної модуляції є автокореляційна функція, енергетична відстань між сигналами та ймовірність бітової помилки. В цьому випадку завадостійкими є протилежні і ортогональні сигнали, при $R_{1,2} = -1$. Як видно із проведеного моделювання, перехід на високошвидкісні та спектрально-ефективні методи модуляції пов'язаний з застосуванням при формуванні та детектуванні інформації квадратурних та когерентних методів

демодуляції.

3. Рівень коефіцієнта бітових помилок є важливим параметром для визначення завадостійкості дискретних методів модуляції. Результати моделювання в MATLAB продемонстрували, що за відношення С/Ш=0 імовірність бітової помилки для когерентної демодуляції складає $2 \cdot 10^{-4}$ і для некогерентної демодуляції – $1,5 \cdot 10^{-3}$.

Перелік посилань

1. Бакланов И.Г. Методы измерений в системах связи / И. Г. Бакланов – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 1999. – 196 с.
2. Кичак В.М. Підвищення завадостійкості при прийомі ЧМн дискретних сигналів / В.М. Кичак, В.Д. Тромсюк // Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник "Радіотехніка". – 2014. – № 178. – С. 24-30.
3. Controlled slip rate objectives on an international digital connection : ITU Recommendation G.822, ITU-T.
4. Babu A. Sudhir Evaluation of BER for AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channels under Various Modulation Schemes / A. Sudhir Babu, K.V Sambasiva Rao // International Journal of Computer Applications. – 2011. – Vol 26, No.9.
5. Chy Deepak K. Evaluation of SNR for AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channels Under DPSK Modulation Scheme with Constant BER / Deepak K. Chy , Md. Khaliluzzaman // International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing. – 2015. – Vol. 6, No.6. – pp. 7-12.
6. Gilley J. E. Bit-Error-Rate Simulation Using Matlab / James E. Gilley ; Transkrypt international INC. – 2003. – pp. 1-8.

References

1. Baklanov I.G. (1999) *Metody izmerenii v sistemakh svyazi*[Measurement methods in communication systems]. Moskov, EKO-TRENDZ Publ., 196 p.
2. Kychak V.M. and Tromsiuk V.D. (2014) *Pidvyshchennia zavadostiikosti pry pryiomii ChMn dyskretnykh syhnaliv* [Improve noise immunity at reception frequency modulated digital signals], *Vseukrainskyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk "Radiotekhnika"*, Iss. 178, pp. 24-30.
3. *Controlled slip rate objectives on an international digital connection*. ITU Recommendation G.822.
4. A. Sudhir Babu and Dr. K.V Sambasiva Rao (2011) Evaluation of BER for AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channels under Various Modulation Schemes, *International Journal of Computer Applications*, Vol. 26, No. 9.
5. Chy Deepak K., Khaliluzzaman Md. (2015) Evaluation of SNR for AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channels Under DPSK Modulation Scheme with Constant BER, *International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol. 6, No.6, pp. 7-12.
6. Gilley James E. (2003) *Bit-Error-Rate Simulation Using Matlab*, Transkrypt international, INC., pp. 1-8.

Кичак В. М., Тромсюк В. Д. Оцінювання бітових помилок при різних видах демодуляції дискретних сигналів. В роботі досліджено можливість оцінювання бітової помилки (BER) для деяких цифрових методів модуляції/демодуляції в системах зв'язку та передачі інформації. Розглянуто особливості оцінювання BER для основних методів

демодуляції цифрових інформаційних систем з метою виявлення загальних закономірностей і підвищення ефективності цих методів.

Ключові слова: імовірність бітової помилки (BER), методи демодуляції, MATLAB.

Кичак В. М., Тромсюк В. Д. Оценка битовых ошибок при различных видах модуляции дискретных сигналов. В работе исследована возможность оценки битовой ошибки (BER) для некоторых цифровых методов модуляции/демодуляции в системах связи и передачи информации. Рассмотрены особенности оценки BER для основных методов демодуляции цифровых информационных систем с целью выявления общих закономерностей и повышения эффективности этих методов.

Ключевые слова: вероятность битовой ошибки (BER), методы демодуляции, MATLAB.

Kychak V. M., Tromsiuk V. D. Evaluation of bit errors in different types demodulation discrete signals.

Introduction. The introduction describes the main characteristics of bit errors. These sources of bit errors in discrete channels. Also listed scientists who worked on the study opportunities monitoring bit error in discrete channels.

The main purpose of the article is to conduct research and theoretical modeling of processes in discrete channels to control error measurement and forecasting parameter BER bit error depending on the signal/noise ratio.

Theoretical analysis. A comparison of some types of digital modulation for effective use in systems transmitting information. Comparisons were made using the correlation function, power spectral density and distance between signals. It was proved that through this you can control the real value of bit error (BER) for each type of modulation. Important here is the dependence of the BER signal/noise ratio in the test communication channel. Determined that efficiency could be described bit error probability value of the output of the receiver, which is determined by the expression (4).

Control parameters BER modulation in digital signals. At this paragraph the examples of control parameter BER at different modulation signals. The simulation results show that with an increase in the signal/noise bit error probability for different types of demodulation will decrease.

Keywords: bit error rate (BER), demodulation methods, MATLAB.