

УДК 621. 391. 814

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА БІТОВИХ ПОМИЛОК

DOI 10 36994 / 2788- 5518- 2022-02-04-11

Пелишок В.О., д.т.н., проф. Національний університет «Львівська політехніка» Львів, Україна. volodymyr.o.pelishok@lpnu.ua.

Чайковський І.Б., к.т.н., доц. Національний університет «Львівська політехніка» Львів, Україна. Ihor.b.chaikovskyi@lpnu.ua.

Масюк, А.Р., к.т.н., доц. Національний університет «Львівська політехніка» Львів, Україна. andrii.r.masiuk@lpnu.ua.

Андрухів Т.В., к.т.н. Львівська філія ПАТ «Укртелеком», Львів, Україна. tandrukhiv@ukrtelecom.ua

Анотація: головною вимогою до телекомунікаційних систем передавання цифрової інформації різного призначення є забезпечення її якісних характеристик: швидкості передавання, пропускної здатності, ймовірності біткової помилки. Ці характеристики знаходяться у складній взаємній залежності, що вимагає необхідність досліджень із використанням спеціальних підходів і методів. В роботі розглянуто та запропоновано шляхи оптимізації процесу проектування та вибору серед можливих варіантів реалізації більш ефективних систем.

Ключові слова: телекомунікаційна система, пропускна здатність, бітова помилка, суміщені графіки.

DESIGNING OPTIMIZATION OF EFFICIENT TELECOMMUNICATION SYSTEMS WITH CONSIDERATION BANDWIDTH AND BIT ERRORS

Volodymyr Pelishok, Dr.habil, Prof. Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. volodymyr.o.pelishok@lpnu.ua.

Ihor Tchaikovskyi, PhD, Ass. Prof. Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukrain. Ihor.b.chaikovskyi@lpnu.ua.

Andriy Masiuk, PhD, Ass. Prof. Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. andrii.r.masiuk@lpnu.ua.

Taras Andrukhiv, Ph.D. Lviv branch of the PJSC "Ukrtelecom", Lviv, Ukrain., tandrukhiv@ukrtelecom.ua.

Abstract: main requirement to telecommunications for the transmission information of various purposes is to ensure its quality characteristics: speed, bandwidth and probability of bit error. These characteristics are in a complex mutual dependence, which requires the need for research using special approaches and methods.

A feature of the designing aspects of modern telecommunications is providing BER level and bandwidth. Thus, it is necessary to provide the system with certain resources: the bandwidth of the channel, the number of signal levels and SNR. Each of the specified parameters is characterized by significant features.

The paper considers two important components related to the implementation of telecommunications - design optimization and selection of more effective systems implementation options among possible one.

Design optimization is carried out using modern software packages, which brings the design closer to the automated one. An analytical-graphical approach is also widely used, in which complex analytical transformations are replaced by equivalent graphic transformations. At the same time, the design process is practically not complicated and provides the possibility of visual perception of the essence of signal processing in individual nodes. The following ways of optimization are proposed: determination of the probability of erroneous receiving of bits information signals using specialized means; the use of the "2D-3D-2D/" method, which allows to simplify the formation of the necessary graphic dependencies; application-combined graphics that allow you to replace the need for the inconvenient use of two graphic windows with the convenience of using one graphic window.

On the basis of the conducted research, an algorithm for the design of effective telecommunications was developed, which allows in each specific case to obtain all possible variants of effective (according to the proposed criterion) one; form a criterion for choosing a more effective one among the received options.

Key words: telecommunications, optimization, bandwidth, BER, combined graphs.

Вступ

Одним із важливих аспектів проектування цифрових телекомунікаційних систем (ТКС) є забезпечення (рис.1) двох основних (вихідних) параметрів:

- ймовірності появи бітових помилок P_b (або BER, Bit Error Rate), тобто помилкового прийняття «1» замість переданого «0» і навпаки;
- пропускну здатності C (біт/с), яка вказує максимальну швидкість (R_{max}) передавання даних.

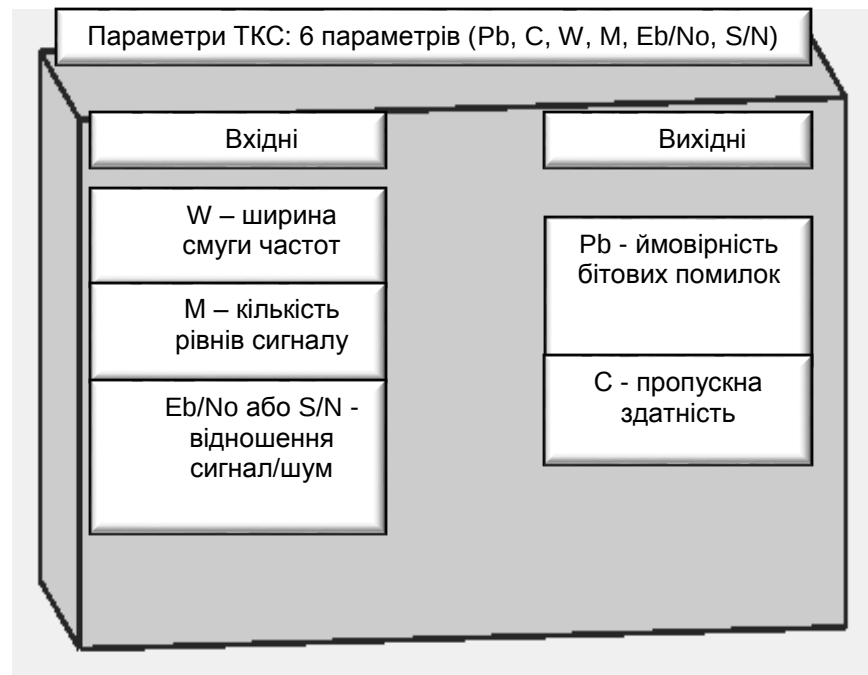


Рис.1. Основні параметри ТКС

Для їх реалізації системі необхідно надати певні ресурси (вхідні параметри):

- ширину W (Гц) смуги частот каналу зв'язку;
- кількість M рівнів сигналу;
- відношення сигнал/шум, яке прийнято використовувати в одному з двох видів - S/N (відношення потужності сигналу до середньої потужності шуму), або E_b/N_0 (відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму).

Кожен із 6-и вказаних параметрів характеризується суттєвими особливостями [1, 2], причому більш простими є вхідні параметри.

