

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

**ГОРБАТИЙ ІВАН ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 621.39

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ФОРМУВАННЯ Й ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ  
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ  
СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Львів – 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Климаш** Михайло Миколайович,  
Національний університет  
“Львівська політехніка”,  
завідувач кафедри телекомунікацій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Захарченко** Микола Васильович,  
Одеська національна академія зв'язку  
ім. О.С.Попова,  
проректор з навчальної роботи

доктор технічних наук, професор  
**Толюпа** Сергій Васильович,  
Державний університет телекомунікацій,  
директор Навчально-наукового інституту  
захисту інформації

доктор технічних наук, професор  
**Бараннік** Володимир Вікторович,  
Харківський університет повітряних сил  
ім. І. Кожедуба,  
начальник кафедри бойового застосування  
та експлуатації АСУ

Захист відбудеться 13 лютого 2015 р. о 13.00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, аудиторія 218 11 навчального корпусу)

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1)

Автореферат розісланий 23 грудня 2014 р.

*Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради, д.т.н., проф.*

Бондарев А.П.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В еру науково-технічного прогресу неухильно зростає потреба в обміні інформацією. Переважну частину всієї інформації в наш час передають за допомогою інформаційних систем, що є сукупністю телекомунікаційних мереж і засобів для накопичування, оброблення, зберігання та розповсюдження даних. Важливість забезпечення процесу обміну інформацією спричинює велику увагу української держави до розвитку інформаційних систем та технологій, що відображено, зокрема, у Законі України “Про телекомунікації”. На початку XXI століття інформацію в основному передають у цифровому вигляді, тому особливого розвитку набули телекомунікаційні системи та мережі передавання даних (ТСМПД), зокрема телекомунікаційні системи та мережі (ТСМ) наземного зв’язку, всесвітня комп’ютерна мережа Інтернет, локальні комп’ютерні мережі, системи космічного зв’язку, дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та інші.

Відомо ряд показників, що характеризують ТСМ. Особливо важливим показником є якість – сукупність властивостей ТСМ, що обумовлюють можливості задовольнити визначені потреби у відповідності із призначенням таких ТСМ. Основними характеристиками якості ТСМ є надійність, достовірність і безпека. Також до важливих показників належить ефективність – властивість ТСМ виконувати поставлену задачу в заданих умовах використання з необхідною якістю. Розрізняють локальні показники ефективності: прагматичну, технічну, технологічну, експлуатаційну та економічну ефективність. Актуальним завданням є дослідження важливого показника ефективності ТСМПД – технічної ефективності.

Вагомий доробок у створення методів аналізу та синтезу ефективних ТСМ і їх компонентів внесли відомі зарубіжні та вітчизняні вчені Балашов В.А., Баскаков С.І., Беркман Л.Н., Бобало Ю.Я., Бунін С.Г., Величко Ю.Т., Вітербі Е.Д., Воробієнко П.П., Глоба Л.С., Заездний О.М., Захарченко М.В., Зюко А.Г., Іванов А.Б., Ільченко М.Ю., Климаш М.М., Кловський Д.Д., Котельніков В.О., Мандзій Б.А., Найквіст Г., Окосі Т., Поповський В.В., Приходько С.І., Прокіс Дж., Прудіус І.Н., Русин Б.П., Семенко А.І., Сіверс А.П., Сімон М.К., Скляр Б., Слюсар В.І., Сукачов Е.О., Тимченко О.В., Турупалов В.В., Феєр К., Фінк Л.М., Харкевич О.О., Хеммінг Р.В., Шеннон К. та інші. У роботах згаданих учених розглянуті та досліджені принципи побудови ТСМ, досліджено ефективність ТСМ та їх окремих компонентів, запропоновано методи підвищення ефективності.

У зв’язку з необхідністю передавати зростаючі об’єми інформації актуальним питанням залишається подальше підвищення технічної ефективності ТСМ, на яку впливають, зокрема, методи формування й оброблення сигналів. До них слід віднести методи коректуючого кодування, модуляції, демодуляції, коректуючого декодування, ущільнення/розділення каналів та методи (протоколи) передавання даних.

**Науково-прикладною проблемою**, вирішенню якої присвячена ця дисертаційна робота, є підвищення технічної ефективності ТСМ з

обмеженими смугою пропускання та потужністю сигналу при передаванні даних в умовах завод. За умов обмеженої потужності сигналу при певному рівні завод і обмеженої смуги пропускання системи (мережі) при певній швидкості передавання застосуванням відомих методів, як правило, не можливо досягти максимальної технічної ефективності ТСМ. Тому підвищення технічної ефективності ТСМ при передаванні даних в умовах завод за допомогою відомих методів формування й оброблення сигналів є проблемою, оскільки вступає в протиріччя з обмежувачими факторами – обмеженістю смуги пропускання та потужності сигналу. Для розв’язання цієї проблеми необхідно виявити та застосовувати такі вдосконалені відомі чи запропоновані нові методи формування й оброблення сигналів, які дозволять наблизитись до теоретичної максимально можливої ефективності ТСМ з урахуванням обмежувачих факторів. Вирішення такої проблеми є особливо важливим в умовах України, оскільки дозволяє розробляти нові високоєфективні ТСМПД, а також підвищити шляхом модернізації ефективність існуючих ТСМ, що значно дешевше від створення нових.

### **Зв’язок роботи з науковими програмами, роботами, темами.**

Дисертаційна робота безпосередньо пов’язана з Концепцією розвитку зв’язку України до 2010 року (Постанова Кабінету Міністрів України №2238 від 09.12.1999 р.), Концепцією розвитку телекомунікацій в Україні (Розпорядження Кабінету Міністрів України №316-р від 07.06.2006 р.), науково-технічними завданнями, сформульованими в Постанові Кабінету Міністрів України №942 від 07.09.2011 р. “Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року”, а також з виконанням науково-дослідної роботи (НДР) на тему “Методи та засоби для підвищення ефективності телекомунікаційних систем та мереж передавання даних” (ТК-2, 2012-2013 р.р., номер держреєстрації 0112U003524, керівник НДР – к.т.н., доцент Горбатий І.В.) на кафедрі телекомунікацій Національного університету “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення технічної ефективності ТСМПД шляхом розвитку теоретичних основ аналізу, синтезу, оптимізації методів та засобів формування й оброблення сигналів.

*Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:*

1. Удосконалити теоретичні основи визначення технічної ефективності ТСМ, побудованих із використанням різноманітних методів формування й оброблення сигналів, для вироблення комплексної характеристики.

2. Розробити нові й удосконалити відомі методи та засоби формування й оброблення сигналів для підвищення технічної ефективності ТСМ з обмеженими смугою пропускання та потужністю сигналу при передаванні даних в умовах завод.

3. Розробити методи дослідження й оптимізації запропонованих нових і вдосконалених відомих сигналів за критерієм максимальної технічної ефективності ТСМПД.

