

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВИХ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ/ДЕМОДУЛЯЦІЇ В СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ ТА ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Проведено аналіз цифрових методів модуляції в системах зв'язку та передачі інформації. Розглянуто особливості деяких методів модуляції/демодуляції цифрових систем передачі інформації з метою виявлення загальних закономірностей та відмінностей реалізації цих методів. Здійснена систематизація основних показників, цифрових методів модуляції з метою підвищення ефективності використання спектра частот при передачі інформації. Наведено приклади дослідження особливостей демодуляції та ефективності передавання інформації з допомогою цифрових методів модуляції в середовищі Matlab Simulink.

The analysis of digital methods of modulation in the systems of connection and information transfer is conducted. The features of some methods of modulation/demodulation of the digital systems of information transfer are considered with the purpose of exposure of general conformities to law and differences of realization of these methods. Realizable systematization of basic indexes, digital methods of modulation with the purpose of increase of efficiency of the use of spectrum of frequencies, is at an information transfer. The examples of research of features of demodulation and efficiency of passed to information are resulted with the help of digital methods of modulation in the environment of Matlab Simulink.

Ключові слова: маніпуляція, квадратурний модулятор, когерентний демодулятор, бітова помилка.

### Вступ

Сучасні системи передачі інформації використовують широкий спектр аналогових та цифрових методів модуляції. У випадку цифрової модуляції (маніпуляції), аналоговий несучий сигнал модулюється цифровим сигналом. Це можна охарактеризувати як форму аналого-цифрового перетворення. Зміни в несучому сигналі вибираються для певного числа альтернативних символів (модуляційний алфавіт) [1].

Як і у випадку аналогової модуляції, залежно від того який із параметрів несучого коливання є інформативним, розрізняють основні цифрові методи модуляції (маніпуляції): амплітудна маніпуляція (АМн); частотна маніпуляція (ЧМн); фазова маніпуляція (ФМн); відносна фазова маніпуляція (ВФМн); квадратурна амплітудна маніпуляція (КАМ) (комбінація фазової і амплітудної маніпуляцій з кінцевим числом, як мінімум двох фазових і двох амплітудних коливань).

Варіант класифікації методів модуляції, що використовуються в системах передачі інформації, наведено на рисунку 1. У випадку цифрової модуляції, кожній з фаз, частот і амплітуд привласнюється унікальна послідовність бінарних біт. Зазвичай, кожна фаза, частота і амплітуда кодується однаковою кількістю біт.

Якщо кодове слово складається з  $M=2N$  альтернативних символів, то кожен символ є повідомленням що складається з  $N$  біт. Якщо символна передача вимірюється в кількості символів за секунду, то передача даних вимірюється в бітах за секунду. Наприклад, з алфавітом що складається з 16 альтернативних символів, кожен символ має 4 біта. У відношенні ФМ, АМ і КАМ, алфавіт модуляції часто зручно представляти на діаграмі, що показує амплітуду  $I$  сигналу на осі  $X$ , і амплітуду  $Q$  сигналу на осі  $Y$ , для кожного символу. ФМ і АМ і інколи також ЧМ, можуть бути сформовані і виявлені з використанням принципу КАМ.  $I$  і  $Q$  сигнали можуть бути об'єднані в загальний корисний сигнал який є еквівалентним низькочастотним сигналом або еквівалентним модулюючим сигналом. Це представлення корисного модульованого сигналу (який називають також широкосмуговим сигналом або радіочастотним сигналом).

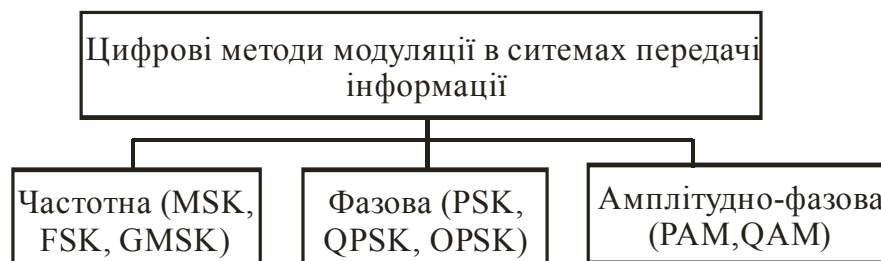


Рис. 1. Класифікація методів модуляції

Основні кроки, які здійснюються модулятором для передачі даних наступні: групування вхідних даних в цифрові слова; запис кодових слів, наприклад амплітуд  $I$  і  $Q$  сигналів (еквівалентних низькочастотному сигналу) або частот і фаз; налаштування формувачів імпульсів або деяких фільтрів для обмеження смуги пропускання і формування спектру типового для обробки даних цифровою системою зв'язку; цифро-аналогове перетворення (ЦАП) сигналів  $Q$  і  $I$  (до сьогоdnішнього часу всі з вище перелічених сигналів використовують цифрову обробку). Інколи наступний крок також вимагає використання цифрової обробки сигналу, а лише потім цифро-аналогового перетворення; модуляція високочастотних несучих сигналів, в наслідок чого низькочастотний сигнал переходить в модульований високочастотний сигнал або