Ширина смуги частот каналу зв'язку. Вказаної смуги завжди недостатньо. На її основі формується один із основних показників, що характеризують ефективність ТКС.

Кількість рівнів сигналу. Кожен біт вхідної інформації можна передавати окремо (наприклад 1, 0, 0, 1 і т. д.), або з k бітів формувати символи і далі передавати тільки символи. Наприклад, якщо символ містить $k=2$ біти, то можливі $M=4$ варіанти розміщення бітів у символі (00, 01, 10, 11). При передаванні різних символів необхідно присвоїти специфічну ознаку (різний рівень сигналу). Інакше на приймальній стороні буде неможливо отримати інформацію про вміст бітів в отриманому символі. На рис.2 приведено приклад формування 4-х рівневого ($M=4$) сигналу різними рівнями.



Рис.2. Формування M-рівневого сигналу при k=2

У загальному випадку очевидно [2] є залежність

$$M=2^k \quad (1,a)$$

$$\text{або } k=\log_2(M) \quad (1,b)$$

На рис. 3 приведено фрагмент графічного відображення залежності (1,a)

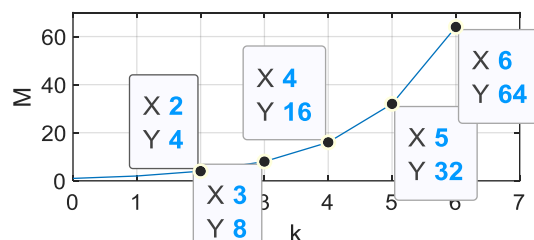


Рис.3. Залежність $M(k)$ для M-рівневого сигналу

Видно, що значення k , M можуть приймати тільки дискретні значення. Вказана особливість формує певні специфічні обмеження, які необхідно враховувати при проектуванні ТКС.

У випадку заданого значення одного з параметрів ($W=\text{const}$ або $C=\text{const}$) другий також може отримувати (1,a) тільки дискретні значення. При проектуванні ТКС часто можна отримати розраховані значення, які не співпадають з вказаними дискретними. Рекомендації для таких випадків практично відсутні у відомих дослідженнях.

Відношення сигнал/шум може бути представлене одним із двох варіантів (S/N , або E_b/N_0), між якими є [1] відомий взаємозв'язок :

$$E_b/N_0 = (S/N)/(C/W) \quad (2,a)$$

$$\text{або } S/N = (E_b/N_0)(C/W) \quad (2,b)$$

Не є очевидним, якому з варіантів слід надати перевагу при проектуванні ТКС. У відомих наукових джерелах такі рекомендації також відсутні.

Ймовірність бітових помилок P_b для бінарних систем визначається на основі інтеграла Гауса $Q(x)$:

$$P_b = Q(x), \quad (3)$$

де: $Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$; $x=(a \cdot E_b/N_0)^{1/2}$; $a=2$ для біполярного сигналу;
 $a=1$ для уніполярного сигналу.

Таким чином, значення P_b залежить (3) від виду використаних сигналів (уніполярного чи біполярного) приведених на рис.4

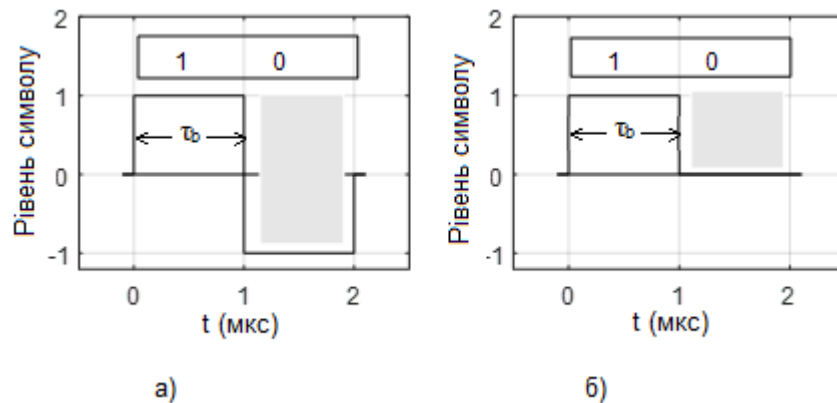


Рис. 4. Вид сигналу: а) біполярний; б) уніполярний

Застосування різних видів сигналу (уніполярний або біполярний) спричинене тим, що цифрові дані в початковому виді (наприклад, письмові 01101 і т.д.) не придатні для передавання мережами ТКС. Їх необхідно попередньо перетворити в біти електричного сигналу. Найбільш поширені варіанти електричного сигналу: біполярний сигнал NRZ-L (без повернення до нуля) та уніполярний RZ - (із поверненням до нуля). На рис. 4, як приклад, приведено відображення бітів, що відповідають 1 і 0, причому тривалість біта $T_b=1$ мкс.

Варто зауважити, що залежність $P_b(E_b/N_0)$ отримана на основі інтеграла помилок (3), залежить від виду використаного сигналу

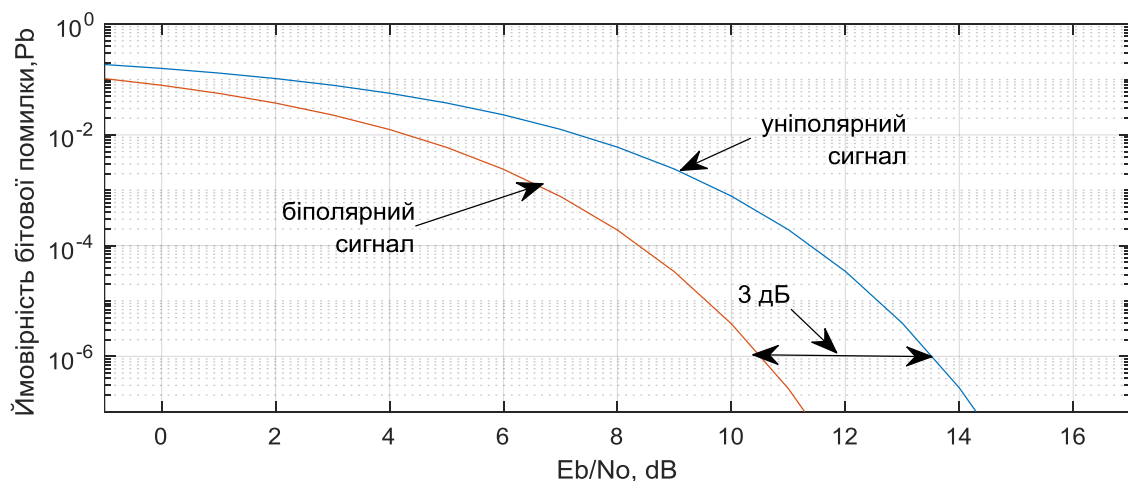


Рис.5. Залежність $P_b(E_b/N_0)$ для уніполярних та біполярних сигналів

Видно, що для забезпечення $P_b \approx 10^{-6}$ при використанні біполярного сигналу достатньо відношення E_b/N_0 на 3 дБ меншого (позитивний ефект) порівняно з уніполярним сигналом. Тому далі використовуються тільки біполярні сигнали, як більш ефективні.

