

## МОДЕЛЮВАННЯ СПОТВОРЕНЬ СИГНАЛУ У КАНАЛІ ПЕРЕДАЧІ

*Передача інформаційного сигналу каналом зв'язку супроводжується додаванням адитивного білого гаусового шуму, дією промислових завод, атмосферних завод тощо. Крім того, сигнал може мати додаткове зміщення частоти і фази, що обумовлене рухом приймача відносно передавача. Стаття присвячена дослідженню впливу перерахованих явищ на залежності кількості помилок у каналі зв'язку від відношення сигнал-шум. Проведено дослідження якості сузір'я і око-діаграм на вході приймача цифрової системи зв'язку з модуляцією QPSK за наявності зміщення фази у середовищі розповсюдження.*

*Ключові слова:* адитивний білий гаусовий шум, канал зв'язку, фазовий шум, спотворення.

I. PYATIN, D. MAKARYSHKIN, O. VOYEVODKO

Khmelnitskyi National University

## SIMULATION OF SIGNAL DISTORTIONS IN THE TRANSMISSION CHANNEL

*The transmission of the information signal by the communication channel is accompanied by the addition of additive white Gaussian noise, the action of industrial interference, atmospheric interference; frequency and phase shift of the signal, which may be caused by the mutual movement of the antenna of the transmitter and receiver or the mismatch of their local oscillators, caused by the instability of the reference frequency sources; signal delay in the communication channel caused by the propagation of the signal from the transmitter antenna to the receiver antenna and in the feeder systems; fading caused by multi-beam propagation of the signal from the transmitter to the receiver, the phenomena of refraction in the atmosphere and reflections from various objects. The article is devoted to the study of the influence of the listed phenomena on the dependence of the number of errors in the communication channel on the signal-to-noise ratio. A study of the quality of constellations and eye diagrams at the input of the receiver of the digital communication system with QPSK modulation in the presence of phase and frequency shift in the propagation medium, the presence of phase noise, imbalance of the quadrature components of the signal. The main reasons for the deterioration of the quality of the communication channel are the reduction of the signal-to-noise ratio, phase and amplitude distortions. When processing and evaluating a digital signal, an important factor of quality is the parameter of intersymbol interference. Due to the imperfection of the components of the analog part of the communication system, there is an imbalance of in-phase and quadrature components of the signal. Insufficient suppression of the mirror channel causes deterioration of the modulus of the error vector in the receiver, which leads to an increase in the frequency of error bits. It is also necessary to take into account the deterioration of the signal due to the presence of thermal noise and signal attenuation due to the distance from the transmitter to the receiver.*

*Keywords:* additive white Gaussian noise, communication channel, phase noise, distortion.

### Постановка задачі

Останнім часом під час побудови цифрових систем зв'язку все більше функцій, що традиційно виконуються аналоговими пристроями, реалізуються на базі цифрових сигнальних процесорів (ЦСП). В поєднанні з додаванням ЦСП межа між аналоговим і цифровим сегментами систем зв'язку, що розділені АЦП, розташовується ближче до антени. Системи зв'язку стають програмно керованими.

Програмно кероване радіо (SDR) включає аналогові компоненти: антени, попередні фільтри, комутатори, попередні підсилювачі і підсилювачі потужності, та цифрові компоненти: GPP (процесор загального застосування); DSP (цифровий сигнальний процесор); FPGA (програмована користувачем матрична БІС); ASIC (спеціалізована інтегральна схема). З цими уніфікованими обчислювальними і керуючими вузлами можна реалізувати велику кількість різноманітних функцій, наприклад, модуляцію, демодуляцію, фільтрацію, кодування. Схема ASIC не програмується, а спеціально розробляється для кожного варіанту застосування. Для неї характерні низькі витрати на виробництво, невелика споживана потужність і висока продуктивність.