радіочастотний сигнал; посилення і аналогову смугову фільтрацію для того, щоб уникнути гармонійного спотворення і періодичного спектру. У приймачі, демодулятор зазвичай виконує смугову фільтрацію; автоматичне регулювання посилення (компенсація згасання); зсув частоти немодульованих  $I$  і  $Q$  сигналів на проміжній частоті (ПЧ), вибірку і аналого-цифрове перетворення; компенсаційну фільтрацію для визначення амплітуд  $I$  і  $Q$  сигналів або частоти і фази, що потрапляють в перетворювач частоти (ПЧ); квантування по рівню амплітуди, частоти або фази в найближчі допустимі значення з використанням таблиць; перетворення таблиці квантування амплітуд, частот і фаз в кодові слова; перетворення паралельного коду в послідовний; передача отриманих бітових потоків для подальших перетворень, таких як, усунення деяких помилкових біт. Причому демодуляція може здійснюватись некогерентними або когерентними методами.

Найбільш поширені методи цифрової модуляції: амплітудна маніпуляція (АМ) або (ASK – amplitude shift keying); фазова маніпуляція (ФМ) або (PSK – phase shift keying); частотна маніпуляція (ЧМ) або (FSK – frequency shift keying); квадратурна амплітудна модуляція (КАМ) або (QAM – quadrature amplitude shift keying) – комбінація ФМ і АМ; безперервна фазова модуляція (БФМ); маніпуляція з мінімальним фазовим зсувом MSK – (minimum shift keying); гауссова маніпуляція з мінімальним частотним зсувом GMSK – (Gauss minimum shift keying); мультиплексування з ортогональним частотним розділенням сигналів, також відома як дискретна багатотональна модуляція. Маніпуляція з мінімальним фазовим зсувом і гауссова маніпуляція з мінімальним частотним зсувом в окремих випадках називаються безперервною фазовою модуляцією.

Смугова модуляція має і наступні важливі переваги при передачі сигналів. При використанні одного каналу більше чим одним сигналом, модуляція може застосовуватись для розділення різних сигналів. Подібний метод, відомий як ущільнення з частотним розподілом (frequency-division multiplexing – FDM). Модуляція може використовуватись і для мінімізації наслідків інтерференції. Клас схем модуляції, відомий як модуляція розширеним спектром, потребує смуги, що значно перевищує мінімальну смугу, необхідну для передачі повідомлення. Крім того, модуляція може використовуватись для переміщення сигналу в діапазон частот, в якому легко задовільняються специфічні конструктивні вимоги, наприклад, ті, що відносяться до фільтрації і підсилення. Прикладом такого застосування модуляції є перетворення в приймачі радіочастотних сигналів в сигнали проміжної частоти.

Розглянемо особливості деяких методів модуляції/демодуляції цифрових систем передачі інформації з метою виявлення загальних закономірностей та відмінностей реалізації цих методів.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

При порівнянні розглянутих видів модуляції з метою використання їх в системах передачі інформації врахуємо наступні обставини. Систему з  $N$  сигналів в системах передачі інформації також прийнято характеризувати з допомогою кореляційних функцій і спектральної густини. Кореляційна функція описується виразом:

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

де  $T$  – тривалість сигналу;  $i = \overline{1, N}$  і  $j = \overline{1, N}$  – номер сигналу;  $R_{ij}$  – автокореляційна функція;  $R_{ij} (i \neq j)$  – взаємкореляційна функція.

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

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

Крім того важливою характеристикою є енергетична відстань між сигналами:

$$D_{ij} = \int_0^T (u_{Sj}(t) - u_{Si}(t)) \cdot (u_{Si}(t) - u_{Sj}(t))^* dt, \quad (3)$$

де знак  $*$  – знак комплексного спряження.

Відстань між сигналами, яка отримується в точці прийому, зв'язана з ймовірністю помилки на біт  $\overline{P}_{ном}$ , наприклад для гаусівського каналу і двійковою модуляцією:

$$\overline{P}_{ном} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \sqrt{\frac{D_{1,2}}{2 \cdot N_0}} \right) \right], \quad (4)$$

де  $N_0 = k \cdot T_{ш} \cdot \Delta$  – спектральна густина білого шуму;  $k$  – коефіцієнт Больцмана,  $T_{ш}$  – шумова

температура;  $\Delta F$  – смуга частот приймального тракту;  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – функція Лапласа.