Часто до проєктованих ТКС задається вимога ($P_b \leq P_0$, де P_0 – максимально допустиме значення P_b). Тоді:

$$P_b = P_o \quad (4)$$

Слід зазначити, що визначення P_b досить трудомістке. Для цього в [1] навіть пропонується використовувати спеціальні громіздкі таблиці, що потребує значної затрати часу необхідного для побудови (рис.5). На основі вказаного прикладу видно, наскільки актуальною є подальша оптимізація процесу проектування ТКС.

Ймовірність бітових помилок P_b для M -рівневих систем. На практиці, крім бінарних систем, також широко використовуються M -рівневі системи. В них застосовуються символи, для яких справедливі залежності (1,а,б). Тому при аналізі M -рівневих систем спочатку визначається ймовірність символьних помилок P_s . Далі на їх основі можна також визначити ймовірність бітових помилок P_b .

Для ортогональних сигналів з когерентним детектуванням ймовірність символьних помилок становить [1]:

$$P_s(M) \leq (M-1)Q(E_s/N_o)^{1/2} \quad (5)$$

де $E_s = E_b(\log_2 M) = E_b \cdot k$ – енергія одного символу.

На рис.6 показана залежність (6) для різних видів M -рівневих систем.

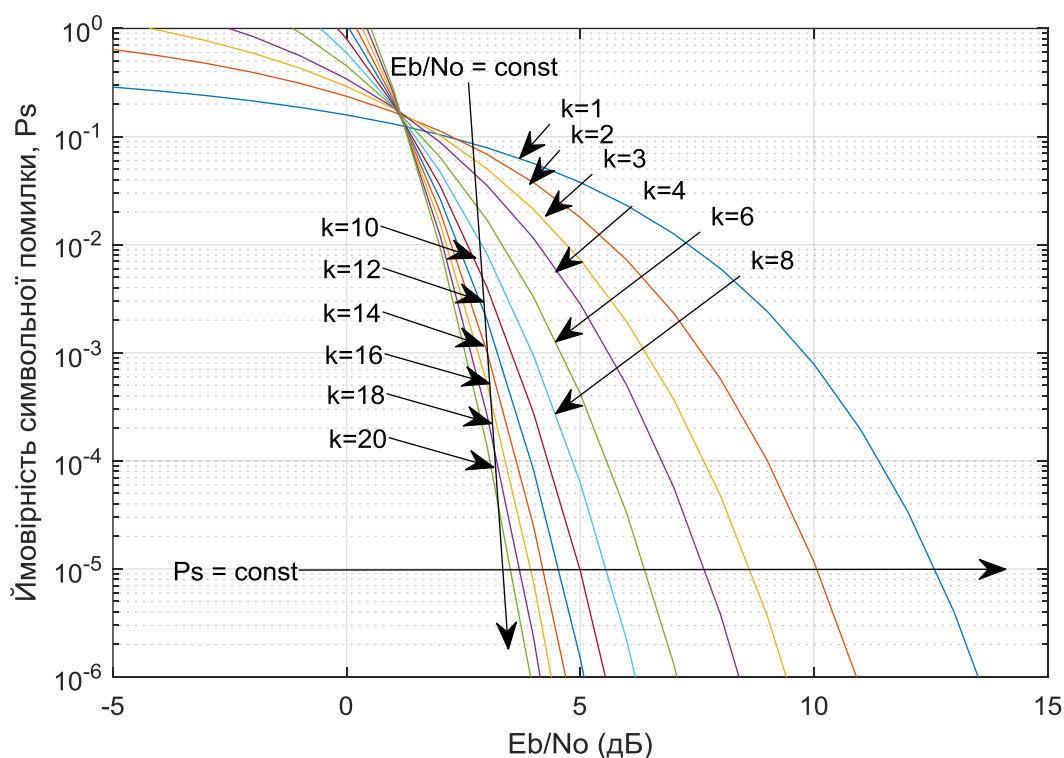


Рис.6. Ймовірність символьної помилки для M -рівневого ортогонального передавання сигналів із когерентним детектуванням.

Видно, що при збільшенні k , наявні позитивні ефекти:

- зменшується рівень сигналу (E_b/N_o), необхідний для забезпечення необхідного значення $P_s = \text{const}$;
- або зменшується значення P_s при заданому значенні $E_b/N_o = \text{const}$.

На основі отриманих значень $P_s(M)$ можна визначити ймовірність бітових помилок P_b :

$$P_b/P_s = 2^{k-1}/(2^k - 1) = (M/2)/(M-1) \quad . \quad (6)$$

Варто зауважити, що при значному збільшенні k залежність (6) навіть спрощується:

$$P_b/P_s \approx 0.5 \quad . \quad (7)$$

Інформація (рис.6) корисна для оцінки впливу різних рівнів M – арних сигналів на якість переданих даних. При проектуванні зацікавлення часто полягає в більш конкретній залежності (наприклад, $E_b/N_0(M)$) при $P_s = \text{const}$. Отримати вказану залежність, використовуючи рис.6, можна але досить складно та незручно.

Однією зі залежностей для пропускної здатності C є формула Найквіста. Вона вказує, що значення C можна суттєво збільшити (що завжди є бажаним) навіть при $W = \text{const}$ у випадку використання M -рівневих сигналів:

$$C = 2W \cdot \log_2(M) \quad , \quad (8)$$

Один із показників ефективності ТКС (C_n) формує пропускна здатність C та смуга частот W :

$$C_n = C/W \quad . \quad (9)$$

Як видно, C_n вказує на швидкість передачі даних, яку забезпечує система при використанні одиниці смуги частот. Тобто, вказаний параметр оцінює як ефективно ТКС використовує дефіцитний ресурс смуги частот. Значення C_n залежить, згідно залежностей (10) та (1,б), від кількості k бітів, яка міститься в символі (табл.1)

Таблиця 1

k	1	2	3	4	5	6	7
C_n	2	4	6	8	10	12	14

Можна зауважити, що забезпечення максимального значення C_n , є одним із визначальних факторів вибору ефективних ТКС, що вирішується в даній роботі.