Матричні БІС (FPGA) незамінні в програмних радіопристроях завдяки високій продуктивності і програмуваності. Їх обчислювальна продуктивність набагато вище, ніж у DSP або GPP. Це обумовлено можливістю квазіпаралельної обробки даних. Основними перевагами DSP і GPP є їх програмуваність і можливість перебудови конфігурації.

### Аналіз досліджень та публікацій

У загальному випадку при проектуванні системи зв'язку необхідно враховувати такі основні фактори, що впливають на сигнал при його поширенні в каналі зв'язку [1]:

- вплив адитивного білого гаусового шуму (теплого шуму);
- частотне і фазове зміщення сигналу, що може бути викликане взаємним рухом антени передавача і приймача або неузгодженістю їх гетеродинов, викликане нестабільністю джерел опорної частоти;
- затримка сигналу в каналі зв'язку, що викликано розповсюдженням сигналу від антени передавача до антени приймача і в фідерних системах;
- завмирання, викликані багатопроменевим поширенням сигналу від передавача до приймача, явищами рефракції в атмосфері і перевідбиваннями від різних об'єктів.

При моделюванні систем зв'язку на персональному комп'ютері особливу увагу необхідно

приділити питанням затримки сигналу в каналі зв'язку. Оскільки моделювання на комп'ютері принципово може бути тільки дискретним в області часу, для проведення коректних досліджень систем синхронізації приймального пристрою необхідно створювати дробову затримку в каналі зв'язку.

В системах передавання даних при неідеальному каналі зв'язку сигнали спотворюються, тому ці спотворення необхідно враховувати та за можливості коректувати. В каналі зв'язку (КЗ), як правило, діють різні види завад, а також мають місце лінійні і нелінійні спотворення сигналів [1].

#### Виділення невіршених частин

Розглянемо математичну модель сигналу на вході приймача. Нехай передавач формує цифрову інформацію за допомогою  $m$  сигналів  $s(t) = \{s_m(t)\}$ , де  $m$  – кількість точок у сигнальному сузір'ї цифрової модуляції [1]. Канал спотворює сигнал за допомогою адитивного білого гаусового шуму (АБГШ). Таким чином, сигнал на вході приймача на інтервалі  $0 \leq t \leq T$  можна записати виразом [2]:

$$r(t) = s_m(t) + n(t),$$

де  $n(t)$  означає реалізацію АБГШ з двобічною спектральною густиною потужності  $\Phi_m(f) = N_0/2$ .

Положимо, що на вхід узгодженого фільтра, за яким розташований пристрій дискретизації, надходить сигнал  $r(t)$ . Сигнал на виході узгодженого фільтра можна представити за допомогою передаточної функції фільтра  $H(f)$  і спектральної густини сигналу на вході  $S(f)$ :

$$s_{\text{вф}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f)S(f)e^{j2\pi ft} df$$

Дисперсія шуму на виході  $\sigma_0^2$  визначається виразом:

$$\sigma_0^2 = \frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 df$$

Приймач складається з двох частин: демодулятор сигналу і детектор. Функція демодулятора складається у перетворенні сигналу  $r(t)$  у вектор  $r = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$ . Функція детектора полягає у вирішенні, який з можливих сигналів  $m$  був переданий [2].

У вказаних дослідженнях недостатній аналіз спотворень сигналу в каналі передачі за наявності частотного і фазового зміщення модульованого сигналу, фазового шуму, дисбалансу квадратурних складових сигналу. Стаття присвячена дослідженню впливу каналу зв'язку на якісні характеристики сигналу з QPSK: діаграму сузір'я модуляції і око-діаграму.

