

ДОСЛІДЖЕННЯ Й ОПТИМІЗАЦІЯ МОДУЛЯЦІЇ СИГНАЛУ ЗАСОБАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

© Горбатий І.В., Климаш М.М., 2010

Запропоновано метод дослідження й оптимізації модуляції сигналу за критерієм максимальної інформаційної ефективності телекомунікаційної системи чи мережі передавання даних засобами математичного моделювання. Показано адекватність запропонованого методу порівняно з аналітичними методами дослідження.

The method of research and optimization of signal modulation by criterion of maximal informative efficiency of the data transmission telecommunication system or network by facilities of mathematical modeling was offered. The adequacy of offered method by comparison to the analytical methods of research was shown.

Вступ. У процесі передавання даних від застосованої у телекомунікаційній системі модуляції сигналу відіграє важливу роль для забезпечення якості. Загалом розрізняють низькочастотну та смугову модуляції. Під час здійснення низькочастотної модуляції (baseband modulation) під дією інформаційного сигналу формується модульований сигнал у тому самому діапазоні частот, у якому знаходиться інформаційний сигнал.

Під час здійснення смугової модуляції (bandpass modulation) для формування модульованого сигналу використовують колювання, параметри якого змінюють відповідно до зміни інформаційного сигналу (носійне колювання). У такому разі модуляція – це процес зміни в часі значень одного або кількох параметрів носійного колювання відповідно до зміни інформаційного модулюючого сигналу. У радіотехніці та телекомунікаціях широке поширення одержали системи модуляції, які використовують як носійне гармонійне колювання (В):

$$U_{\text{нос}}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

де U_0 – амплітуда, В; ω_0 – кругова частота, рад/с; φ_0 – фаза, рад.

У гармонійному колюванні можлива зміна трьох параметрів: амплітуди, кругової частоти та фази за законом інформаційного модулюючого сигналу. Сьогодні, під час створення телекомунікаційних систем передавання даних особливого поширення набули різновиди фазової та амплітудно-фазової модуляцій.

До широкоживаних належать квадратурна фазова маніпуляція (quadrature phase shift keying – QPSK), амплітудно-фазова маніпуляція (amplitude phase keying – APK), квадратурна амплітудна модуляція (quadrature amplitude modulation – QAM) [1, 2]. Поряд з цим заслуговують на увагу нові різновиди модуляції, зокрема, амплітудна модуляція багатьох складових (АМБС) [3]. У процесі проектування телекомунікаційних систем та мереж передавання даних важливим є досягнення високої технічної та економічної ефективностей створюваних систем та мереж. Підвищення таких ефективностей може бути досягнуте, зокрема, використанням певного різновиду модуляції. Для обрання найефективнішої за певних умов роботи системи модуляції сигналу необхідні методи та методики, що дають можливість порівняти якісні характеристики різновидів модуляції на основі єдиних підходів. Це можливо як з використанням теоретичних, так і експериментальних методів досліджень. Останнім часом активно розвиваються методи математичного моделювання, що уможливають поєднати багато переваг згаданих вище методів. Використання таких методів можливе під час застосування засобів обчислювальної техніки.

У зв'язку з цим актуальним завданням є розроблення методів моделювання, що дають змогу досліджувати характеристики ефективності телекомунікаційних систем та мереж передавання даних, побудованих із використанням відомих та нових різновидів модуляції, та подальшого вибору виду модуляції й оптимізації параметрів модуляції. Це питання в сучасній літературі висвітлене недостатньо, тому потребує подальших досліджень.

Мета роботи – дослідити й оптимізувати модуляцію сигналу в телекомунікаційних системах та мережах передавання даних засобами математичного моделювання.

1. Інформаційна ефективність телекомунікаційної системи чи мережі передавання даних

Інформаційна ефективність η показує, наскільки швидкість передавання інформації менша від пропускну здатності телекомунікаційної системи (мережі) і дорівнює:

$$\eta = \frac{\gamma}{\log_2\left(\frac{\gamma}{\beta} + 1\right)}, \quad (2)$$

де γ – частотна ефективність системи; β – енергетична ефективність.