Як видно (рис.6 та залежність (9)) використання M -рівневих сигналів із більшим значенням M забезпечує лише позитивні результати. Проте певні обмеження для такого збільшення M накладає відношення сигнал/шум.

Другою залежністю для пропускної здатності C є формула Шеннона. Вона вказує вплив на пропускну здатність C смуги частот каналу W та відношення сигнал/шум:

$$C = W \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad . \quad (10)$$

Отже, збільшити пропускну здатність можна шляхом збільшення як смуги частот W , так і збільшенням відношення сигнал/шум.

При використанні формули Шеннона у відомих дослідженнях подаються певні необґрунтовані дані та навіть неточності. Зокрема в [1], з 4-х можливих графічних зображень залежності (10) приведено три: $C_n(S/N)$, $1/C_n(S/N)$ та $1/C_n(E_b/N_0)$. Як показано далі саме пропущений варіант, тобто $C_n(E_b/N_0)$ найбільш доцільно використовувати при оптимальному проектуванні. Крім того, в [1] у математичних перетвореннях залежності (11), з метою визначення границі Шеннона, допущено неточності

Багатоваріантність підходів до оптимального проектування ефективних ТКС. Дані про вище описані загальні відомості відносно ТКС систематизовані (рис.7). При цьому враховано, що відношення сигнал/шум можна характеризувати двома варіантами і не є очевидним якому варіанту доцільно надати перевагу.

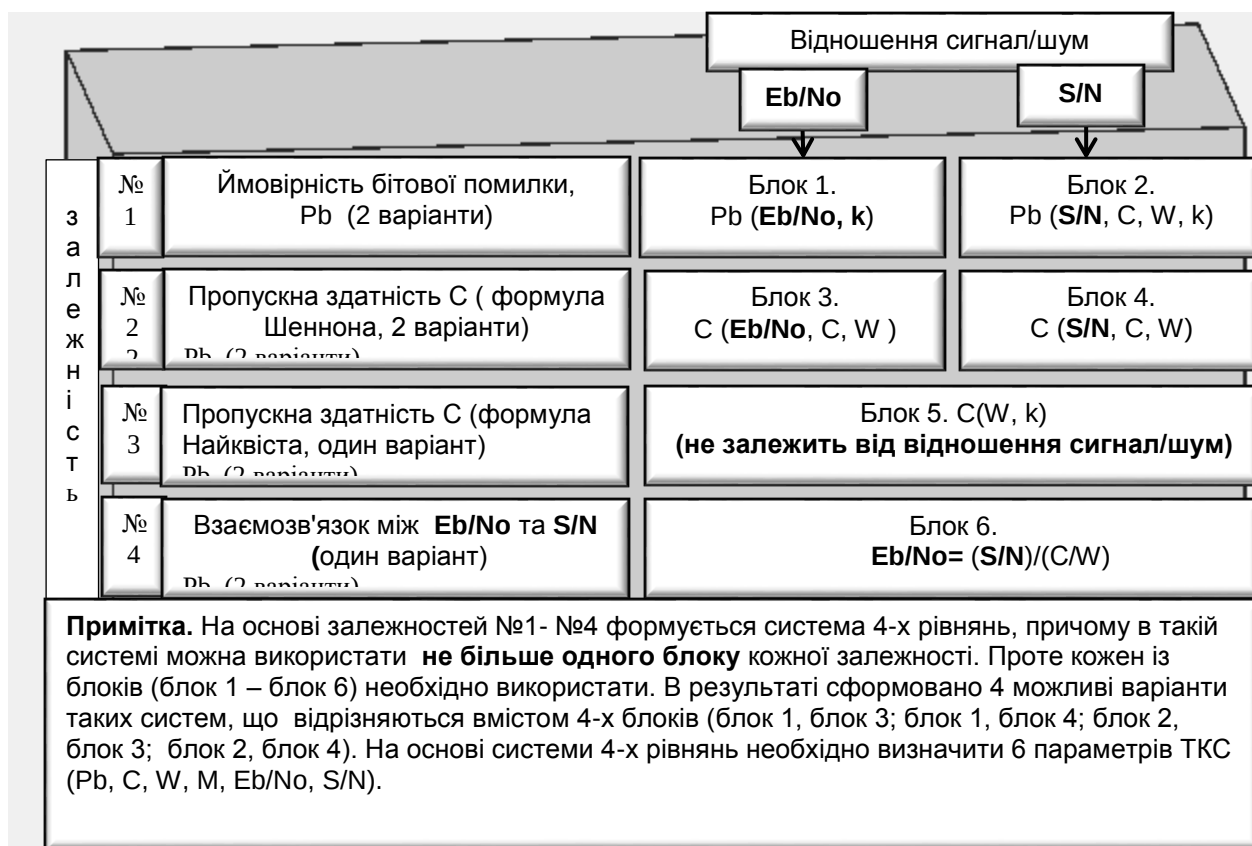


Рис.7. Основні залежності, необхідні для проектування ТКС

Використовуючи систему 4-х рівнянь можна визначити значення лише 4-х невідомих параметрів. Тому значення решти 2-х (6-4) параметрів необхідно попередньо задати. Кількість V_1 варіантів вибору заданих параметрів у даному випадку досить значна (визначається числом сполучень із 6-и параметрів по 2-а) та становить [10] $V_1 = B_6^2 = 15$ варіантів. На рис.6 вказано, що кількість можливих варіантів системи 4-х рівнянь також становить 4. Отже, кількість необхідних варіантів систем рівнянь для розгляду (з метою розробки алгоритму оптимізації проектування та відбору ефективних ТКС) повинна становити $4 \cdot 15 = 60$ варіантів.

Таким чином, постає потреба щодо зменшення кількості варіантів ТКС (серед можливої їх кількості, тобто 60 варіантів), достатніх для вибору більш ефективної ТКС.

В результаті проведеного аналізу показано, що при дослідженнях окремих складових ТКС мають місце суттєві недоліки. Їх частково або повністю усуває запропонована методика.