4. Удосконалити аналітичні співвідношення для визначення частотних та енергетичних характеристик модулюючих і модульованих сигналів, що дозволить підвищити точність у процесі порівняння технічної ефективності ТСМПД.

5. Удосконалити математичні моделі (ММ) ТСМ на основі різних середовищ передавання, що дозволить підвищити точність визначення технічної ефективності досліджуваних систем чи мереж, здійснювати аналіз відомих і синтез нових вискоефективних ТСМ, а також оптимізувати параметри їх окремих компонентів за багатьма критеріями з метою підвищення технічної ефективності.

6. Апробувати розроблені й удосконалені методи та засоби підвищення ефективності ТСМПД на основі різних середовищ передавання шляхом проведення моделювання за допомогою вдосконалених ММ.

*Об'єкт дослідження* – процес передавання даних у ТСМ з обмеженими смугою пропускання та потужністю сигналу в умовах завод.

*Предмет дослідження* – методи та засоби підвищення технічної ефективності ТСМПД.

*Методи дослідження.* Проведені в науковій роботі дослідження базуються на використанні теоретичних основ радіотехніки й телекомунікацій – для розроблення нових методів і засобів формування сигнально-кодкових конструкцій (СКК) та вдосконалення ММ ТСМ, на загальних положеннях теорії інформації – для дослідження технічної ефективності ТСМ, на використанні теорії систем та телекомунікацій, теорії ймовірності, методів математичного та комп'ютерного моделювання – для дослідження й оптимізації ТСМ.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Для підвищення технічної ефективності ТСМПД у дисертаційній роботі розвинуто теоретичні основи аналізу, синтезу, оптимізації методів та засобів формування й оброблення сигналів. У процесі теоретичних досліджень та проведеного комп'ютерного моделювання отримано такі нові наукові результати:

1. Удосконалено теоретичні основи визначення технічної ефективності ТСМ шляхом застосування запропонованої комплексної характеристики – коефіцієнта використання ТСМ за застосованими методами формування й оброблення сигналів (сигнальної ефективності  $\eta_c$ ), що крім інформаційної ефективності методів модуляції та розділення каналів додатково враховує інформаційну ефективність СКК, ефективність методу передавання даних і дозволяє комплексно оцінити технічну ефективність таких систем та мереж.

2. Уперше запропоновано нові різновиди амплітудно-фазової модуляції (АФМ) для застосування в ТСМПД – нове сімейство модуляцій на основі запропонованої амплітудної модуляції багатьох складових (АМБС), при здійсненні якої, на відміну від амплітудної маніпуляції (АМн), фазової маніпуляції (ФМн) та квадратурної амплітудної модуляції (КАМ), модульований сигнал формують у вигляді суми його  $N$  модульованих за амплітудою складових, які зсунуті між собою на фазові кути  $\Delta\varphi_n$ , що

дозволяє за допомогою запропонованого методу підвищення ефективності каналів електрозв'язку в радіотехнічних і телекомунікаційних системах при використанні АМБС із застосуванням запатентованого способу забезпечити вищу технічну ефективність радіотехнічних і ТСМПД або значно меншу ймовірність помилки при заданій швидкості передавання.

3. Уперше запропоновано принципи функціонування засобів для здійснення модуляції й демодуляції АМБС-сигналів із застосуванням запатентованого пристрою для передавання даних за допомогою інформаційного сигналу, сформованого на основі АМБС, які, на відміну від засобів для здійснення модуляції й демодуляції АМн-, ФМн- та КАМ-сигналів, формують та обробляють АМБС-сигнали у вигляді суми їх  $N$  модульованих за амплітудою та зсунутих між собою на фазові кути  $\Delta\varphi_n$  складових, що дозволяє забезпечити підвищення технічної ефективності радіотехнічних і ТСМПД або значне зменшення ймовірності помилки при заданій швидкості передавання.

4. Уперше запропоновано представлення процесу демодуляції сигналів у демодуляторі АМБС із  $N$  підканалами за допомогою  $N$ -вимірного простору демодуляції, застосування якого, на відміну від  $N$ -вимірного простору сигналів, дозволяє оцінити зменшення ймовірності помилки при застосуванні демодулятора АМБС порівняно із квадратурним демодулятором при однаковій нестабільності їх параметрів.

5. Уперше запропоновано метод дослідження й оптимізації СКК за критерієм максимальної інформаційної ефективності ТСМПД засобами математичного моделювання, що базується на використанні запропонованих чи вдосконалених методик, процедур, алгоритмів, правил, розробленого програмного забезпечення (ПЗ) і дозволяє серед відомих та нових запропонованих СКК виявити такі, які забезпечують мінімальну ймовірність помилки при заданій швидкості передавання або максимальну інформаційну ефективність ТСМ.

6. Удосконалено аналітичні співвідношення для визначення спектральних характеристик модулюючих та АФМ-сигналів, що дозволило зменшити похибку при обчисленні амплітуди й початкової фази спектральних складових спектрів таких сигналів, та аналітичне співвідношення для визначення ймовірності символної помилки в ТСМ, що дозволило підвищити точність обчислення при здійсненні різновидів АМн, ФМн, амплітудно-фазової маніпуляції (АФМн), КАМ і АМБС із довільною кількістю та розташуванням точок на сигнальній площині.

7. Удосконалено три ММ: телекомунікаційної мережі доступу на основі симетричних і коаксіальних ліній зв'язку (ЛЗ), телекомунікаційної системи на основі волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ), телекомунікаційної системи на основі радіоліній – шляхом урахування характеристик застосованих відомих чи нових різновидів модуляції та коректуючого кодування, а також уточненням формул для визначення параметрів компонентів таких ТСМ, які найбільш суттєво впливають на

точність моделювання, що дозволило підвищити точність визначення технічної ефективності досліджуваних ТСМ або ймовірності помилки при передаванні даних, здійснювати аналіз відомих і синтез нових високоефективних ТСМ, а також оптимізувати параметри їх окремих компонентів за багатьма критеріями із метою підвищення технічної ефективності.

8. Удосконалено три методи адаптивного передавання даних: у телекомунікаційних мережах доступу на основі симетричних і коаксіальних ЛЗ; у волоконно-оптичних системах передавання (ВОСП); у системах ДЗЗ, супутникових системах зв'язку (ССЗ), радіорелейних системах передавання прямої видимості (РПС ПВ) та інших аналогічних системах – які, на відміну від відомих, базуються на використанні АМБС чи ДП АМБС (двополяризаційної АМБС), що дозволяє мінімізувати ймовірність бітової помилки при передаванні даних із заданою швидкістю, максимізувати швидкість передавання даних при заданій ймовірності помилки та адаптивно підвищувати сигнальну ефективність ТСМ.