Достовірність передавання інформації через телекомунікаційну систему вважатимемо заданою й характеризуватимемо її під час передавання дискретної інформації ймовірністю символної помилки $P_{сим}$. За певного значення ймовірності помилки енергетична ефективність становить

$$\beta = \frac{N_0}{E_b}, \quad (3)$$

де N_0 – енергетична спектральна густина білого шуму в каналі зв'язку; E_b – енергія одного біта інформації.

Для обчислення енергетичної ефективності використовують залежності ймовірності помилки для певного різновиду модуляції від відношення середньої енергії одного біта інформації до енергетичної спектральної густини білого шуму у каналі зв'язку.

Частотна ефективність дорівнює

$$\gamma = V / \Delta F_c, \quad (4)$$

де V – швидкість передавання інформації; ΔF_c – ширина спектра сигналу (приймають, що спектр сигналу займає усю смугу пропускання каналу ΔF).

Отже, для обчислення інформаційної ефективності необхідно визначити енергетичну та частотну ефективності телекомунікаційної системи чи мережі під час використання певного виду модуляції сигналу. Очевидно, що вид модуляції впливає на досягнення певного значення інформаційної ефективності. Вибір оптимального за цих умов використання телекомунікаційної системи виду модуляції сигналу дає змогу забезпечити найвищу можливу інформаційну ефективність системи.

2. Класифікація різновидів модуляції сигналу за інформаційною ефективністю телекомунікаційної системи чи мережі передавання даних. Як було сказано вище, сьогодні відомо багато різновидів модуляції сигналу, що можуть бути використані під час створення телекомунікаційних систем та мереж передавання даних. Особливості відомих широкоживаних різновидів модуляції досліджені доволі детально, а також відомою є інформаційна ефективність під час їх застосування. Підвищення інформаційної ефективності може бути досягнуте з використанням нових (зокрема, комбінованих) видів модуляції сигналу.

Для підвищення ефективності перспективним залишається використання багатопозиційних модульованих сигналів. Розрізняють два класи таких сигналів [4]. До першого класу належать сигнали з щільними сигнальними сузір'ями, для яких за зростання кількості сигнальних точок

сузір'я (зростання кількості можливих символів) зростає швидкість передавання інформації, а відстань між сигнальними точками на сигнальній площині зменшується, тобто за збільшення кількості можливих символів зростає частотна ефективність, а енергетична ефективність зменшується. Прикладом таких сигналів є фазоманіпульовані сигнали та деякі різновиди АРК сигналів. До другого класу належать сигнали, для яких за збільшення кількості сигнальних точок сузір'я відстань між сигнальними точками збільшується і відповідно зростає енергетична ефективність за рахунок зменшення частотної ефективності. Такими є біортогональні, симплексні та ортогональні сигнали, зокрема, частотно-маніпульовані сигнали.

Особливе місце у системах зв'язку модуляція QPSK, що належить до біортогональних з кількістю символів, $M = 4$. Це найефективніша з-поміж простих модуляцій сигналу, тому прийнято порівнювати з нею інші види модуляції та завадостійкого кодування. Усі телекомунікаційні системи передавання інформації порівняно з системою на основі QPSK можуть бути поділені на чотири групи: 1 – малоефективні, що характеризуються програшем по β та γ (наприклад, бінарна амплітудна АМ-2 та частотна ЧМ-2 маніпуляції); 2 – системи з високою енергетичною ефективністю, що забезпечують виграш по β та програш по γ (системи із завадостійким кодуванням); 3 – системи з високою частотною ефективністю, що характеризуються виграшем по γ та програшем по β (системи з багатопозиційними фазоманіпульованими та АРК-сигналами); 4 – високоефективні системи, що дають змогу забезпечити виграш за обома показниками β та γ (системи з використанням складних сигнально-кодових конструкцій).