Особливості запропонованої методики. Як видно з вище приведених висновків, двом аспектам реалізації ТКС приділялось недостатньо уваги, а саме:

- оптимізації проектування окремих складових ТКС (частина 1);
- вибору більш ефективних ТКС при фактичній відсутності алгоритму їх оптимального проектування (частина 2).

Вказані проблеми частково або повністю вирішені та вдосконалені запропонованою методикою. Її основні особливості приведені в табл.2

Оптимізація проектування окремих складових ТКС

Визначення ймовірності помилок P_b

Як вказувалось вище, визначення ймовірності помилок (3) досить складне. Тому для суттєвого спрощення отримання P_b пропонується використовувати можливості програмних пакетів, наприклад MATLAB [5, 6], залежності (рис.3, рис.5, рис.6 і т.д.).

Таблиця 2

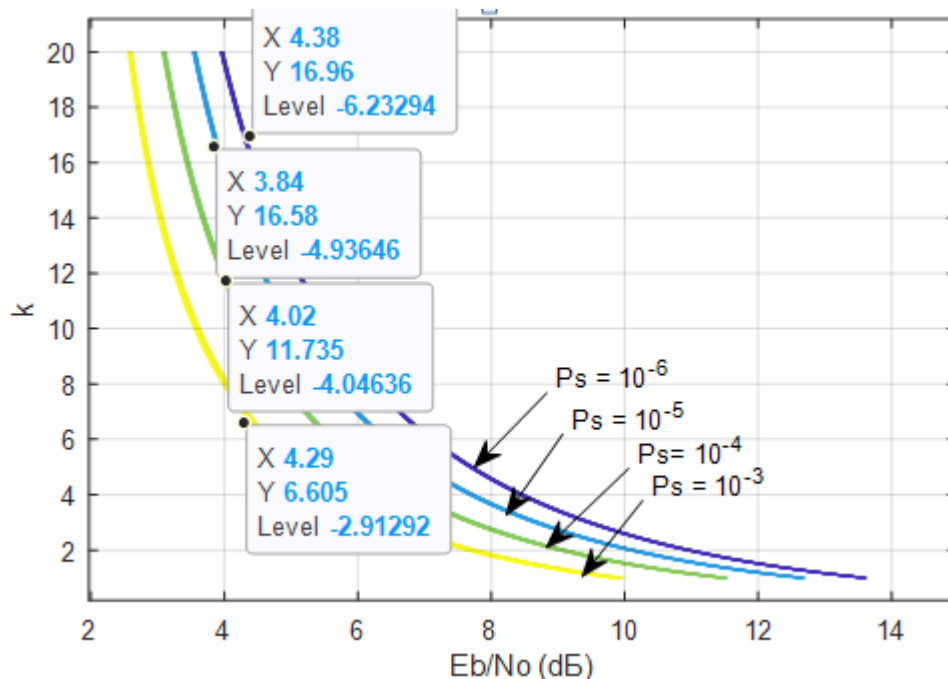
Частина 1. Оптимізація проектування окремих складових ТКС			Частина 2. Оптимізація проектування ТКС в цілому. Вибір більш ефективних варіантів ТКС. Розробка алгоритму проектування.
Засіб 1. Стосовно ймовірності помилок, P_b	Засіб 2. При аналізі сімейства залежностей (наприклад, рис.6)	Засіб 3. При сумісному використанні двох різних функцій спільного аргументу	

Додатковою перевагою використання таких графічних залежностей є можливість у процесі проектування визначати їх значення в довільній точці (наприклад, рис.3). Така можливість наближує процес проектування до автоматизованого. В перспективі, при такому проектуванні, змінювати параметри ТКС буде можливо використовуючи програмні засоби зв'язку.

Аналіз сімейства залежностей

Таким є, наприклад, сімейство (рис.6), отримане на основі формули (5). Вона містить інформацію про взаємозв'язок між P_b -а, в принципі рівноцінними параметрами (P_b , (E_b/N_0) , k). Використавши один параметр (E_b/N_0) - як аргумент, другий параметр (P_b) – як функцію, отримано сімейство залежностей рис.6 – при різних значеннях k (k_1 , k_2 , k_3 і т.д.).

Але, як показано далі, при проектуванні ТКС представляють інтерес також інші сімейства залежностей, отримані на основі формули (5), зокрема рис.8

Рис.8. Залежності $k(E_b/N_0)$ при $P_s = \text{const}$

Здавалось би, залежності (рис.8) можна отримати аналогічно, як і залежності (рис.6). Але це неможливо, тому що для такої побудови значення функції (P_b – для рис.6, k – для рис.8) повинно бути отримано (формула 5) в «явному» виді (в лівій частині рівняння). Якщо для P_b це виконується, то для k отримати його в «явному» виді неможливо.

Вирішити вказану проблему можна використовуючи метод « $2D - 3D - 2D'$ », запропонований в [4]. Його цінність в тому, що він дозволяє складні (часом і неможливі) аналітичні перетворення

замінити еквівалентними їм (але простими) графічними перетвореннями. Вказаний метод містить 3 етапи. На 1-му етапі (2D) формується необхідне сімейство залежностей на площині (для даного прикладу – це сімейство рис.6). На другому етапі основний недолік усувається (рис.6) наступним чином - кожна з сусідніх залежностей (при $k = \text{const}$) штучно «розсувається» одна від одної шляхом формування (3D) просторової залежності

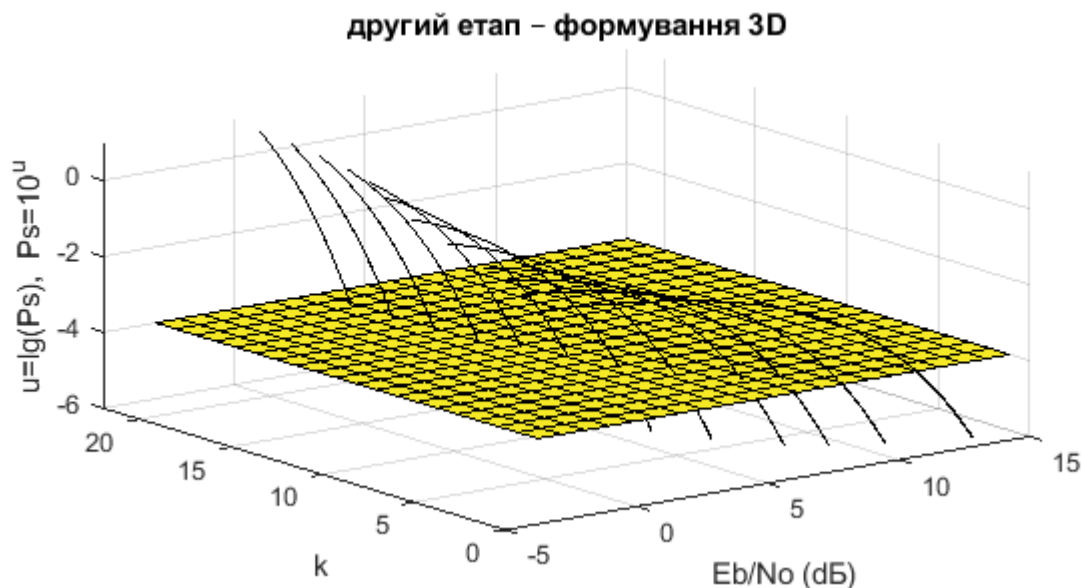


Рис.9. Другий етап методу « 2D - 3D – 2D/ »