**Практичне значення одержаних результатів.** Використання запропонованої сигнальної ефективності дозволяє комплексно оцінити ефективність різноманітних ТСМ при застосуванні методів формування й оброблення сигналів, зокрема методів модуляції, коректуючого чи решіткового кодування, демодуляції, коректуючого чи решіткового декодування, ущільнення/розділення каналів та методів (протоколів) передавання даних.

Використання запропонованого сімейства модуляції АМБС, структур та принципів функціонування засобів для здійснення модуляції й демодуляції АМБС-сигналів дозволяють підвищити ефективність ТСМПД, побудованих на основі симетричних, коаксіальних, ВОЛЗ та радіоліній. При цьому для забезпечення тієї ж завадостійкості при передаванні даних з використанням 8-АМБС зі зсувом рівнів амплітуди модулюючих сигналів (8-АМБС зі зсувом) необхідне на 1,55 дБ менше відношення потужності сигналу до потужності шуму в каналі електрозв'язку порівняно з 8-КАМ, а з використанням 36-АМБС – на 1,43 дБ порівняно з 36-КАМ. При однаковій максимальній потужності модульованого сигналу ймовірність бітової помилки при застосуванні 8-АМБС зі зсувом є меншою до 19 раз порівняно з 8-КАМ і до 66 раз порівняно з 8-ФМн. Запропоноване представлення процесу демодуляції сигналів у демодуляторі АМБС із  $N$  підканалами за допомогою  $N$ -вимірного простору демодуляції дозволяє оцінити зменшення ймовірності помилки при застосуванні демодулятора АМБС порівняно із квадратурним демодулятором при однаковій нестабільності їх параметрів.

Запропонований метод дослідження й оптимізації СКК за критерієм максимальної інформаційної ефективності ТСМПД засобами математичного моделювання та розроблене ПЗ дозволяють серед відомих та нових різновидів модуляції, коректуючого кодування й СКК загалом виявити найбільш ефективні, а також знайти оптимальні сигнальні сузір'я АМБС.

Використання вдосконалених у дисертаційній роботі аналітичних співвідношень для визначення спектральних характеристик модулюючих та АФМ-сигналів дозволило обчислювати за допомогою електронно-обчислювальної машини (ЕОМ) спектри сигналів за декілька секунд порівняно з використанням чисельних методів обчислення, які потребують декілька десятків хвилин, та усунути похибку обчислень, що при використанні чисельних методів обчислення спектрів потужності АФМ-сигналів може досягати мінус 64%. При застосуванні вдосконаленого аналітичного співвідношення для визначення ймовірності символної помилки в ТСМ стало можливим підвищити точність обчислення при здійсненні різновидів АМн, ФМн, амплітудно-фазової маніпуляції (АФМн), КАМ і АМБС із довільною кількістю та розташуванням точок на сигнальній площині. Отримані співвідношення для обчислення суми  $N_1$  та різниці  $N_2$  векторів у сигнально-кодівому  $L$ -вимірному просторі необхідні при демодуляції АМБС-сигналів, визначенні спектрів АФМ-сигналів, а також у процесі порівняння технічної ефективності ТСМПД.

Удосконалені ММ телекомунікаційної мережі доступу на основі симетричних і коаксіальних ЛЗ, телекомунікаційної системи на основі ВОЛЗ, телекомунікаційної системи на основі радіоліній, а також розроблене ПЗ можуть бути використані при розробленні й проектуванні нових високоєфективних та модернізації існуючих радіотехнічних і ТСМПД.

Удосконалені методи адаптивного передавання даних у телекомунікаційних мережах доступу на основі симетричних і коаксіальних ЛЗ, ВОСП, системах ДЗЗ, ССЗ, РРСП ПВ та інших аналогічних системах із використанням АМБС дозволяють максимізувати швидкість передавання даних та адаптивно підвищувати сигнальну ефективність ТСМПД. При використанні в мережі доступу 8-АМБС зі зсувом замість 8-КАМ можливо підвищити сигнальну ефективність на 6,1%. При застосуванні у ВОСП 37-АМБС можливо досягнути збільшення швидкості передавання даних та сигнальної ефективності в 5,2 раз порівняно з бінарною фазовою маніпуляцією (БФМн), а при застосуванні ДП 37-АМБС підвищити швидкість передавання даних та сигнальну ефективність у 10,4 раз порівняно із БФМн. При адаптивному використанні в радіоканалі космічний апарат – наземний комплекс (КА – НК) для передавання даних системи ДЗЗ різновидів ФМн, КАМ і АМБС можливо збільшити середню швидкість передавання даних і сигнальну ефективність системи в 1,625 раз протягом сеансу зв'язку порівняно із застосуванням КФМн. При адаптивному використанні різновидів АМБС можливо збільшити середню швидкість передавання даних і сигнальну ефективність РРСП ПВ на 5,3%.

На основі запропонованих чи вдосконалених методів і результатів математичного моделювання з використанням ММ ТСМ удосконалено засоби формування й оброблення сигналів у ВОСП, наземному інформаційному комплексі (НК) і наземному комплексі управління й телеметричному комплексі (НКУТК) системи ДЗЗ із космосу, а також отримано оптимальні



структури НІК і НКУТК, що придатні для використання при розробленні й проектуванні сучасних високоефективних радіотехнічних систем і ТСМПД.

Основні наукові результати докторської дисертаційної роботи впроваджені та використовуються в науково-дослідних установах, навчальних закладах і підприємствах у галузі телекомунікацій, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Удосконалена ММ радіоканалів системи ДЗЗ із космосу, що є складовою вдосконаленої ММ телекомунікаційної системи на основі радіоліній, запропоновані структурні схеми НІК і НКУТК та метод адаптивного передавання даних у системах ДЗЗ, ССЗ, РРСП ПВ та інших аналогічних системах використані в сучасних та будуть використовуватись в перспективних проектах ДНДП “КОНЕКС”.

Удосконалена ММ телекомунікаційної системи на основі радіоліній та запропонована структурна схема НІК використані в науково-дослідних роботах Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН та НКА України при підготовці наукових космічних експериментів із застосуванням КА ДЗЗ Січ-2 в межах цільової науково-технічної космічної програми України на 2008-2012 роки.

Опис і результати теоретичних досліджень запропонованої АМБС,  $N$ -вимірний простір демодуляції, запропоновані структури та алгоритми роботи пристроїв для здійснення модуляції та демодуляції АМБС-сигналів, запропонований метод дослідження й оптимізації СКК, удосконалені ММ ТСМ упроваджені та використовуються в навчальному процесі Львівського національного університету ім. І. Франка при викладанні курсів “Теорія інформації” та “Оптоелектронна інформатика” для студентів спеціальності 05.010102 “Інформаційні технології проектування” базового напрямку 6.050101 “Комп’ютерні науки”.