Серед розглянутих різновидів модуляції часто вживаними залишаються фазоманіпульовані сигнали, що дають змогу здійснювати обмін енергетичної ефективності на частотну, та більш вживані ефективні АРК-сигнали. Останнім часом широкого застосування набули QAM-сигнали, у яких здійснюють модуляцію одночасно дві ортогональні складові носійного коливання, при цьому кожна точка сигнального сузір'я характеризується неповторюваною амплітудою й фазою.

Отже, для підвищення інформаційної ефективності слід використовувати нові високоефективні різновиди модуляції. Для дослідження характеристик нових різновидів модуляції та їх порівняння з відомими необхідні універсальні методи, пристосовані до аналізу обох груп різновидів модуляції.

3. Метод дослідження й оптимізації модуляції сигналу за критерієм максимальної інформаційної ефективності телекомунікаційної системи чи мережі передавання даних засобами математичного моделювання. Загалом процес пошуку високоефективного різновиду модуляції для конкретної системи передавання даних є складним, оскільки необхідно розглянути багато варіантів можливості здійснення модуляції. Використання певного різновиду модуляції або комбінації з кількох різновидів різних модулюючих сигналів, використання усіх або лише частини сигнальних точок сигнального сузір'я, застосування певних методів оброблення сигналів у процесі модуляції та демодуляції (зокрема, цифрового оброблення) дають змогу отримати велику кількість можливих модульованих сигналів, що будуть відрізнятися енергетичною, частотною, а тому й інформаційною ефективностями. Вибір методів здійснення модуляції та демодуляції є оптимізаційною задачею, оскільки значення інформаційної ефективності залежить від багатьох показників.

Варто зазначити, що дослідження різновидів модуляції можливе теоретичними методами з використанням відповідних аналітичних співвідношень або експериментальними методами із застосуванням певних методик вимірювань та засобів вимірювальної техніки. Кожен метод має свої переваги та недоліки. Перевагою теоретичного методу є можливість здійснювати аналіз систем без їх реалізації на практиці, проте для аналізу великих систем потрібні складні математичні моделі, що утруднює процес досліджень, а спрощення моделей спричиняє погіршення точності обчислення досліджуваних характеристик. Застосування експериментальних методів можливе лише за наявності реалізованої на практиці системи, а точність вимірювання досліджуваних характеристик залежить від якості застосованих експериментальних методик та вимірювального обладнання. Тому

останнім часом активно розвиваються методи математичного моделювання складних систем. Вони дають змогу досліджувати системи без їх практичної реалізації, що скорочує витрати в процесі науково-пошукових та проектних робіт, а також імітувати різноманітні умови роботи досліджуваних систем, що дає можливість оцінити якість та ефективність проектованої системи в умовах, наближених до реальних. Такі методи особливого розвитку набули лише в наш час, оскільки, як правило, потребують використання сучасної обчислювальної техніки з великою швидкістю.

З метою виявлення високоефективних різновидів модуляції запропоновано метод дослідження й оптимізації модуляції сигналу за критерієм максимальної інформаційної ефективності телекомунікаційної системи чи мережі передавання даних засобами математичного моделювання. Цей метод полягає в застосуванні таких методик, процедур та алгоритмів у процесі виявлення модуляції сигналу з максимальною інформаційною ефективністю:

- процедура кодування джерела інформації (формування вхідного інформаційного файла даних з інформаційних сигналів від джерела даних);
- процедура попереднього оброблення даних та формування вхідного пакета символів з досліджуваного вхідного інформаційного файла даних або вхідного тестового файла даних;
- методика оптимізації та побудови сигнального сузір'я досліджуваного різновиду модуляції;
- алгоритм формування модулюючих інформаційних сигналів для передавання вхідного пакета символів;
- методика дослідження енергетичних та спектральних характеристик досліджуваного різновиду модуляції;
- процедура здійснення обраного різновиду модуляції сигналу;
- процедура врахування впливу адитивної або (та) мультиплікативної завади, що описується вибраним випадковим законом;
- процедура здійснення демодуляції сигналу;
- алгоритм розпізнавання символів вирішуючим пристроєм;
- методика визначення відношення середньої енергії одного біта інформації до енергетичної спектральної густини шуму в каналі зв'язку;
- методика визначення статистичної ймовірності символної помилки $P_{сим}$ в досліджуваній системі за певного відношення середньої енергії одного біта інформації до енергетичної спектральної густини шуму в каналі зв'язку;
- процедура визначення статистичної ймовірності бітової помилки $P_{б}$ в досліджуваній системі;
- процедура оброблення даних після демодуляції та врахування її впливу на ймовірність символної $P_{сим}$ та бітової $P_{б}$ помилок у досліджуваній системі;
- процедура формування інформаційних сигналів для одержувача інформації;
- методика обчислення енергетичної β , частотної γ та інформаційної η ефективностей досліджуваної системи;
- алгоритм порівняння характеристик кількох досліджуваних різновидів модуляції та виявлення оптимальної модуляції за критерієм максимальної інформаційної ефективності телекомунікаційної системи чи мережі передавання даних із урахуванням заданих обмежень на характеристики такої системи.

На основі запропонованого методу для його здійснення розроблено програмне забезпечення в середовищі MathCAD.

4. Приклади застосування запропонованого методу та результати досліджень. Для ілюстрації можливостей запропонованого методу дослідимо інформаційну ефективність трьох різновидів модуляції – QPSK, QAM-36 та АМБС-37. Сигнал QPSK отримують модуляцією кожної з двох ортогональних складових модулюючими сигналами з двома можливими рівнями амплітуди, QAM-36 – модуляцією кожної з двох ортогональних складових модулюючими сигналами з шістьма

можливими рівнями амплітуди, а АМБС-37 – модуляцією кожної з трьох складових, зсунутих між собою на кути $\pi/3$, модулюючими сигналами з чотирма можливими рівнями амплітуди відповідно.

Під час дослідження обраних різновидів модуляції в процесі використання процедури попереднього оброблення даних було сформовано такі вхідні тестові файли даних, яким відповідали пакети вхідних символів з рівномірною густиною розподілу ймовірності появи кожного можливого символу, що за результатами подібне до застосування процедури скремблювання даних. Це необхідно для усереднення впливу появи окремих символів на ймовірність помилки в системі зв'язку.

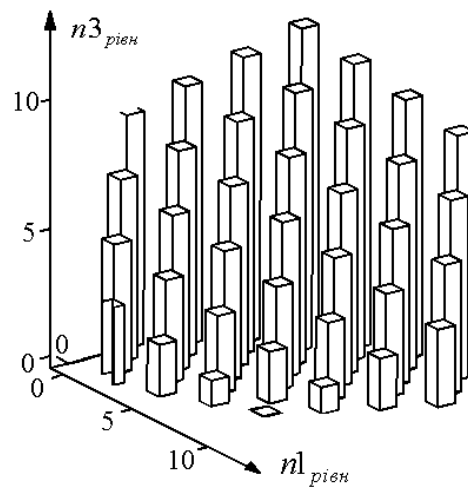
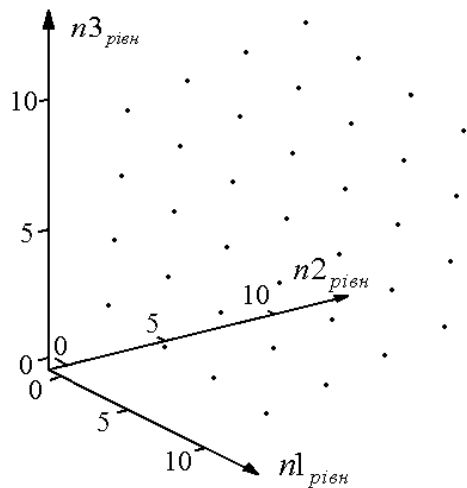
Згідно з запропонованою методикою оптимізації та побудови сигнального сузір'я досліджуваного різновиду модуляції розглянуто сигнальні сузір'я вибраних різновидів модуляції. Ця методика дає змогу досліджувати модуляцію сигналу під час застосування для передавання даних лише частини сигнальних точок, одержаних при використанні усіх можливих комбінацій модулюючих сигналів. Цю методику доцільно використовувати для побудови сигнальних решіток неортогональних різновидів модуляції сигналу з однаковими відстанями між сусідніми точками або для усунення певних точок сузір'я для покращання енергетичних характеристик модуляції. Прикладом є застосування цієї методики до оптимізації сигнального сузір'я АМБС-37. Так, під час використання усіх можливих комбінацій модулюючих сигналів сигнальна решітка міститиме 64 точки, а після оптимізації – 37 неповторюваних точок з однаковими відстанями між сусідніми точками, як це показано у [5]. Отже, у подальшому досліджуватиметься оптимізована модуляція АМБС-37 з ефективною кількістю сигнальних точок $M_{ef} = 37$.