Незважаючи на більшу складність рис.9 порівняно з рис.6 обсяг обчислень при цьому практично не збільшився. Це однакові обчислення для кожної залежності (при $k = \text{const}$) тільки різно розміщені.

На рис.9 також приведена додаткова горизонтальна площина, наприклад, при $P_s = 10^{-4}$. Лінія її перетину з сімейством залежностей при $k = \text{const}$ якраз і формує одну зі залежностей (при $P_s = 10^{-4}$ на рис.8). Формуючи послідовно горизонтальну площину на інших рівнях ($P_s = 10^{-6}$, $P_s = 10^{-5}$, $P_s = 10^{-3}$) отримано аналогічно інші залежності (рис. 8).

На третьому етапі на основі даних (рис.9) формується (2D') шукана залежність на площині (рис.8). Для цього достатньо здійснити проекцію даних (рис.9) на горизонтальну площину. Взагалі можливості методу « 2D – 3D – 2D' » багато ширші та виходять за межі даної роботи.

Сумісне використання (в одному графічному вікні) двох різних функцій спільного аргументу. В даному випадку пропонується використання суміщених графіків, що суттєво спрощує процес проектування. Їх побудова та використання показано далі про розгляді прикладів проектування конкретних ТКС.

Оптимізація проектування ТКС у цілому

Зменшення кількості варіантів систем рівнянь необхідних для вибору ефективних ТКС. При аналізі даних (рис.7) показано, що їх кількість досить значна (60 варіантів). Тому постає питання їх суттєвого зменшення. Вказане зменшення кількості варіантів ТКС здійснюється поетапно.

На першому етапі здійснюється поділ 6-и параметрів, які потрібно визначити (рис.7), на дві групи: які потрібно визначати в 1-у чергу (2-у чергу). Для цього формула Найквіста (8), яку містить також блок 5 (рис.7) модифікується (з врахуванням залежностей (1,а), (1,б) та (9)) наступним чином:

$$C_n = CW = 2k \quad . \quad (11)$$

Далі в блоках (2-6 (рис.7)), які містять параметри C та W , здійснюється заміна даних параметрів згідно (11) на параметр k . В результаті з 6-и параметрів (рис.7) залишається 4-и (P_b ,

k , (E_b/N_0) , (S/N)), які необхідно визначати в першу чергу. Завдяки тому, що вказані 4-и параметри отримані з використанням формули Найквіста (тобто блоку 5 залежності №3 (рис.7), відпадає потреба у використанні блоку 5 при формуванні системи рівнянь.

Таким чином, у результаті виконання даного етапу, отримано наступні спрощення:

- кількість параметрів, які необхідно визначати в першу чергу, зменшилась з 6-и до 4-х;
- кількість рівнянь в системі, необхідна в даному випадку, зменшилась із 4-х до 3-х.

На другому етапі відбувається подальше зменшення кількості параметрів, які необхідно визначати першочергово, та кількість рівнянь необхідних для цього. Аналіз показує, що з 4-х можливих варіантів систем рівнянь (рис.7) доцільно використовувати тільки два варіанти, які містять інформацію: про відношення сигнал/шум в однаковому виді ((E_b/N_0) або (S/N)), тобто:

- варіант 1 (блок 1 та блок 3, які мають тільки відношення (E_b/N_0) та не містять відношення (S/N));
- варіант 2 (блок 2 та блок 4, які містять тільки відношення (S/N) та не містять відношення (E_b/N_0)).

Варто зазначити, що варіанти (1 та 2) інформаційно рівноцінні, причому трудомісткість їх використання практично однакова. Тому далі достатньо використовувати тільки один із них. Унаслідок із тим, що більш поширеним [1] є використання відношення сигнал/шум у виді (E_b/N_0) , доцільно використовувати варіант 1. Враховуючи те, що варіант 1 не містить параметра (S/N) , немає потреби використовувати залежність №4 блок 6 (рис.7) у системі рівнянь.

Отже, в результаті другого етапу, отримано спрощення:

- кількість параметрів, які необхідно визначати в першу чергу, зменшилась з 4-и до 3-х (P_b , k , (E_b/N_0));
- необхідна кількість рівнянь в системі зменшилась з 3-х до 2-х.

Через те, що в даному випадку можна визначити тільки 2 параметри, третій параметр необхідно задати. Враховуючи те, що при проектуванні ТКС першочерговим є забезпечення параметра P_b , його необхідно прийняти заданим, згідно (4).

Отже, кількість варіантів необхідних для розгляду систем рівнянь зменшено з 60-и (рис.7) до 1-го.

На третьому етапі формується система 2-х рівнянь, необхідна для визначення 3-х параметрів. Особливістю такого формування є використання аналітичних залежностей для кожного з рівнянь в графічному виді. Далі розв'язок вказаної системи рівнянь здійснюється з використанням аналітично-графічного рішення системи рівнянь, що значно оптимізовує процес проектування певної ТКС.