Удосконалені методи адаптивного передавання даних у ТСМ із використанням АМБС (ДП АМБС), удосконалені структури ВОСП, НІК і НКУТК системи ДЗЗ із космосу впроваджені й використовуються в навчальному процесі Військового інституту телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” на кафедрі Бойового застосування засобів зв’язку при проведенні лекцій і лабораторних занять із курсу “Системи передачі в електровз’язку” для студентів спеціальності “Системи та комплекси військового зв’язку” базового напрямку 6.050903 “Телекомунікації”.

Удосконалені ММ для визначення частотних та енергетичних характеристик модулюючих і модульованих сигналів, опис запропонованої АМБС, запропоновані  $N$ -вимірний простір демодуляції й сигнальна ефективність, удосконалені ММ ТСМ використовуються в науково-дослідних роботах Центру математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача.

Запропоновані АМБС, метод підвищення ефективності каналів електровз’язку в радіотехнічних і телекомунікаційних системах при

використанні АМБС та засоби для здійснення модуляції й демодуляції АМБС-сигналів, удосконалений метод адаптивного передавання даних у телекомунікаційних мережах доступу з використанням АМБС, удосконалені ММ ТСМ впроваджені й використані при модернізації телекомунікаційних мереж ПАТ “Укртелеком”. Метод адаптивного передавання даних у ВОСП із використанням ДП АМБС буде використано при подальшій модернізації транспортної телекомунікаційної мережі підприємства.

Запропонована сигнальна ефективність, АМБС та результати її опису й дослідження, метод підвищення ефективності каналів електрозв'язку в радіотехнічних і телекомунікаційних системах при використанні АМБС, принципи функціонування засобів для здійснення модуляції й демодуляції АМБС-сигналів,  $N$ -вимірний простір демодуляції, метод дослідження й оптимізації СКК, удосконалені ММ для визначення частотних та енергетичних характеристик модулюючих та модульованих сигналів, ММ ТСМ і методи передавання даних у ТСМ упроваджені й використовуються в навчальному процесі Національного університету “Львівська політехніка” на кафедрі телекомунікацій при проведенні занять із курсу “Технічна експлуатація сучасних комплексів зв'язку” для студентів спеціальності 7.092402 “Інформаційні мережі зв'язку” базового напрямку 0904 “Телекомунікації”.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У друкованих працях, написаних у співавторстві, здобувачеві належить: у [5] – результати досліджень; у [9] – отримані результати теоретичних досліджень імовірності помилки; у [24] – метод дослідження й оптимізації модуляції сигналу за критерієм максимальної інформаційної ефективності ТСМПД засобами математичного моделювання; у [25, 26, 64] – запропоновані ММ каналів електрозв'язку; у [28] – результати дослідження залежності пропускної здатності каналу електрозв'язку від довжини кабельної лінії; у [29] – метод визначення пропускної здатності каналу або лінії зв'язку з використанням значень затухання кабелю; у [31] – ММ радіоканалу КА – ПС (приймальна станція) та результати її дослідження на прикладі проекту EgepSat-1; у [32] – методика визначення оптимального діаметра антени ПС для приймання даних із КА ДЗЗ та результати обчислень; у [34, 35] – методи та пристрої для передавання інформації за допомогою сигналу, сформованого на основі модуляції ортогонально-поляризованих складових (ОПС) оптичної хвилі (ОХ); у [39, 70] – узагальнення сучасних тенденцій розвитку систем ДЗЗ; у [50] – метод визначення пропускної здатності каналу або лінії зв'язку та результати моделювання; у [51] – структури передавального й приймального пристроїв ВОСП; у [52] – новий метод адаптивного передавання даних у телекомунікаційних мережах доступу; у [57] – результати дослідження ефективності ТСМ при використанні АМБС; у [65] – результати комп'ютерного моделювання каналу електрозв'язку на основі технологій ADSL2 та ADSL2+; у [66] – удосконалені методи модуляції сигналу при

передаванні даних; у [67] – запропоновані методи формування інформаційних сигналів у ВОСП; у [69] – нові методи формування й оброблення сигналів для підвищення ефективності ТСМ; у [71] – результати дослідження ймовірності помилки у ВОСП при використанні АМБС.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідались й обговорювались на:

- Міжнародній конференції “Информационные технологии и системы 2012” – ИТС 2012 (м. Мінськ, Білорусь, 2012 р.);
- Міжнародних конференціях “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп’ютерної інженерії” – TCSET (м. Львів – смт. Славсько, 2006, 2008, 2010 р.р.);
- XI і XII міжнародних конференціях “Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці CADSM” (с. Поляна – м. Свалява, 2011 р; м. Львів – с. Поляна, 2013 р.);
- Шостій Міжнародній конференції “Проблемы телекоммуникаций – 2012” (ПТ-12), (м. Київ, 2012 р.);
- Першій міжнародній науково-практичній конференції “Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии PIC S&T’2013” (м. Харків, 2013 р.);
- Третій міжнародній науково-практичній конференції “Инфокоммуникації – сучасність та майбутнє” (м. Одеса, 2013 р.);
- XII Міжнародній науково-практичній конференції “Шевченківська весна – 2014: Фізика” (м. Київ, 2014 р.);
- III міжнародній конференції “Комп’ютерні науки та інформаційні технології CSIT’2008” (м. Львів, 2008 р.);
- Науково-практичних конференціях “Сучасні проблеми телекомунікацій” (м. Львів, 2005, 2008, 2010 р.р.);
- Науково-методичних конференціях “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій” (м. Львів, 2007, 2009, 2011, 2012, 2013 р.р.);
- 12-й, 13-й і 15-й відкритих науково-технічних конференціях ІПРЕ Національного університету “Львівська політехніка” з проблем електроніки (м. Львів, 2009, 2010, 2012 р.р.);
- Науково-технічній конференції “Математичне моделювання складних систем” (м. Львів, 2010 р.).

Протягом 2009-2014 р.р. дисертаційна робота в повному обсязі доповідалася та обговорювалася на наукових семінарах кафедри телекомунікацій НУ “Львівська політехніка”, Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН та НКА України, Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, кафедри телекомунікаційних систем Одеської національної академії зв’язку ім. О.С. Попова, кафедри телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки, Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи повністю висвітлені в 71 публікації автора (зокрема 48 одноосібних), серед яких: 2 монографії; 40 статей у наукових фахових виданнях України та інших держав, зокрема 4 – у наукових періодичних виданнях (включених до міжнародних наукометричних баз) інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію, та 36 – у наукових фахових виданнях України, з яких 3 – у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз, серед яких 1 – у електронному виданні; 2 патенти України на винахід; 3 статті в збірниках наукових праць; 24 статті в збірниках матеріалів міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, зокрема 4 – у збірниках, які включені до міжнародних наукометричних баз.