У випадку двійкової BPSK спектральна густина визначається з формули:

$$u_S(t) = A^2 \cdot T_c \frac{\sin^2(2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_c)}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_c)}, \quad (5)$$

де  $A^2 \cdot T = E$  – енергія сигналу.  
Відстань між сигналами:

$$D_{1,2} = 2 \cdot \sqrt{E}. \quad (6)$$

Взаємкореляційна функція  $R_{1,2} = -1$ , внаслідок чого сигнали BPSK називають протилежними.

Вірогідність помилки в гаусівському каналі при використанні сигналів BPSK:

$$\bar{P}_{0uBPSK} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \sqrt{\frac{2 \cdot E}{N_0}} \right) \right]. \quad (7)$$

При використанні в системах передачі інформації багатократних видів модуляції типу QPSK – 8, відстані між сусідніми сигналами в загальному вигляді:

$$D_{i,i+1} = \sqrt{E \left( 2 - 2 \cos \frac{2 \cdot \pi}{M} \right)} = 2 \cdot \sqrt{E} \sin \frac{\pi}{M}, \quad (8)$$

$$D_{1,2} = \sqrt{2E} \text{ при } M = 4, \text{ а } D_{1,2} \approx \sqrt{0,6E} \text{ при } M = 8.$$

В подальшому при збільшенні  $M$  відстань між сусідніми сигналами швидко зменшується, тому не дивлячись на зменшення смуги використаних частот в  $k = \log_2 M$  раз (по відношенню до BPSK сигналів), багатократна фазова модуляція використовується лише з  $M \leq 8$ .

Ймовірність помилки в гаусівському каналі для  $M$  - розрядних сигналів визначається з виразу:

$$\bar{P}_{0uMPSK} \approx 2 \left[ 1 - \Phi \left( \sqrt{\frac{2 \cdot E_S}{N_0}} \sin \frac{\pi}{M} \right) \right], \quad (9)$$

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

Аналізуючи вираз (9) можна зробити висновок, що із збільшенням кількості сигналів  $M^k$ , завадостійкість зменшується. Найбільшою завадостійкістю (або найменшими енергетичними витратами) при заданій ймовірності помилки володіють сигнали BPSK, які називають протилежними, так як

$\frac{1}{A^2} R_{1,2} = -1$ . Сигнали QPSK утворюють біортогональну систему сигналів, для якої:  $R_{i,i+1} = 0; R_{i,i+1} = -1$ . Сигнали MPSK при  $M > 4$  втрачають властивості протилежності і ортогональності, що призводить до зниження завадостійкості

Природне бажання підвищити завадостійкість прийому сигналів за рахунок збільшення відстані між сусідніми сигналами  $D_{i,i+1}$ , привело до пошуку багатократних сигналів з більшим, ніж у MPSK модуляції відстанями. Тут виявляється більш привабливою QAM – модуляція. Відстань між сигналами:

$$D_{i,i+1} = \sqrt{2E} (\sqrt{M} - 1)^{-1}, \quad (10)$$

Спектральна густина потужності QAM – сигналу співпадає із спектром радіоімпульсу тривалістю:

$$T = T_0 \log_2 M, \quad (11)$$

де  $T_0$  – тривалість інформаційного символу.

$$u_S(f) = \frac{A_{cp}^2}{2} \left( \frac{\sin \pi(f-f_0) \cdot T}{\pi(f-f_0) \cdot T} \right)^2, \quad (12)$$

де  $A_{cp}$  – середнє значення амплітуди КАМ.

Для зменшення займаної смуги частот в модуляторах сигналів з фазовою модуляцією і квадратурною модуляцією, як було показано вище, застосовуються згладжувальні фільтри. Однак аналіз застосування таких фільтрів приводить до того, що за рахунок згладжування зменшується відстань між сусідніми сигналами, що призводить до зниження завадостійкості і відповідно енергетичної ефективності. Тому вибір параметрів згладжування визначається компромісом між частотною і енергетичною ефективністю.

Проводячи аналогію з КАМ, MPSK – модуляцією, визначимо на основі представлених співвідношень основні характеристики MSK, FSK, GFSK – модуляцій які широко застосовуються в системах

передачі інформації типу DECT, Bluetooth тощо.

Для сигналів FSK – кореляційні функції системи сигналів визначаються виразом:

$$R_{ij} = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases} \quad (13)$$

А отже, сигнали є ортогональними. Рознесення звичайно вибирають  $\Delta f = \frac{1}{2T}$ . Завадостійкість приймання FSK залежить від типу приймача (когерентний або не когерентний прийом).

Для сигналу MSK – сигнал із неперервною зміною фази (нагадаємо: індекс модуляції дорівнює 0,5):

$$u_S(t) = A \exp(j \frac{\pi}{2} \sum_{n=-\infty}^{K-1} x_n + \frac{\pi}{2} x_k \frac{t - kT}{T}). \quad (14)$$

Спектральна густина потужності MSK може бути представлена виразом:

$$U_s(f) = \frac{4E_c}{\pi^2} \frac{1 + \cos 2\pi\Delta f T_c}{(1 - 4T_c^2 \Delta f^2)^2}, \quad (15)$$

де  $\Delta f = f - f_n$ ;  $E = A^2 T$  – енергія сигналу.