Алгоритм формування модулюючих інформаційних сигналів для передавання вхідного пакета символів дає змогу поставити у відповідність кожному вхідному символу певні амплітуди модулюючих сигналів, а методика дослідження енергетичних та спектральних характеристик досліджуваного різновиду модуляції призначена для обчислення максимальної, мінімальної й середньої потужностей модульованого сигналу, мінімальної енергії різниці сусідніх символів та побудови амплітудного та фазового спектрів модульованого сигналу з використанням методу визначення спектральних характеристик модулюючих сигналів, що є періодичними послідовностями прямокутних відеоімпульсів довільної амплітуди та тривалості [6].

Для проведення подальших досліджень було використано процедури здійснення модуляції та демодуляції сигналу разом з процедурою врахування впливу адитивного білого шуму з гауссівським розподілом амплітуд. За допомогою згаданих процедур було реалізовано математичні моделі модуляторів та демодуляторів для досліджуваних різновидів модуляції сигналу та враховано вплив шуму заданого рівня. Після демодуляції застосовано алгоритм розпізнавання символів вирішуючим пристроєм.

Особливістю запропонованого методу є можливість здійснювати модуляцію та демодуляцію як QPSK і QAM, так і АМБС, при цьому для демодуляції QPSK і QAM використовують два фазові демодулятори, а для АМБС із трьома складовими – три. Під час здійснення демодуляції QPSK- або QAM-сигналів кожену сигнальну точку можна зобразити на площині демодуляції в декартовій системі координат з координатами, що дорівнюють значенням напруг на виходах обох демодуляторів, а за демодуляції АМБС з N складовими використовують N -вимірний простір демодуляції. Кожна точка АМБС-сигналу у такому просторі має координати, що дорівнюють значенням амплітуд сигналів на виходах кожного демодулятора, або відносні координати, що дорівнюють номерам можливих рівнів амплітуди на виходах демодуляторів. У випадку АМБС-37 з трьома складовими сигнальне сузір'я в тривимірному просторі демодуляції з осями $n1_{рівн}$, $n2_{рівн}$ та $n3_{рівн}$ матиме вигляд, зображений на рисунку а та б, при цьому на виході кожного демодулятора може бути присутній сигнал з одним із 13-ти можливих рівнів амплітуд сигналів.

Як бачимо з рисунка а, для цієї модуляції точки сигнального сузір'я знаходяться в площині, нахиленій до осей координат під певними кутами, й утворюють правильний шестикутник. Для кращої ілюстрації розташування в просторі точок сигнального сузір'я їх додатково представлено у вигляді вершин вертикальних стовпців (рисунок б).



a

б

Простір демодуляції АМБС-37

Бачимо, що для однозначної демодуляції АМБС-37 достатньо лише двох фазових демодуляторів, проте у такому випадку завадостійкість системи буде меншою порівняно з використанням трьох демодуляторів.