**Структура та обсяг дисертації.** Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації – 384 стор., з яких 79 рисунків на 40 стор., 17 таблиць на 16 стор., список джерел із 247 найменувань на 31 стор., 8 додатків на 61 стор.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, розкрито суть і стан науково-прикладної проблеми, показано зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету та задачі досліджень, наукову новизну й практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та публікації.

У **першому розділі** проведено літературний огляд стану науково-прикладної проблеми. Розглянуто різноманітні відомі характеристики технічної ефективності ТСМПД, серед яких особливої уваги заслуговують енергетична  $\beta$  ((Вт/Гц)/Дж), частотна  $\gamma$  ((біт/с)/Гц) та інформаційна  $\eta$  (безрозмірна величина) ефективність, що залежать від застосованого різновиду модуляції сигналу та дорівнюють:

$$\beta = N_0 / E_b, \quad (1)$$

де  $N_0$  – спектральна густина потужності (СПП) (Вт/Гц) білого шуму в каналі електрозв'язку;  $E_b$  – енергія одного біта інформації, Дж;

$$\gamma = v_\delta / \Delta F_c, \quad (2)$$

де  $v_\delta$  – швидкість передавання інформації, біт/с;  $\Delta F_c$  – ширина спектра сигналу, с (прийнято, що смуга пропускання каналу  $\Delta F_k = \Delta F_c$ );

$$\eta = v_\delta / C_k, \quad (3)$$

де  $C_k$  – пропускна здатність каналу електрозв'язку (системи), біт/с;

$$\eta = \gamma / \log_2((\gamma/\beta) + 1). \quad (4)$$

При застосуванні в системі або мережі коректуючого чи решіткового кодування енергетична ефективність збільшується на величину енергетичної ефективності кодування  $\beta_{код}$  (дБ):

$$\beta_{код} = (E_b / N_0)_{БК} - (E_b / N_0)_{ЗК}, \quad (5)$$

де  $(E_{\sigma}/N_0)_{BK}$  і  $(E_{\sigma}/N_0)_{3K}$  – значення відношення енергії одного біта інформації до СГП білого шуму, необхідні в системі без кодування й із кодуванням для забезпечення тієї саме ймовірності бітової помилки, дБ.

У телекомунікаційних системах з ущільненням/розділенням  $N_k$  каналів інформаційна ефективність дорівнює

$$\eta = \eta_{mod} \eta_p, \quad (6)$$

де  $\eta_{mod}$ ,  $\eta_p$  – інформаційна ефективність методу модуляції й методу розділення каналів, безрозмірні величини.

При використанні в системі чи мережі певного методу (протоколу) передавання даних його ефективність визначають наступним чином:

$$\eta_{МПД} = T_{\delta} / T_{ППД}, \quad (7)$$

де  $T_{\delta}$  – час передавання даних, с;  $T_{ППД}$  – час повного передавання, с.

Отже, технічна ефективність ТСМПД залежить від застосованих методів формування й оброблення сигналів: методів модуляції, коректуючого чи решіткового кодування, демодуляції, коректуючого чи решіткового декодування, ущільнення/розділення каналів, методів (протоколів) передавання даних. За результатами проведених досліджень встановлено, що існує потреба у виробленні комплексної характеристики для оцінювання технічної ефективності ТСМПД, побудованих із використанням різноманітних методів формування й оброблення сигналів.

З метою виявлення впливу методів формування й оброблення сигналів на технічну ефективність ТСМПД розглянуто сигнали, що використовують у таких системах та мережах, а також їх параметри та спектральні характеристики. Розглянуто методи формування й оброблення таких сигналів, а саме відомі методи модуляції, коректуючого й решіткового кодування, ущільнення/розділення каналів, методи передавання даних.

Проаналізовано відомі ММ та методи дослідження ТСМ, побудованих на основі найбільш поширених ЛЗ: симетричних кабельних ЛЗ, ВОЛЗ та радіоліній. За результатами проведеного аналізу зроблено висновок, що для підвищення точності визначення основних характеристик таких систем та мереж з урахуванням впливу застосованих методів формування й оброблення сигналів і виявлення напрямків підвищення їх ефективності слід удосконалити відомі ММ ТСМ.

За результатами проведених досліджень встановлено, що одним із напрямків підвищення ефективності ТСМПД є використання відомих вискоефективних методів та засобів формування й оброблення сигналів, зокрема різновидів АФМ спільно з коректуючим або решітковим кодуванням. Перспективним є розроблення нових методів та засобів здійснення модуляції сигналу, що забезпечать більш оптимальні сигнальні сузір'я з точки зору ефективності методу модуляції.

Для виявлення переваг запропонованих нових чи вдосконалених відомих методів формування й оброблення сигналів порівняно з відомими

необхідно вдосконалити аналітичні співвідношення для визначення частотних та енергетичних характеристик модулюючих і модульованих сигналів. Важливим є питання оптимального вибору різновиду модуляції, кодування, ущільнення/розділення каналів, методу передавання даних, що можливо здійснити застосуванням ЕОМ і таких нових методів дослідження й оптимізації, які базуються на використанні запропонованих чи вдосконалених методик, процедур, алгоритмів, правил, розробленого ПЗ.

У загальному необхідно розробити нові чи вдосконалити відомі СКК із використанням ефективних різновидів модуляції сигналу, коректуючого та решіткового кодування, застосувати комбіновані методи ущільнення/розділення каналів, розробити нові чи вдосконалити відомі методи передавання даних, що забезпечать вищу ефективність ТСМПД.

У **другому розділі** наведено вдосконалені ММ для визначення основних характеристик ТСМПД. Удосконалено теоретичні основи визначення ефективності ТСМ шляхом застосування запропонованої комплексної характеристики – коефіцієнта використання ТСМ за застосованими методами формування й оброблення сигналів (сигнальної ефективності)  $\eta_c$ , що враховує інформаційну ефективність СКК  $\eta_{СКК}$ , залежну від ефективності методу модуляції та кодування, інформаційну ефективність методу розділення каналів  $\eta_p$  та ефективність методу передавання даних  $\eta_{МП}$ :

$$\eta_c = \eta_{СКК} \eta_p \eta_{МП}, \quad (8)$$

де  $\eta_c$ ,  $\eta_{СКК}$ ,  $\eta_p$  та  $\eta_{МП}$  – безрозмірні величини.

Інформаційна ефективність системи (мережі) при застосуванні СКК

$$\eta_{СКК} = \gamma_{СКК} / \log_2((\gamma_{СКК} / \beta_{СКК}) + 1), \quad (9)$$

де  $\beta_{СКК}$  і  $\gamma_{СКК}$  – енергетична й частотна ефективність системи (мережі) при застосуванні СКК, безрозмірні величини.

При цьому  $\beta_{СКК}$  (дБ) з урахуванням співвідношення (5) становить

$$\beta_{СКК} = \beta_{мод} + \beta_{код} = -(E_b / N_0)_{ЗК} = -(E_b / N_0)_{БК} + \beta_{код}, \quad (10)$$

де  $\beta_{мод}$ ,  $\beta_{код}$  – енергетична ефективність методів модуляції й кодування, дБ.