#### Спотворення сигналу у системі зв'язку

Величиною, яка характеризує ефективність цифрової системи зв'язку, є пропускна здатність [біт/с]. Пропускна здатність – це кількість інформації, яку можна передати в системі зв'язку в одиницю часу. Верхня межа пропускної здатності при заданому відношенні сигнал/шум і доступній смузі частот задається теоремою Шеннона [3]:

$$C = W \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (1)$$

де  $C$  – пропускна здатність (біт/с);  $W$  – доступна ширина смуги пропускання системи (Гц),  $S$  – середня потужність прийнятого сигналу,  $N$  – середня потужність шуму. Врахуємо, що середня потужність шуму залежить від ширини смуги:  $N = N_0 W$ , де  $N_0$  – спектральна густина потужності шуму. При дослідженні системи зв'язку будемо користуватись не відношенням сигналу до шуму, а величиною  $E_b/N_0$  – відношенням енергії біта до густини потужності шуму, оскільки отримані при цьому співвідношення містять мінімальну кількість вторинних величин. З'ясуємо наступне: енергія біта – енергія, необхідна для передачі одного біта інформації, яку представимо як добуток потужності передавача на тривалість біта. Перетворимо співвідношення (1) до еквівалентного вигляду:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{W}{C} (2^{C/W} - 1) \quad (2)$$

та встановимо залежність  $C/W$  відношення пропускної здатності до доступної смуги від енергетичної характеристики системи –  $E_b/N_0$ . Встановлюємо чим більше  $E_b/N_0$ , тим більше інформації можна передати в одній і тій же смузі. Чим менше  $E_b/N_0$ , тим більша смуга потрібна для передачі однакової кількості інформації.

Передавач цифрової системи зв'язку з модуляцією 4-QAM при передачі каналом зв'язку з відношенням сигнал–шум 40 dB представлений на рис. 1.

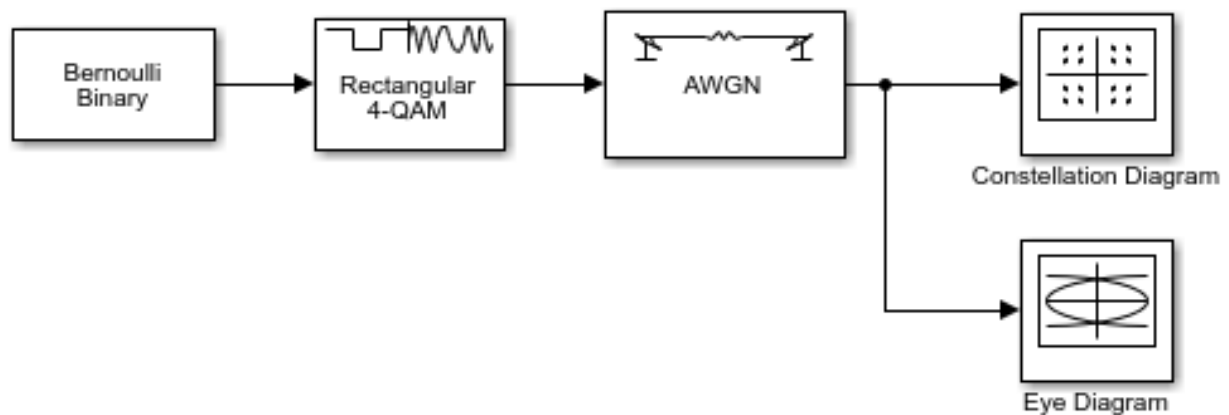


Рис. 1. Simulink модель передавача цифрової системи зв'язку з модуляцією QPSK

Сигнальне сузір'я (Constellation diagram) – відображення значень комплексної амплітуди модульованих радіосигналів на комплексній площині. Для моделі рис. 1 сигнальне сузір'я наведено на рис.2. Око-діаграма наведена на рис. 3.