Для подальших розрахунків визначено відношення середньої енергії одного біта інформації до енергетичної спектральної густини шуму в каналі зв'язку за відповідною методикою. Використовуючи одержані після демодуляції та розпізнавання значення символів, здійснено їх порівняння з символами, що були передані на вхід модулятора, та визначено статистичну ймовірність символної помилки $P_{сим}$ у досліджуваній системі за певного відношення середньої енергії одного біта інформації до енергетичної спектральної густини шуму в каналі зв'язку, а також визначено статистичну ймовірність бітової помилки $P_{б}$ у досліджуваній системі.

Наявні у запропонованому методі процедура оброблення даних після демодуляції та процедура формування інформаційних сигналів дають змогу врахувати вплив методів оброблення даних та формування інформаційних сигналів на ймовірність символної $P_{сим}$ та бітової $P_{б}$ помилок у досліджуваній системі.

Використовуючи одержані результати математичного моделювання, визначено енергетичну ефективність β за ймовірності символної помилки $P_{сим} = 10^{-2}$, за допомогою аналітичного співвідношення (4) обчислено частотну ефективність γ , а з використанням співвідношення (2) – інформаційну ефективність η телекомунікаційних систем, побудованих на основі досліджуваних різновидів модуляції сигналу. Результати обчислень наведено у таблиці.

Для оцінки адекватності запропонованого методу здійснено порівняння результатів математичного моделювання з результатами аналітичного обчислення енергетичної β та інформаційної η ефективностей телекомунікаційних систем за ймовірності символної помилки $P_{сим} = 10^{-2}$, використовуючи відомі співвідношення для теоретичного обчислення ймовірності символної помилки QPSK і QAM [1, 2] та запропоноване співвідношення для теоретичного обчислення ймовірності символної помилки АМБС:

$$P_{сим\ АМБС} \approx n_c \cdot Q\left(\sqrt{\frac{K_E \cdot \log_2(M_{ef})}{2} \cdot \frac{E_b}{N_0}}\right), \quad (5)$$

де n_c – середня кількість сусідніх точок для однієї точки сигнального сузір'я; $Q(x)$ – функція густини ймовірності гауссової випадкової величини від аргументу x ; M_{ef} – ефективна кількість

символів в алфавіті маніпульованого сигналу; K_E – відношення різницевої енергії двох сусідніх символів до середньої енергії усіх символів.

Ефективність досліджуваних різновидів модуляції за $P_{сум} = 10^{-2}$

Модуляція	β , дБ	$\delta\beta$, %	γ , дБ	η	$\delta\eta$, %
QPSK	-5,171	0,70	3,010	0,684	0,30
QAM-36	-12,288	0,20	7,135	0,799	0,13
АМБС-37	-11,912	0,84	7,168	0,820	0,62

У процесі оброблення результатів обчислено відносну похибку $\delta\beta$ моделювання енергетичної ефективності та відносну похибку $\delta\eta$ моделювання інформаційної ефективності стосовно теоретично обчислених значень, наведених в таблиці. Виявлено, що похибка моделювання зменшується за збільшення розміру пакета вхідних символів. Здійснивши порівняння характеристик досліджених систем, зроблено висновок про те, що телекомунікаційна система (мережа) передавання даних, побудована на основі АМБС-37, характеризується найбільшою інформаційною ефективністю.

Отже, за результатами досліджень можна зробити висновок про адекватність запропонованого методу та можливість його використання для дослідження й оптимізації модуляції сигналу за критерієм максимальної інформаційної ефективності телекомунікаційної системи чи мережі передавання даних.