Частотна ефективність СКК  $\gamma_{СКК}$  (дБ) дорівнює

$$\gamma_{СКК} = \gamma_{мод} + \gamma_{код} = \gamma_{мод} + 10 \log(K_{код}), \quad (11)$$

де  $\gamma_{мод}$ ,  $\gamma_{код}$  – частотна ефективність методів модуляції й кодування (дБ),  $K_{код}$  – ступінь кодування, безрозмірна величина.

Якщо при передаванні даних через багатоканальну ТСМ зі змінною в часі пропускною здатністю  $C_c(t)$  протягом тривалості  $t_{зв} = t_{зв2} - t_{зв1}$  сеансу зв'язку використовують декілька СКК, що забезпечують зміну швидкості  $v_{\bar{\sigma}_i}(t)$  передавання даних у часі в  $i$ -х каналах, тоді з урахуванням часу

передавання даних  $T_0$  та часу повного передавання  $T_{III}$  при використанні певного методу передавання даних сигнальна ефективність

$$\eta_c = \left( \sum_{i=1}^{N_K} \left( \frac{1}{t_{3\theta i}} \sum_{j=1}^{N_{t_i}} \left( \int_{t_{3\theta 1, j}}^{t_{3\theta 2, j}} v_{\theta_i}(t) dt \right) \right) \right) / \left( \frac{1}{t_{3\theta}} \int_{t_{3\theta 1}}^{t_{3\theta 2}} C_c(t) dt \right), \quad (12)$$

де  $t_{3\theta i}$  – час сеансу зв'язку в  $i$ -му каналі, с;  $t_{3\theta 1, j}$ ,  $t_{3\theta 2, j}$  – моменти часу початку та кінця  $N_{t_i}$  проміжків часу, у яких передають дані, с.

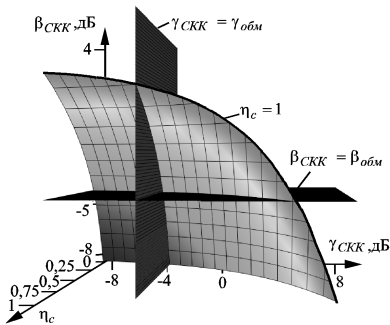


Рис. 1. Залежність сигнальної ефективності  $\eta_c$  ТСМ від частотної  $\gamma_{СКК}$  та енергетичної  $\beta_{СКК}$  ефективності СКК

з використанням запропонованого в розділі 3 методу дослідження й оптимізації та застосовувати такі вдосконалені відомі чи запропоновані нові методи формування й оброблення сигналів, які дозволять наблизитись до теоретичної максимально можливої ефективності ТСМ з урахуванням обмежуючих факторів.

При дослідженні й порівнянні відомих та нових запропонованих методів модуляції та кодування необхідно визначати відстань між будь-якими двома сигналами (точками) в ортогональному  $L$ -вимірному евклідовому сигнально-кодовому просторі при оцінюванні завадозахищеності сигналів, при здійсненні демодуляції сигналів, а також для обчислення амплітуди та фази коливання, що є сумою  $N_1$  та різницею  $N_2$  гармонічних складових сигналів. Для знаходження вектора, що є сумою  $N_1$  та різницею  $N_2$  векторів в евклідовому  $L$ -вимірному просторі з ортонормованим базисом слід застосувати таку запроповану теорему.

Запропоновану сигнальну ефективність доцільно застосувати при вирішенні науково-прикладної проблеми, представленої в цій роботі. Діапазон можливих значень сигнальної ефективності ТСМ відповідає сукупності точок на поверхні, заданій співвідношенням (8), обмеженій площинами, заданими у вигляді  $\beta_{СКК} = \beta_{обм}$ ,  $\gamma_{СКК} = \gamma_{обм}$  ( $\beta_{обм}$  і  $\gamma_{обм}$  – обмежені значення енергетичної та частотної ефективності, що залежать від обмежених значень потужності сигналу  $P_c$  і смуги пропускання  $\Delta F$  ТСМ) і границею К. Шеннона, на якій  $\eta_c = 1$  (рис. 1). Для вирішення науково-прикладної проблеми необхідно виявити

**Теорема 1.** Сумою  $N1$  векторів  $\vec{U}_{n1}$  ( $n1 \in 1 \dots N1$ ) із довжинами  $U_{n1}$ , кутами  $\varphi_{n1_1}, \varphi_{n1_2}, \dots, \varphi_{n1_l}, \dots, \varphi_{n1_L}$  нахилу до  $1, 2, \dots, l, \dots, L$ -х координатних осей та різницею  $N2$  векторів  $\vec{U}_{n2}$  ( $n2 \in 1 \dots N2$ ) із довжинами  $U_{n2}$ , кутами  $\varphi_{n2_1}, \varphi_{n2_2}, \dots, \varphi_{n2_l}, \dots, \varphi_{n2_L}$  нахилу до  $1, 2, \dots, l, \dots, L$ -х координатних осей в евклідовому  $L$ -вимірному просторі з ортонормованим базисом є вектор  $\vec{U} = \sum_{n1=1}^{N1} \vec{U}_{n1} - \sum_{n2=1}^{N2} \vec{U}_{n2}$  з довжиною

$$U = \sqrt{\sum_{l=1}^L \left( \sum_{n1=1}^{N1} U_{n1} \cos(\varphi_{n1_l}) - \sum_{n2=1}^{N2} U_{n2} \cos(\varphi_{n2_l}) \right)^2} \quad (15)$$

та кутами нахилу до  $l$ -х координатних осей

$$\varphi_l = \arccos \left( \left( \sum_{n1=1}^{N1} U_{n1} \cos(\varphi_{n1_l}) - \sum_{n2=1}^{N2} U_{n2} \cos(\varphi_{n2_l}) \right) / U \right). \quad (16)$$

Теорема 1 використана при порівнянні в розділі 3 характеристик відомих та нових різновидів модуляції чи СКК у цілому.

Для підвищення точності в процесі порівняння технічної ефективності ТСМПД удосконалено аналітичні співвідношення для визначення частотних та енергетичних характеристик модулюючих і модульованих сигналів.

До частотних характеристик сигналів належать спектральні характеристики. Ширина спектра модульованого сигналу впливає на частотну ефективність ТСМ. Спектр модульованого сигналу залежить від виду модуляції та спектра модулюючого сигналу. Для знаходження спектра модулюючого сигналу, що є послідовністю  $K$  прямокутних імпульсів, доцільно скористатись такою запропонованою теоремою.