Підвищення ефективності використання спектра, досягається використанням GMSK – модуляції, тобто модуляції з попередньою гаусівською фільтрацією. Тут важливим параметром виступає параметр  $\beta = B \cdot T$  – параметр згладжування. Із зменшенням значення коефіцієнта  $\beta$  порушується ортогональність сигналів і відповідно збільшується вірогідність помилки на біт [2]. Крім того сигнали MSK і GMSK не дозволяють забезпечити високої спектральної ефективності в каналах передачі інформації, а сигнали з багатократною модуляцією будуть нестійкими до завмирань в каналах зв'язку. Тому в умовах міської забудови, при необхідності швидкісної передачі інформації, розробляються і застосовуються сигнали із ортогональною частотною модуляцією (OFDM), які знаменують перехід до четвертого покоління систем передачі інформації. Такі сигнали дозволяють боротись із між символною інтерференцією і є альтернативою еквалайзеру у випадку одночастотної модуляції [3].

Розглянемо особливості формування та демодуляції цифрової інформації.

Розгляд почнемо з FSK модуляції, яка знайшла широке застосування в системах передавання інформації із невеликими швидкостями рис. 2.



Рис. 2. Схема формування FSK модуляції

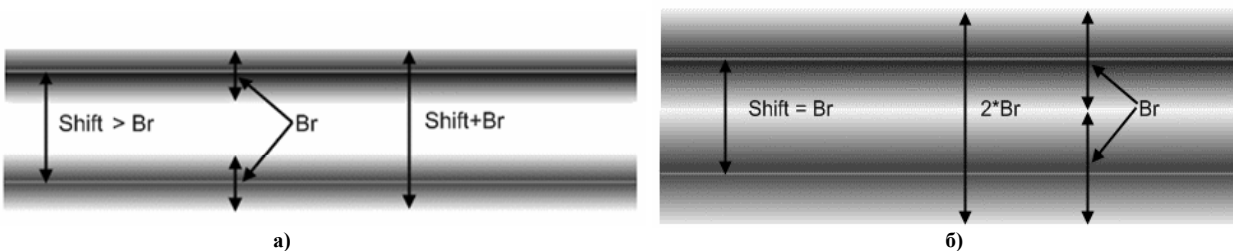


Рис. 3. Розподіл енергії в спектрі сигналу з FSK: а – стандартної, б – критичної

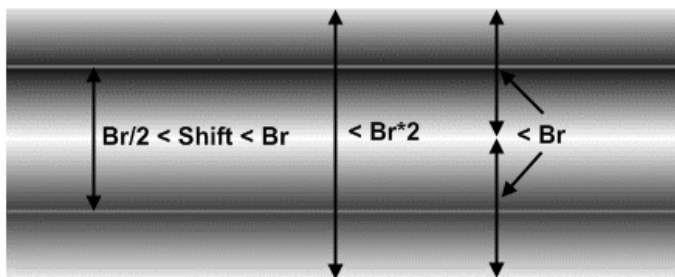


Рис. 4. Розподілення енергії в спектрі GFSK

прямокутності імпульсів модуляції і різкого перемикавання генератора в модуляторі в "невідповідні" моменти часу. Основна енергія рис. 3 зосереджена навколо частот маніпуляції і займає смугу рівну  $Br$ , що дає мінімально можливий спектр такого сигналу  $2 \cdot Br$  при рознесенні рівному  $Br$ , або  $Shift$  (рознесення частот маніпуляції)  $+Br$  у більш загальному випадку. Гармоніки за межами цього спектру можуть бути ефективно

Прямокутний бітовий потік перетворений до рівнів  $\pm 1$  надходить на модулятор (генератор керований напругою), де рівню  $+1$  відповідає одна частота, рівню  $-1$  інша. Таким чином на виході модулятора отримуємо класичну модуляцію FSK. Отже, рознесення частот задається в модуляторі і може бути будь-яким, але не менше ніж  $Br$  (BaudRate – швидкість маніпуляції). Спектр такого сигналу містить безліч гармонік за рахунок

подавлені без проблем для успішної демодуляції.