Одним із рівнянь є залежність k (E_b/N_0) , що приведена на рис.10. Вона використовується як «шаблон», перевагою якого є універсальність (останній не залежить від вимог до конкретної ТКС, зокрема до P_s). Для побудови залежності використано формулу Шеннона, модифіковану наступним чином [1]:

$$E_b/N_0 = (2^{Cn} - 1)/Cn \quad (12)$$

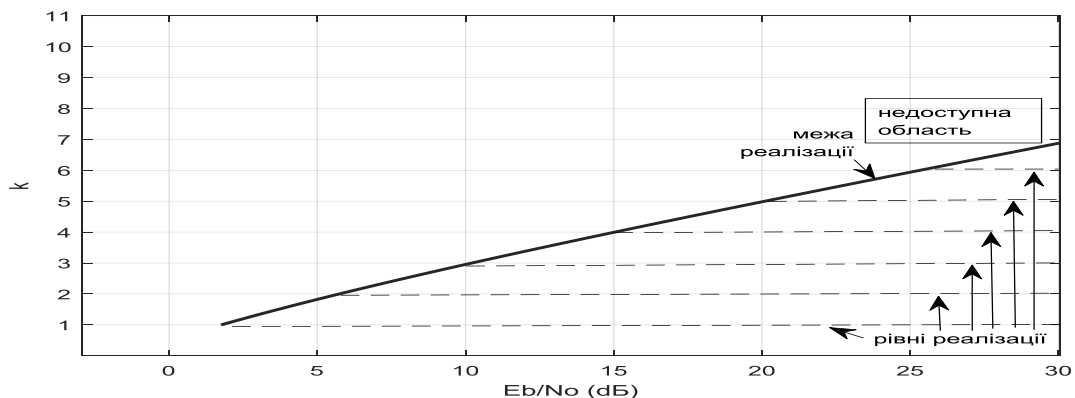


Рис.10. Залежність $k(E_b/N_0)$

Для отримання залежності $k(E_b/N_0)$ в рівнянні (12) здійснено заміну C_n згідно (11).

При побудові графічних залежностей (рис. 10 та інших) зручно використовувати значення параметра (E_b/N_0) в децибелах. Проте при визначенні P_s (5) застосовується відношення E_b/N_0 (в разях). Для оперативного переходу між вказаними значеннями відношення сигнал/шум зручно мати таку можливість. Для цього пропонується використання суміщеного графіка (рис. 11), в якому відображаються дві функції спільного аргументу, але з суттєво різними значеннями по осі Y

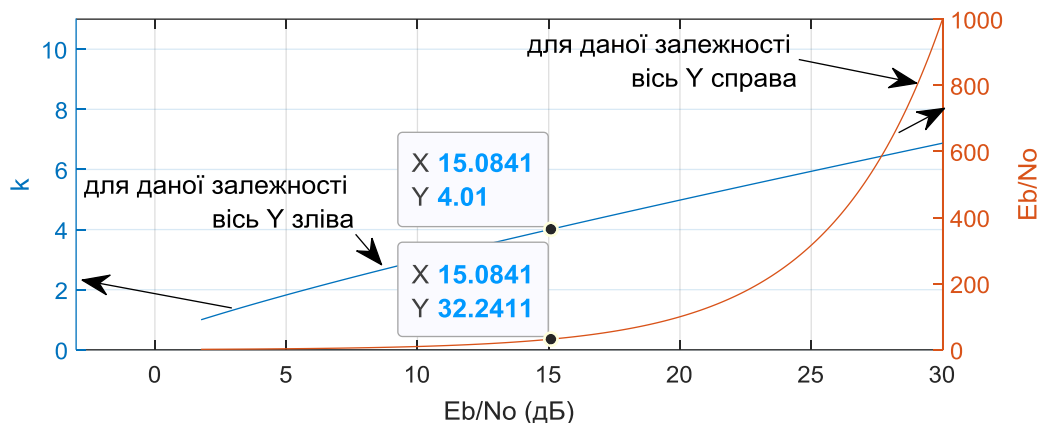


Рис.11. Суміщений графік для залежностей $k(E_b/N_0, \text{дБ})$ та $E_b/N_0(E_b/N_0, \text{дБ})$

Видно, що для $E_b/N_0 = 15$ дБ, значення $E_b/N_0 = 32.2$

Другим рівнянням вказаної системи є залежність $k(E_b/N_0)$ при значенні $P_b = \text{const}$, яке задається при проектуванні.

Проектування при заданому значенні P_s та вибір найбільш ефективної ТКС

Таке проектування доцільно розглядати на прикладі конкретної ТКС (для якої $P_s = P_0 = 10^{-10}$).

Для цього «шаблон» (рис.10) доповнюється залежністю $k(E_b/N_0)$ при $P_s = 10^{-10}$, отриманої з використанням методу « $2D - 3D - 2D'$ ».

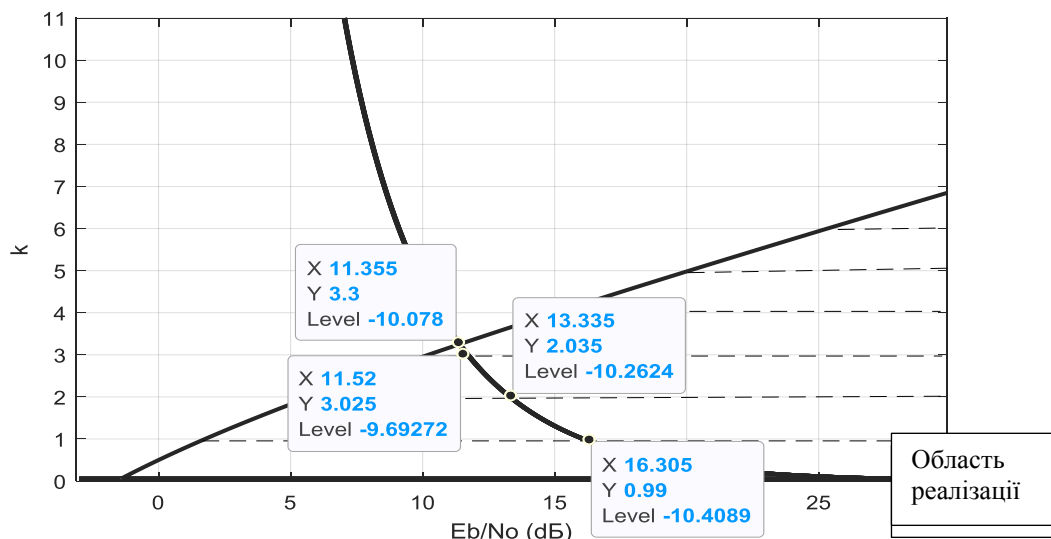


Рис.12. Визначення параметрів (k , E_b/N_0 та C_n) ТКС при заданому значенні параметра $P_s = P_0 = 10^{-10}$

Видно, що дана ТКС може бути реалізована при виконанні умови $k \leq 3.3$. Враховуючи те, що параметр k може приймати тільки цілі значення, можливі 3 варіанти ефективних систем:

- при $k=1$ та $E_b/N_0=16.3$ дБ;
- при $k=2$ та $E_b/N_0=13.3$ дБ;
- при $k=3$ та $E_b/N_0=11.5$ дБ.