**Теорема 2.** Для сигналу  $u_m(t) = U_{\tau_{mk}}$  при  $t_{k-1} + T_m \cdot k_{nep} < t \leq t_{k-1} + \tau_k + T_m \cdot k_{nep}$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ ,  $k_{nep} = 0, \pm 1, \dots, \pm \infty$ , що є періодичною послідовністю  $K$  прямокутних відеоімпульсів із періодом  $T_m = \sum_{k=1}^K \tau_{mk}$ , які мають тривалість  $\tau_k = t_k - t_{k-1}$  та амплітуду  $U_{\tau_{mk}}$ , починаються в моменти часу  $t_{k-1}$ , закінчуються в моменти часу  $t_k$ , постійна складова спектра дорівнює

$$U_{M0} = \frac{1}{T_m} \sum_{k=1}^K U_{\tau_{mk}} \tau_{mk}, \quad (17)$$

амплітуди  $i$ -их спектральних складових рівні



$$U_{M_i} = \frac{1}{i\pi} \left[ \left[ \sum_{k=1}^K (U_{\tau_{M_k}} - U_{\tau_{M_{k+1}}}) \sin \left( \frac{2i\pi}{T_M} \left( t_0 + \sum_{k1=1}^k \tau_{M_{k1}} \right) \right) \right]^2 + \left[ \sum_{k=1}^K (U_{\tau_{M_k}} - U_{\tau_{M_{k+1}}}) \cos \left( \frac{2i\pi}{T_M} \left( t_0 + \sum_{k1=1}^k \tau_{M_{k1}} \right) \right) \right]^2 \right]^{1/2}, \quad (18)$$

фази  $i$ -их спектральних складових становлять

$$\Phi_{M_i} = \begin{cases} -\arccos(a_{M_i}/U_{M_i}), b_{M_i} \geq 0, \\ \arccos(a_{M_i}/U_{M_i}), b_{M_i} < 0, \end{cases} \quad (19)$$

де коефіцієнти дорівнюють

$$a_{M_i} = \frac{1}{i\pi} \sum_{k=1}^K (U_{\tau_{M_k}} - U_{\tau_{M_{k+1}}}) \sin \left( \frac{2i\pi}{T_M} \left( t_0 + \sum_{k1=1}^k \tau_{M_{k1}} \right) \right), \quad (20)$$

$$b_{M_i} = -\frac{1}{i\pi} \sum_{k=1}^K (U_{\tau_{M_k}} - U_{\tau_{M_{k+1}}}) \cos \left( \frac{2i\pi}{T_M} \left( t_0 + \sum_{k1=1}^k \tau_{M_{k1}} \right) \right), \quad (21)$$

огинаюча амплітудного спектра становить

$$|S_{M_{oz}}(f)| = \frac{1}{\pi f T_M} \left[ \left[ \sum_{k=1}^K (U_{\tau_{M_k}} - U_{\tau_{M_{k+1}}}) \sin \left( 2\pi f \left( t_0 + \sum_{k1=1}^k \tau_{M_{k1}} \right) \right) \right]^2 + \left[ \sum_{k=1}^K (U_{\tau_{M_k}} - U_{\tau_{M_{k+1}}}) \cos \left( 2\pi f \left( t_0 + \sum_{k1=1}^k \tau_{M_{k1}} \right) \right) \right]^2 \right]^{1/2}. \quad (22)$$

Таким чином, отримано аналітичні співвідношення (17)-(22) для обчислення спектра амплітуд, огинаючої спектра амплітуд та спектра фаз послідовностей прямокутних відеоімпульсів із довільною амплітудою, тривалістю та початком у довільний момент часу, еквівалентних модулюючим сигналам при АМн, частотній маніпуляції (ЧМн), ФМн та комбінованих видах маніпуляції. Установлено, що при використанні запропонованих співвідношень (17)-(22) можливо зменшити час та усунути похибку обчислень спектра амплітуд модулюючого сигналу, що може досягати 33% при використанні чисельних методів обчислення (наприклад, застосованих у Mathcad).

Також запропоновано аналітичні співвідношення для визначення спектральних характеристик АФМ-сигналів, при цьому спектр модульованого сигналу визначають у вигляді суми спектрів його окремих модульованих за амплітудою складових. Такі співвідношення використано при дослідженні нових різновидів модуляції в розділі 3 та відомих різновидів

модуляції. Згідно проведених досліджень запропоновані співвідношення дозволяють дослідити спектр амплітуд, огинаючу спектра амплітуд, спектр фаз, огинаючу спектра фаз та спектр потужності АФМ-сигналів, при цьому можливо зменшити час та усунути похибку обчислень спектра потужності АФМ-сигналу, що може досягати мінус 64% при використанні чисельних методів обчислення (наприклад, застосованих у Mathcad).

При дослідженні енергетичних характеристик модульованих сигналів запропоновано застосовувати наступне вдосконалене аналітичне співвідношення для обчислення ймовірності символної помилки в телекомунікаційній системі чи мережі при здійсненні  $M$ -позиційної АФМ:

$$P_{\text{сим}M} \cong n_c \cdot Q_1 \left( \sqrt{K_E \cdot \log_2(M_{\text{ef}}) \cdot (E_{\text{б} \text{сеп}} / 2N_0)} \right), \quad (23)$$

де  $n_c$  – коефіцієнт, що дорівнює середній кількості сусідніх точок навколо однієї з точок сигнального сузір'я;  $Q_1(x)$  – функція густини ймовірності гауссової випадкової величини;  $K_E$  – коефіцієнт, що дорівнює відношенню мінімально можливої енергії різниці  $\Delta E_{\text{мін}}$  двох символів, які відповідають сусіднім точкам, до середньої енергії  $E_{\text{сим сеп}}$  всіх символів, які відповідають неповторюваним сигнальним точкам;  $M_{\text{ef}}$  – ефективна кількість символів;  $E_{\text{б} \text{сеп}}$  – середня енергія біта.

Досліджено, що вдосконалене співвідношення (23) є адекватним і придатним для обчислення ймовірності символної помилки АМн, ФМн, АФМн, КАМ і запропонованої АМБС із довільною кількістю  $M_{\text{ef}}$  та розташуванням точок на сигнальній площині при  $P_{\text{сим}M} < 0,1$ .

**У третьому розділі** автором запропоновано нові високоефективні різновиди АФМ для застосування в радіотехнічних і ТСМПД – нове сімейство модуляцій на основі АМБС (amplitude modulation of many components – АММС, амплитудная модуляция многих составляющих – АММС). При здійсненні АМБС модульований сигнал формують у вигляді суми його  $N$  модульованих за амплітудою складових, що відрізняються початковими фазами  $\varphi_n$  (рад), та має вигляд:

$$u_{\text{АМБС}}(t) = \sum_{n=1}^N U_0 a_n u_{m_n}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_n), \quad (24)$$

де  $U_0$ ,  $\omega_0$ ,  $\varphi_0$  – амплітуда (В), кутова частота (рад/с) і початкова фаза (рад) носійного коливання;  $a_n$  – коефіцієнти пропорційності для  $n$ -их підканалів модулятора, що є параметрами модулятора,  $1/\text{В}^2$ ;  $u_{m_n}(t)$  – модулюючі сигнали на входах перемножувачів у  $n$ -их підканалах модулятора, В.