Зверніть увагу, що спектр довкола частот маніпуляції при рознесенні рівному  $Br$  точно вкладається в простір між частотами без перекриття. Якщо частоти зближувати далі то буде перекриття спектрів "чужих" посилок і взаємні сильні завади. З графічної карти видно основну ідею для зменшення рознесення частот при тій же швидкості маніпуляції, і як наслідок підвищення ефективності самої FSK. Досить лише зменшити область основної енергії бічних частот маніпуляції, що дозволить зменшити рознесення. Ця ідея реалізується через попередню фільтрацію бітового потоку перед подачею на модулятор. Для FSK широке поширення набули фільтри Гауса, вони забезпечують досить ефективно звуження смуги за рахунок згладжування різких переходів напруги маніпуляції і хорошу керованість параметрами. Класична FSK з попередньою фільтрацією напруги маніпуляції фільтром Гауса отримала назва GFSK. Загальна схема модулятора залишається така сама як на рис. 2, але бітовий потік проходить через фільтр Гауса. Це дозволяє відійти від обмеження мінімального зсуву класичної FSK,  $Shift \geq Br$  у бік зменшення. Від параметрів фільтру Гауса залежить наскільки сильно буде звужений основний спектр бічних і наскільки сильно можна зрушити частоти маніпуляції. На практиці ця величина завжди більш ніж  $Br/2$ . Це викликано тим, що зменшення бічних складових досягається сильною пологістю фронтів напруги маніпуляції, що приводить до наїзду одного імпульсу на інший, і як наслідок до неможливості демодуляції. Типове зменшення рознесення для GFSK складає на 30-40 % від класичного  $Shift = Br$ , тобто  $Shift = (0.7-0.6) \cdot Br$ . Подальший розвиток техніки FSK маніпуляції привів до появи MSK маніпуляції, маніпуляції з мінімальним частотним зсувом, маніпуляції з рознесенням частот  $Br/2$ , де відбулася відмова від генератора керованого напругою, і для формування MSK маніпуляції використовуються квадратурні маніпулятори рис 5.

Умови MSK маніпуляції вимагають, що б зміна біт відбувалася при екстремумах коливань генератора в маніпуляторі, або простіше в абсолютних піках синусоїди і/або в нулях. При виконанні всіх умов автоматично встановлюється рознесення частот маніпуляції рівне  $Br/2$  і а ширина спектру виходить приблизно  $1.5 \cdot Br$  рис. 6.

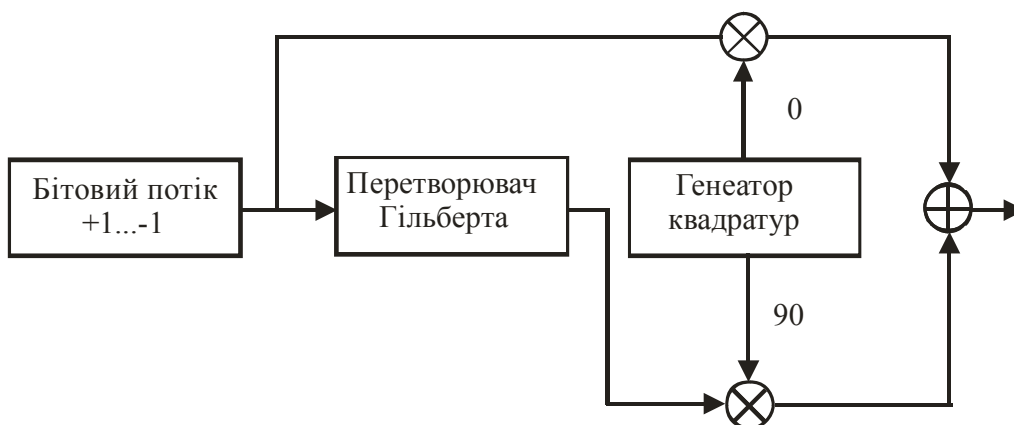


Рис. 5. Схема MSK – модулятора

Не складно зрозуміти, що маніпуляція представляє собою одну частоту яка має на різних послітках різну фазу, причому фаза має постійний різний набіг, що і дає дві частоти з мінімальним рознесенням.

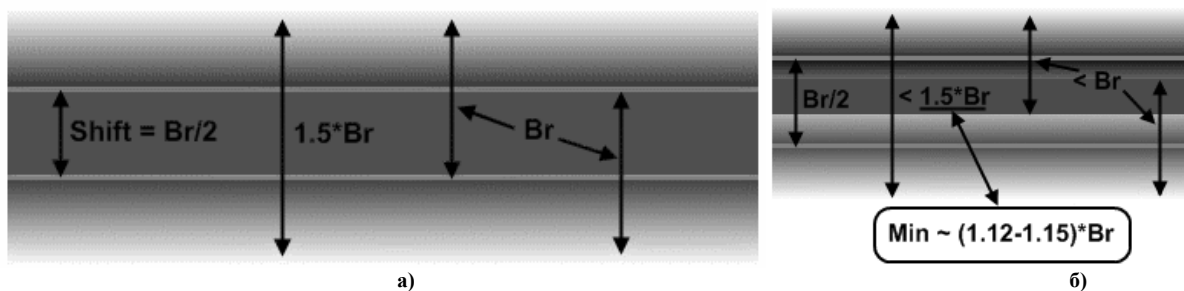


Рис. 6. Розподіл енергії в спектрі сигналу з: а – MSK, б – GMSK

Введення фільтру Гауса в схему MSK модулятора дозволяє зменшити ще більше загальний спектр сигналу, але платою за це буде деяке зниження завадостійкості. Подібна маніпуляція отримала назву GMSK, стандартно GMSK маніпуляція може мати спектр приблизно всього на 12-15 % більш ніж  $Br$ , менші значення призводять до суттєвої втрати завадостійкості.