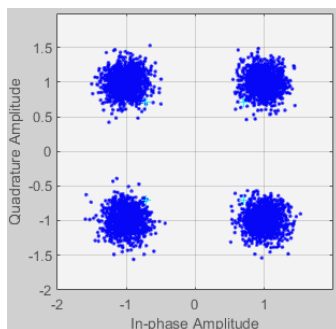


Рис. 2. Сигнальне сузір'я моделі (рис. 1)

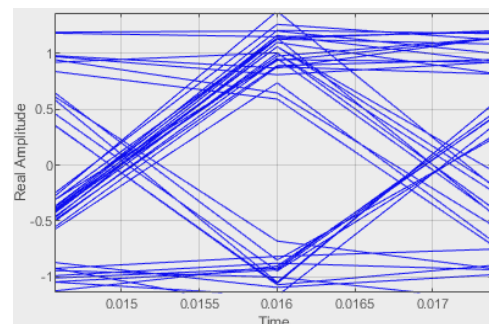


Рис. 3. Око-діаграма моделі (рис. 1)

Значення комплексної амплітуди радіосигналу представляються у вигляді точок на двовимірній діаграмі. На діаграмі показані всі значення, які можуть бути обрані даною схемою маніпуляції. Сигнальні сузір'я, отримані в результаті вимірювання комплексної амплітуди радіосигналу можуть використовуватися для визначення типу маніпуляції, роду інтерференції і рівня спотворень.

Око-діаграма (eye diagram) – це поширений індикатор якості сигналів в високошвидкісних цифрових системах передачі. Осцилограф формує око-діаграму, накладаючи розгортки різних сегментів довгого потоку даних, керовані головним джерелом синхронізації. Фронт запуску може бути позитивним або негативним, але відображається імпульс, який з'являється після періоду затримки, може йти в будь-якому напрямку; немає способів заздалегідь дізнатися значення довільного біта. Отже, коли накладено багато таких переходів, позитивні і негативні імпульси накладаються один на одний. Накладання багатьох бітів дає око-діаграму.

В ідеальному випадку око-діаграми мають вигляд прямокутника. У реальності канали зв'язку не ідеальні, тому переходи не вирівняні один з одним, і в результаті виходить малюнок у формі ока. Форма око-діаграми на осцилографі буде залежати від різних типів сигналів запуску, таких як сигнал запуску з тактовою частотою потоку, сигнал запуску з поділеною тактовою частотою потоку, запуск по кодовій комбінації.

Причини помилок фази і частоти несучої: локальний генератор передавача, що використовуються для модуляції і перетворення з підвищенням частоти; локальний генератор приймача, що використовується для перетворення з пониженням частоти і демодуляції; підвищуючі/понижуючі перетворювачі в повторювачах; доплерівській зсув частоти в мобільних каналах.

Передавач цифрової системи зв'язку з модуляцією 4-QAM і наявністю зміщення фази і частоти у каналі зв'язку наведений на рис. 4.

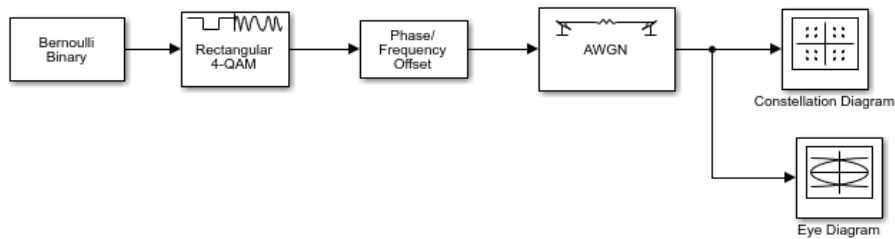


Рис. 4. Simulink модель передавача цифрової системи зв'язку з наявністю зміщення фази і частоти в каналі передачі

Фазова помилка несучої відповідає повороту сузір'я:  $\overline{A}_k = e^{j\varphi} A_k$ .

Для моделі рис. 4 сигнальне сузір'я наведено на рис. 5. Око-діаграма представлена на рис. 6.