5. Переваги запропонованого методу. За результатами здійснених досліджень телекомунікаційних систем та мереж передавання даних виявлено такі переваги запропонованого методу:

- універсальність, що дає змогу досліджувати як відомі, так і нові різновиди модуляції сигналу, а також їх комбінації, зокрема такі, для яких наразі відсутні аналітичні співвідношення для визначення їхніх характеристик, необхідних для обчислення енергетичної β , частотної γ або інформаційної η ефективностей;
- застосування засобів математичного моделювання, що дає змогу наблизити процес досліджень до можливих реальних умов роботи проекрованої телекомунікаційної системи чи мережі без необхідності її реалізації для здійснення досліджень, що сприяє зменшенню часу за вибору необхідного методу модуляції сигналу, оптимального за заданих умов роботи проекрованої системи, та зменшенню фінансових затрат на проектні роботи;
- можливість дослідження впливу процедури кодування джерела інформації та процедури формування інформаційних сигналів на ефективність системи;
- дослідження впливу процедур оброблення сигналу до модуляції та після демодуляції, що сприяє виявленню найефективніших процедур, які дають змогу додатково підвищити ефективність телекомунікаційної системи;
- можливість здійснення оптимізації модуляції сигналу, що дає змогу забезпечити найкращу ефективність телекомунікаційної системи чи мережі передавання даних;
- дослідження впливу різновиду адитивної та (або) мультиплікативної завад на ефективність системи;
- обчислення енергетичної β , частотної γ та інформаційної η ефективностей досліджуваної системи з використанням значень параметрів, одержаних засобами математичного моделювання;
- можливість порівняння багатьох методів формування та оброблення сигналів на основі єдиних підходів, умов та критеріїв.

Цей метод може використовуватись разом з методами дослідження завадостійкого кодування у телекомунікаційних системах та мережах для підвищення їхньої ефективності.

Висновки. На основі проведених наукових досліджень можна зробити такі висновки:

- запропоновано новий метод дослідження й оптимізації модуляції сигналу за критерієм максимальної інформаційної ефективності телекомунікаційної системи чи мережі передавання даних засобами математичного моделювання;
- такий метод дає змогу наблизити процес досліджень до можливих реальних умов роботи проєктованої телекомунікаційної системи чи мережі без необхідності її реалізації для здійснення досліджень, що сприяє зменшенню часу під час вибору необхідного методу модуляції сигналу та зменшення фінансових затрат на проєктні роботи;
- цей метод є універсальним і уможливило забезпечити найкращу ефективність телекомунікаційної системи чи мережі передавання даних оптимізацією модуляції сигналу, а також урахуванням впливу процедур кодування джерела інформації, формування інформаційних сигналів для одержувача інформації, оброблення сигналу до модуляції та після демодуляції в умовах адитивних та (або) мультиплікативних завад;
- такий метод дає змогу обчислення енергетичної β , частотної γ та інформаційної η ефективностей досліджуваної системи з використанням значень параметрів, одержаних засобами математичного моделювання;
- за допомогою запропонованого методу можливо порівняти багато методів формування та оброблення сигналів на основі єдиних підходів, умов та критеріїв;
- запропонований метод доцільно використовувати під час проєктування нових та модернізації існуючих телекомунікаційних систем та мереж передавання даних із метою підвищення їх ефективності.

У подальшому доцільно виявити різновиди модуляції сигналу, що є найефективнішими в умовах обмеженої смуги пропускання телекомунікаційного каналу.

1. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение.* – 2-е изд. / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 1104 с. 2. Proakis, John G., *Digital Communications, 4th ed.* – New York, McGraw-Hill, 2000. – 1024 p. 3. Горбатий І. Метод підвищення ефективності телекомунікаційних каналів у системах зв'язку й дистанційного зондування землі // Вісник НУ «Львівська політехніка» «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». – Львів: 2009. – №650. – С. 173–177. 4. Теория передачи сигналов: Учебник для вузов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М. Финк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с. л. 5. Горбатий І.В. Дослідження інформаційної ефективності сучасних різновидів модуляції сигналу // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – К., 2009. – Вип. 54. – С. 66–71. 6. Горбатий І.В. Дослідження спектральних характеристик КАМ сигналів: Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – К., 2008. – Вип. 47. – С. 56–62.