Найбільшу завадостійкість має MSK маніпуляція при когерентному демодуляторі. Звуження смуги при FSK маніпуляції, дозволяє демодулювати сигнали з MSK, GMSK звичайними частотними детекторами. Крім того слід вказати, що MSK і GMSK, по-перше маніпулюють фазою несучого коливання, а по-друге вимагають для повної реалізації своїх потенційних можливостей когерентні демодулятори. Таким чином виходять наступні характеристики цих модуляцій: FSK – простота реалізації і відносно широкий спектр;

GFSK – простота реалізації менший спектр, але і декілька гірша завадостійкість по відношенню до FSK; MSK – дуже висока завадостійкість при відносно невеликому спектрі, але складна схема модулятора-демодулятора; GMSK – ширина спектру практично близька до теоретичної межі  $B_r$ , декілька гірша завадостійкість в порівнянні з MSK, складність модулятора-демодулятора така ж як в MSK.

Алгоритм квадратурної амплітудної модуляції QAM представляє собою різновид багатопозиційної амплітудно-фазової маніпуляції. Широке використання модифікації цього алгоритму набули при побудові сучасних модемів, в системах передачі інформації таких як системи дистанційного зондування Землі та супутникової метеоінформації тощо. При квадратурній модуляції змінюється як фаза, так і амплітуда сигналу, що дозволяє збільшити кількість інформації, що передається одним відліком сигналу. Формування та демодуляції QAM здійснюється із допомогою схем квадратурних модуляторів/демодуляторів. На сучасному етапі розвитку систем передачі інформації найбільше розповсюдження отримали декілька варіантів QAM: алгоритм модуляції QAM – 4, при якому інформаційний сигнал кодується зміною фази несучого коливання із кроком  $\pi/2$ . Цей алгоритм модуляції носить назву QPSK (Quadrature Phase Shift Keying – квадратурна фазова маніпуляція). Велике розповсюдження також отримали QAM – 16, 32, 64, 128 і 256. Алгоритм квадратурної амплітудної модуляції, по суті, є різновидом алгоритму гармонічної амплітудної модуляції і тому має наступні важливі властивості: ширина спектра QAM модульованого коливання не перевищує ширину спектра модулюючого сигналу; положення спектра QAM модульованого коливання в частотній області визначається номіналом частоти несучого коливання. Ці властивості QAM алгоритму модуляції забезпечують можливість побудови на його основі високошвидкісних систем передачі інформації і зокрема із частотним розділенням інформаційних потоків. Завадостійкість QAM оберно пропорційна до його спектральної ефективності.

#### Дослідження параметрів цифрових методів модуляції засобами Matlab

Кожен тип модуляції для передачі символу з рівнем помилок, який не перевищує певного максимального значення, вимагає певного мінімального значення відношення рівня сигналу до шуму Signal/noise Ratio (SNR або S/n). Крім відношення SNR часто використовується практично ідентичне поняття Cnr Carrier/noise Ratio або C/n. Кожен тип модуляції характеризується необхідним рівнем відношення сигналу до шуму SNR, необхідного для передачі біт інформації з помилками Bit Error Rate (BER) не вище деякого допустимого рівня.

Використаємо середовище Matlab оцінемо завадостійкість частотної маніпуляції у випадку когерентної та некогерентної демодуляції. Порядок моделювання буде проходити наступним чином: змодельуємо випадковий інформативний сигнал, далі частотноманіпульований, додамо до нього шум та виведемо ефективність різних методів модуляції. Повторивши цю процедуру при різних відношеннях сигналу до шуму отримаємо графіки завадостійкості. Наведемо М-файл та результат дослідження рис. 7.

```
s = dmod (x, Fc, Fd, Fs, 'fsk', M, tone); % маніпульований сигнал
snr = -10: 10; % вектор відношення С/Ш (в децибелах)
for k = 1: length (snr)
sn = awgn (s, snr (k), 'measured'); % додавання шуму
% когерентна демодуляція
y_c = ddemod (sn, Fc, Fd, Fs, 'fsk', M, tone);
% некогерентна демодуляція
y_nc = ddemod (sn, Fc, Fd, Fs, 'fsk/noncoherence', M, tone);
% проведення розрахунку вірогідності помилки
[n_err, er_c (k)] = symerr (x, y_c);
[n_err, er_nc (k)] = symerr (x, y_nc);
end
% графік
semilogy (snr, er_c, snr, er_nc)
```