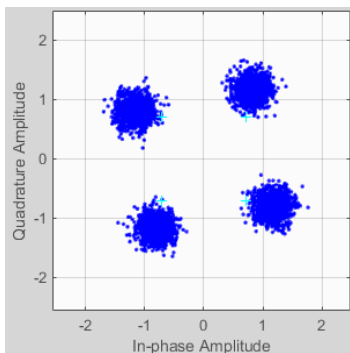


Рис. 5. Сигнальне сузір'я моделі (рис. 4) з наявністю Phase Offset=10°

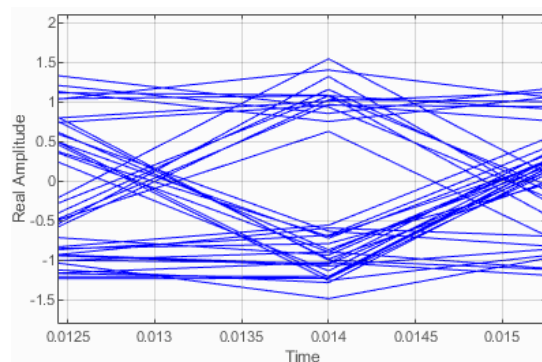


Рис. 6. Око-діаграма моделі (рис. 4) з наявністю Phase Offset=10°

Наявність зміщення частоти Frequency Offset=0,0001 викликає обертання сузір'я проти годинникової стрілки. Для моделі рис. 4 в цьому випадку сигнальне сузір'я наведено на рис. 7. Око-діаграма – на рис. 8.

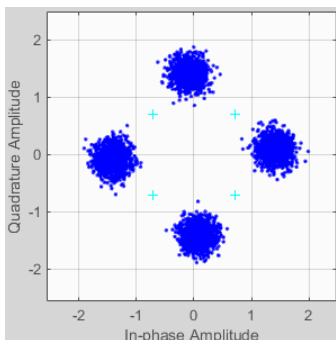


Рис. 7. Сигнальне сузір'я моделі (рис. 4) з наявністю Frequency Offset=0,0001

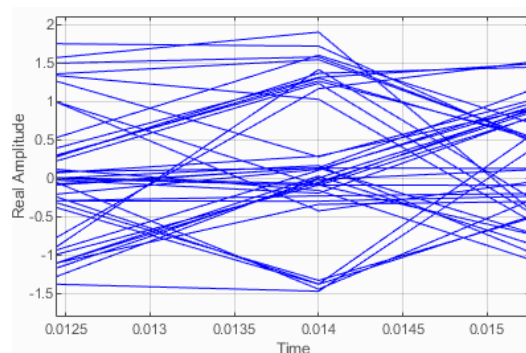


Рис. 8 Око-діаграма моделі (рис. 4)

Помилка несучої частоти  $\Delta\omega$  відповідає обертанню сузір'я в часі  $\overline{A}_k = e^{j\Delta\omega T} A_k$ . Ці ефекти можуть бути компенсовані комплексним множником, що додається в ході обробки радіосигналу.

Передавач цифрової системи зв'язку з модуляцією 4-QAM і додаванням фазового шуму у каналі передачі наведений на рис. 9

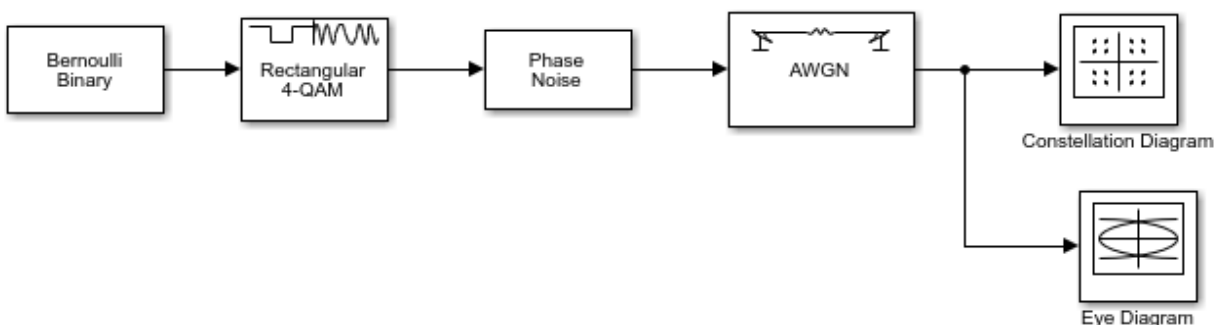


Рис. 9. Simulink модель передавача цифрової системи зв'язку з наявністю фазового шуму