Звичайно, кожен із 3-х варіантів може реалізовуватися також при більшому значенні E_b/N_0 (що небажано), тоді такий варіант перестає бути ефективним. Серед даних випадків найбільш ефективним є варіант при $k=3$, якому властиві суттєві переваги:

- необхідне найменше значення $E_b/N_0=11.5$ дБ;
- при більшому значенні $k=3$ забезпечується вище значення пропускної здатності C (11) навіть при $W=\text{const}$.

Таким чином для даної (найбільш ефективної) ТКС відомі вже 4 значення (заданий параметр $P_s=10^{-10}$, визначені параметри $k=3$, $E_b/N_0=11.5$ дБ та згідно (11) відношення $C/W=2*3=6$).

При цьому можливі два варіанти використання отриманої залежності $C/W=2*3=6$. Якщо відома наявна смуга частот, наприклад $W=2$ МГц, то отримується значення пропускної здатності $C=2*6=12$ Мбіт/с. Якщо ж задано необхідне значення пропускної здатності, наприклад 30 Мбіт/с, то необхідна смуга частот становить $W = 30/6 = 5$ МГц. Таким чином, отримано 5 параметрів даної ТКС.

Якщо необхідно отримати значення 6-го параметру (S/N , що потрібно не часто), то для цього використовуються залежності (2,6) та (11), що нескладно.

На основі наведеного прикладу розроблено алгоритм оптимального проектування ефективних ТКС (рис.13).

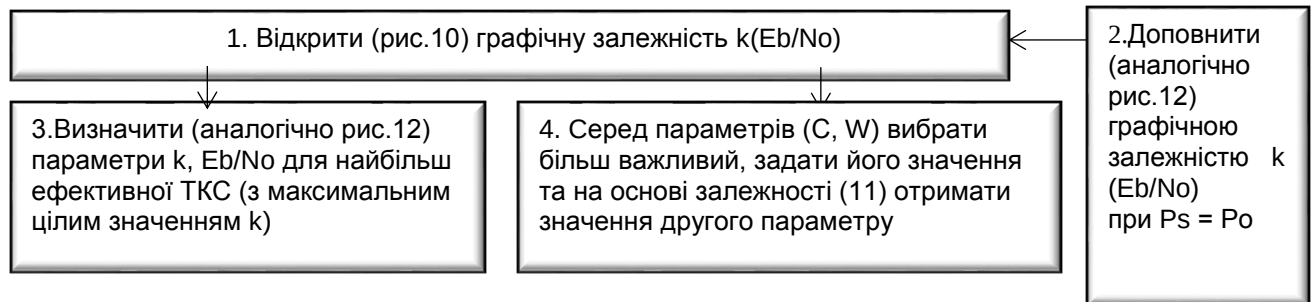


Рис.13. Алгоритм проектування ефективних ТКС

Висновки

В роботі розглянуто дві важливі складові, що стосуються реалізації ТКС: оптимізації проектування та вибору серед можливих варіантів реалізації ТКС більш ефективних.

1. Оптимізація проектування здійснюється завдяки широкому використанню сучасних програмних пакетів, зокрема MATLAB, що наближає проведення проектування до автоматизованого. Також широко використовується аналітично-графічний підхід, при якому складні (часто навіть неможливі) аналітичні перетворення замінюються еквівалентними графічними перетвореннями. При цьому процес проектування практично не ускладнюється, але забезпечує можливість візуального сприйняття суті обробки сигналів в окремих вузлах ТКС. Серед запропонованих шляхів оптимізації варто виділити наступні:

- визначення ймовірності помилкового приймання бітів інформаційних сигналів з допомогою спеціалізованих засобів пакету MATLAB;
- використання методу «2D- 3D- 2D'», що дозволяє спростити формування необхідних (для оптимізації проектування) графічних залежностей;
- застосування суміщених графіків, що дозволяють замінити необхідність незручного використання двох графічних вікон, зручністю використання одного графічного вікна.

2. На основі проведених досліджень розроблено алгоритм проектування ефективних ТКС, який дозволяє в кожному конкретному випадку:

- отримати всі можливі варіанти ефективних (згідно запропонованого критерію) ТКС;
- сформулювати критерій вибору поміж отриманих варіантів більш ефективного.

Література

- 1.Скляр Бернارد. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд.2-е, испр.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 1104 с.
- 2.Столлингс В.Беспроводные линии связи и сети. : Пер. с англ. М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. 640 с. .
- 3.Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2007. 751 с.
- 4.. Климаш М.М, Пелішок В.О.. Проєктування ефективних систем безпроводного зв'язку. Digital signal processing. Modeling in MATLAB Львів:, 2016. 232 с.
- 5.Солонина А.И., Арбузов С.М. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB. БХВ-Петербург, 2008. 816 с.
- 6.Дьяконов В.П. MATLAB SIMULINK для радиоинженеров. М.: ДМК Пресс, 2011. 976 с

References

1. Sclar, Bernard. Tsifrovaya sviaz. Teoreticheskiye osnovy i prcticheskoye primenieniye. Izd.2-ye, ispr.: Per. s angl.[Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. М.: Izdatelskiy dom «Wiliams», 2004. – 1104 s.
2. Stollings V. Besprovodnyye liniyi sviazi i sieti.[Wireless communication lines and networks.]. Per. s angl. - М. : Izdatelskiy dom «Wiliams», 2003. – 1104 s.: ил.
3. Sergiyenko A.B. Tsifrovaya obrabotka signalow: Uchebnik dlia vuzov [Digital signal processing]:. 2-ye izd. SPB.: Piter, 2007. 751 s.
4. Klymash. M.M.,. Pelishok V.O. Proektuvannia efektyvnyh system bezprovidnoho zviazku [Designing effective wireless communication systems]. Lviv: 2016. 232 s. Digital signal processing. Modeling in MATLAB
5. Solonina A.I., Arbuzov S.M. Tsifrovaya obrabotka signalow. Modelirovaniye v MATLAB[Digital signal processing. Modeling in MATLAB]. BXV-Peterburg, 2008. 816 s.
6. Diakonov V.P. MATLAB SIMULINK dlia radioinzhenerov.[MATLAB SIMULINK for radio engineers] М.: DМК PRESS, 2011. 976 sl.