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

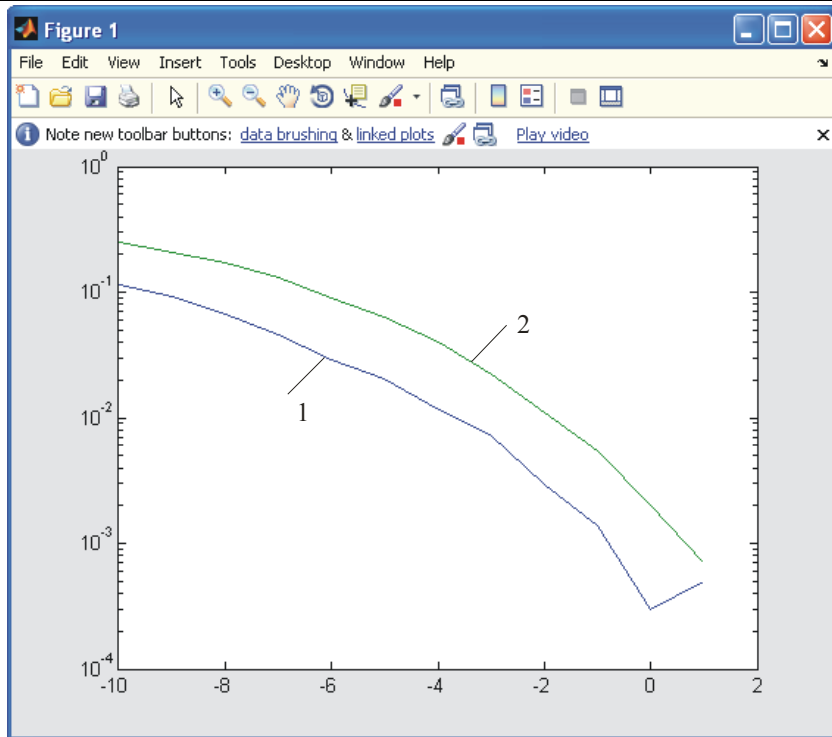


Рис. 7. Графік завадостійкості частотноманіпульованого сигналу

З графіка також видно, що завадостійкість даного виду маніпуляції дуже висока навіть при рівності середніх потужностей сигналу і шуму (відношення сигнал/шум 0 дБ) вірогідність помилки складає приблизно  $2 \cdot 10^{-4}$  для когерентного варіанту і приблизно  $1,5 \cdot 10^{-3}$  для некогерентного. Платою за це в даному випадку є низька швидкість передачі даних вибрана при модулюванні.

Використаємо інструмент BERTool середовища Matlab та проведемо розрахунок зміни бітової помилки BER в системі зв'язку з BPSK модуляцією від відношення сигналу до шуму  $E_b/N_0$  у дБ. Використавши засоби Matlab Simulink отримуємо симуляційну модель рис. 8.

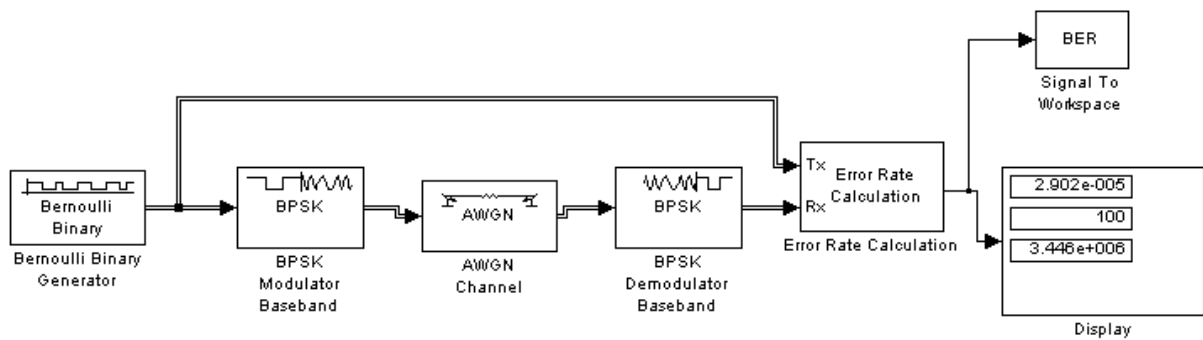


Рис. 8. Simulink – модель системи передачі інформації з BPSK модуляцією

Ініціалізація параметрів моделі здійснюється в MATLAB Command Window командою:

```
set_param('New 1','preLoadFcn',...
'EbNo = 0; maxNumErrs = 100; maxNumBits = 1e8;');
```

В якості каналу зв'язку використано AWGN канал який додає білий шум Гауса до реального або складного вхідного сигналу. Вікно інструменту BERTool та результати отриманої теоретичної кривої та кривої отриманої в результаті симуляції залежності відношення сигналу до шуму при зміні бітової помилки BER зображено на рис. 9.