Блок Phase Noise додає фазовий шум до комплексної згинаючої вузькосмугового сигналу.

Параметри фазового шуму:

Phase noise level [-60, -80] dBc/Hz; Frequency offset [20, 200] Hz; Sample rate 1024 Hz; Initial seed 2137.

Для моделі рис. 9 сигнальне сузір'я наведено на рис. 10. Око-діаграма наведена на рис. 11.

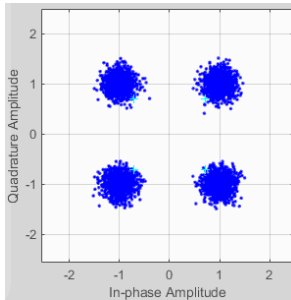


Рис. 10. Сигнальне сузір'я моделі (рис. 9)

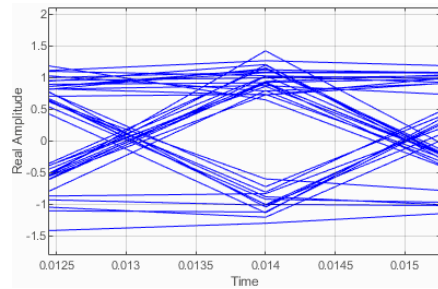


Рис. 11. Око-діаграма моделі (рис. 9)

Передавач цифрової системи зв'язку з модуляцією 4-QAM при передачі каналом зв'язку з відношенням сигнал-шум 40 dB і наявністю I/Q Imbalance представлений на рис. 12.

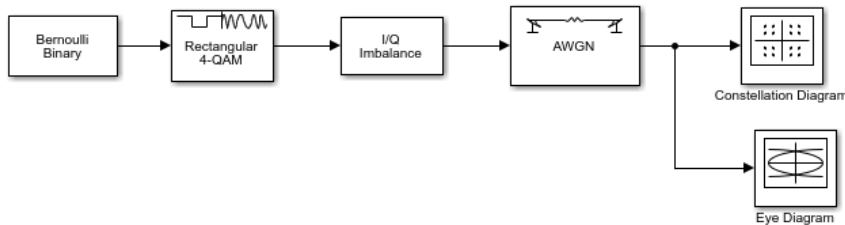


Рис. 12. Simulink модель передавача цифрової системи зв'язку з наявністю дисбалансу квадратурних складових сигналу

Метод безпосередньої модуляції з використанням комплексних сигналів все частіше застосовується при реалізації сигнальних трактів передавачів в базових станціях систем стільникового зв'язку, системах WiMAX, бездротових системах тощо. Даний метод полягає в безпосередній модуляції високочастотної несучої квадратурними (IQ) сигналами з виходу цифро-аналогового перетворювача (архітектура прямого перетворення), що позбавляє від необхідності в проміжному каскаді ПЧ і супутніх схемах фільтрації.

Для моделі рис. 12 при amplitude Imbalance 10 dB сигнальне сузір'я наведено на рис. 13. Око-діаграма наведена на рис. 14.