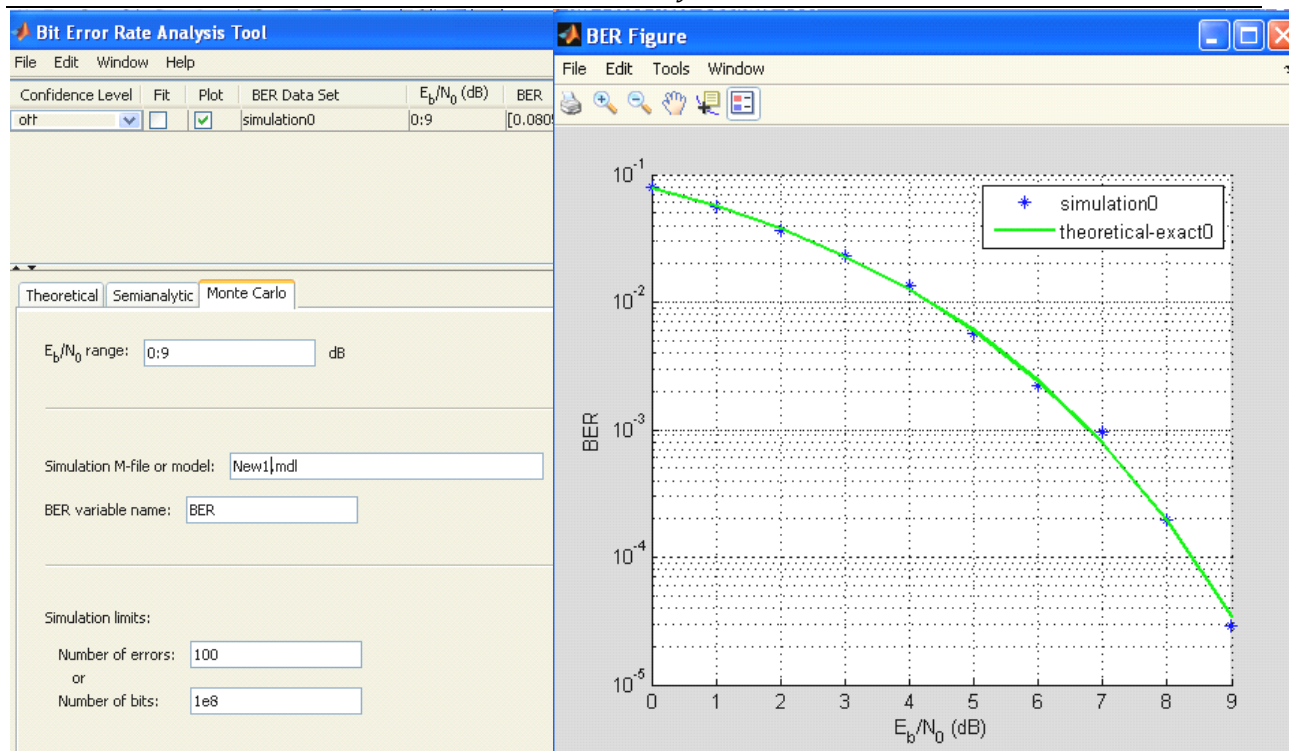


Рис. 9. Вікно інструменту BERTool

Результати симуляції характеризуються стрімкою зміною бітової помилки при прийманні сигналу BPSK, від відношення сигнал до шуму.

### Висновки

- 1) сучасні системи зв'язку та передавання інформації характеризуються широким застосуванням в них цифрових методів модуляції;
- 2) порівняння цифрових видів модуляції з метою використання їх в системах передачі інформації здійснюються з допомогою кореляційної функції, спектральної густини та енергетичної відстані між сигналами;
- 3) перехід на високошвидкісні та спектрально-ефективні методи модуляції пов'язаний з застосуванням при формуванні та детектуванні інформації квадратурних та когерентних методів модуляції/демодуляції;
- 4) Matlab Simulink – дуже потужний інструмент, який може використовуватися для моделювання в телекомунікаційних системах. Шляхом побудови імітаційних моделей вдається зручно оцінювати основні головні показники систем зв'язку та цифрових методів модуляції/демодуляції.

### Література

1. Бойко Ю.М. Концептуальні особливості реалізації безпроводних сенсорних мереж / Ю.М. Бойко, В.В. Мішан // Вісник Хмельницького національного університету. – Технічні науки. – Хмельницький. – 2010. – №2. – С. 94–98.
2. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А.И. Фалько, В.Л. Банкет, П.В. Иващенко; [под. ред. А.Г. Зюко]. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.
3. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / Григорьев В.А., Лагутенко О.И. – М: Экотрендз, 2005. – 375 с.
4. Boyko J., Babiy J., Karpova L. Conceptual Features of Application of Facilities of Adaptive Filtration are in the Tasks of Authentication of Noise of Communication Channels / J. Boyko // Proceeding of the X<sup>th</sup> International Conference TCSET 2010. – Lviv – 23.02.2010. P. 299

Надійшла 11.1.2011 р.