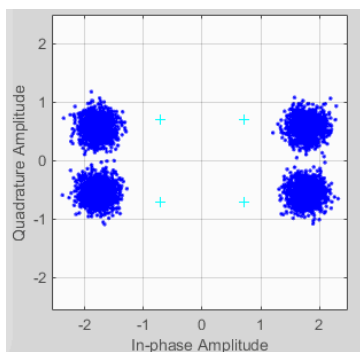


Рис. 13. Сигнальне сузір'я моделі (рис. 12)

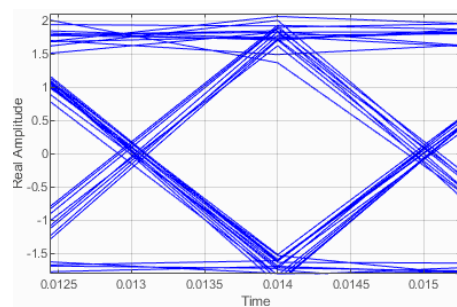


Рис. 14. Око-діаграма моделі (рис. 12)

Через неідеальність компонентів аналогової частини системи зв'язку з'являється дисбаланс синфазної і квадратурної складових сигналу. Передбачається, що в цифровій області квадратурні сигнали ідеально узгоджені. Таким чином, обговорювані джерела неузгодженості мають місце тільки в аналоговій частині сигнального тракту.

**Висновки**

Проведено дослідження якості сузір'я і око-діаграм на вході приймача цифрової системи зв'язку з модуляцією QPSK за наявності частотного і фазового зміщення модульованого сигналу, фазового шуму. Енергетична ефективність не когерентної цифрової системи зв'язку з модуляцією QPSK при виникненні фазового зміщення 30° у середовищі розповсюдження зменшується на 10 дБ. Наявність зміщення частоти суттєво впливає на енергетичну ефективність системи зв'язку.

Енергетична ефективність цифрової системи зв'язку зменшується на 10 дБ при виникненні зміщення частоти 0,1 Гц і відсутності символної синхронізації. Наявність зміщення фази у каналі зв'язку

призводить до повороту сигнального сузір'я, наявність зміщення частоти – до обертання сигнального сузір'я цифрової модуляції проти годинникової стрілки. Через неідеальність компонентів аналогової частини системи зв'язку з'являється дисбаланс синфазної і квадратурної складових сигналу з цифровою модуляцією. В цифровій області квадратурні сигнали узгоджені. Недостатнє придушення дзеркального каналу викликає погіршення модуля вектора помилки (Error Vector Magnitude, EVM) в приймачі, що, призводить до підвищення частоти появи помилкових бітів (BER).

#### Література

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – Изд. 2-е, испр. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
2. Прокис Д. Цифровая связь / Д. Прокис ; пер. с англ. ; под ред. Д.Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.
3. Кичак В.М. Оцінка впливу кількісних характеристик зміни інформаційного параметра на завадостійкість каналів зв'язку з КАМн / В.М. Кичак // Вісник Хмельницького національного університету, – 2012. – № 4. – С. 59–62.
4. Кичак В.М. Оцінювання бітових помилок при різних видах демодуляції дискретних сигналів / В.М. Кичак, В.Д. Тромсюк // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2015. – № 63. – С. 55–63.

#### References

1. Sklyar B. Cifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye / B. Sklyar. – Izd. 2-e, ispr. – M. : Izdatelskij dom «Vilyams», 2003. – 1104 s.
2. Prokis D. Cifrovaya svyaz / D. Prokis ; per. s angl. ; pod red. D.D. Klovsogo. – M. : Radio i svyaz, 2000. – 800 s.
3. Kychak V.M. Otsinka vplyvu kilkisnykh kharakterystyk zminy informatsiinoho parametra na zavadostiikist kanaliv zviazku z КАМн / V.M. Kychak // Herald of Khmelnytskyi National University – 2012. – № 4. – С. 59–62.
4. Kychak V.M. Otsiniuvannia bitovykh pomylok pry riznykh vyдах demoduliatsii dyskretnykh syhnaliv / V.M. Kychak, V.D. Tromsiuk // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «KPI». Serii: Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia. – 2015. – № 63. – S. 55–63.

Надійшла / Paper received : 16.11.2020

Надрукована/Printed :27.11.2020