Ця запропонована автором модуляція в загальному (за винятком випадку, коли  $N = 2$ ,  $\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2| = \pi/2$  і АМБС-сигнал (24) перетворюється в КФМн-сигнал при  $M_U = 2$  чи в КАМ-сигнал при  $M_U > 2$ ) належить до класу неортогональних АФМ. Різновидами АМБС є запропонована амплітудна маніпуляція багатьох складових (АМнБС, amplitude shift keying of many components – АСКМС, амплітудная маніпуляція многих составляющих – АМнМС), при якій модулюючі сигнали є дискретними, та М-АМБС зі зсувом модулюючих сигналів один відносно одного в часі (M-ary offset amplitude modulation of many components – М-ОАММС, М-позиционная амплітудная модуляція многих составляющих со сдвигом – М-АММС со сдвигом). При використанні М-АМБС за час  $T_{сим}$  передають один із  $M$  можливих інформаційних символів.

Заслугує увагу АМБС-сигнал, при формуванні якого використовують складові, початкові фази  $\varphi_n$  яких зсунуті між собою на величину  $\Delta\varphi$  (рад):

$$|\varphi_n| = \varphi_{0c} + (\pi n / N), \quad \Delta\varphi = \pi / N, \quad (25)$$

де  $\varphi_{0c}$  – деяка початкова фаза, рад.

Для обчислення відстані Евкліда  $d_{сигн}$  (В) між сигнальними точками на сигнальній площині для АМБС при  $N = 3$ , початкових фазах складових, що задовольняють (25), та модуляції кожної складової модулюючими сигналами з кількістю рівномірно віддалених рівнів  $M_U$  і максимально можливою амплітудою  $U_{c,макс}$  (В) запропоновано застосовувати таке співвідношення:

$$d_{сигн} = U_{c,макс} / (M_U - 1). \quad (26)$$

При цьому кількість неповторюваних АМБС-сигналів, що можна однозначно демодулювати (а значить і ефективна кількість символів) рівна

$$M_{эф} = 3M_U(M_U - 1) + 1, \quad (27)$$

а загальна кількість символів, отриманих із використанням усіх можливих комбінацій модулюючих сигналів при довільних початкових фазах  $\varphi_n$ , рівна

$$M_{заг} = (M_U)^N. \quad (28)$$

При цьому протягом тривалості одного інформаційного символу може бути передано  $\log_2 M_{эф}$  біт інформації. Змінюючи кількість складових, кількість рівнів модулюючих сигналів та використовуючи лише частину з усіх сигнальних точок, можливо отримати сімейство АМБС-сигналів, що відрізняються сигнальними сузір'ями. Сигнальні сузір'я деяких вискоефективних АМБС-сигналів, отримані з базових сузір'їв 19-АМБС і 37-АМБС, наведені на рис. 2.

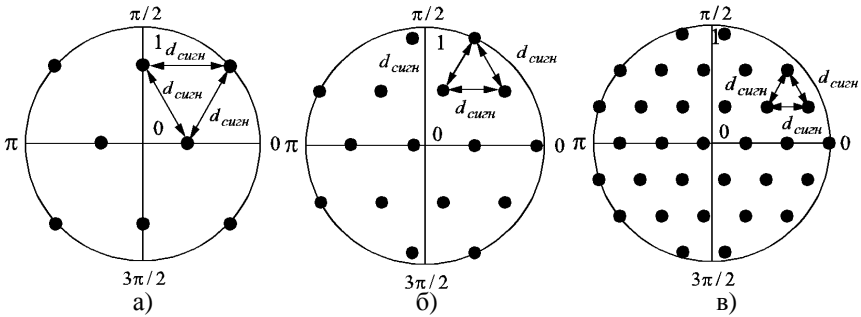


Рис. 2. Сигнальні сузір'я: а) 8-АМБС-сигналу зі зсувом; б) 16-АМБС-сигналу зі зсувом; в) 32-АМБС-сигналу зі зсувом.

Спектр АМБС-сигналу (24) такий:

$$\begin{aligned}
 u_{\text{АМБС}}(t) = & \sum_{n=1}^N [U_0 a_n U_{m0} \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_n)] + \\
 & + \sum_{n=1}^N \left[ \frac{U_0 a_n}{2} \sum_{i=1}^{\infty} [U_{mi} \cos((\omega_0 + i\Omega_{1n})t + \varphi_0 + \varphi_n + \Phi_{mi})] \right] + \\
 & + \sum_{n=1}^N \left[ \frac{U_0 a_n}{2} \sum_{i=1}^{\infty} [U_{mi} \cos((\omega_0 - i\Omega_{1n})t + \varphi_0 + \varphi_n - \Phi_{mi})] \right], \quad (29)
 \end{aligned}$$

де  $U_{m0}$  – постійні складові модулюючих сигналів на  $n$ -х входах модулятора;  $U_{mi}$  – амплітуди,  $\Phi_{mi}$  – початкові фази гармонік модулюючих сигналів на  $n$ -х входах модулятора відповідно;  $\Omega_{1n}$  – основні кутові частоти модулюючих сигналів на  $n$ -х входах модулятора.

За результатами дослідження встановлено, що АМБС-сигнали характеризуються кращими частотними та енергетичними характеристиками порівняно з АМн-, ФМн-, АФМн- і КАМ-сигналами. Так, практична частотна ефективність 8-АМБС зі зсувом є вищою порівняно з 8-ФМн і 8-КАМ у 1,43 раз за рахунок меншої практичної ширини спектра.

За результатами порівняння запропонованої 36-АМБС з складових, отриманої з 37-АМБС з складових без використання точки в центрі сузір'я, та 36-КАМ установлено, що для забезпечення тієї ж завадостійкості при передаванні даних з використанням 36-АМБС необхідно на 1,43 дБ менше відношення  $P_c / P_{\text{ш}}$  в каналі електрозв'язку порівняно з 36-КАМ. При однакових відстанях Евкліда між сигнальними точками на сигнальній площині середня потужність 36-АМБС на 0,53 дБ менша при забезпеченні тієї ж завадостійкості, що й 36-КАМ.

За результатами проведених досліджень запропоновано метод підвищення ефективності каналів електрозв'язку в радіотехнічних і телекомунікаційних системах при використанні АМБС із застосуванням

запатентованого способу передавання даних за допомогою інформаційного сигналу, сформованого на основі АМБС (пат. №91942 України). Метод полягає у використанні нового запропонованого автором сімейства модуляцій на основі АМБС, при якій модульований сигнал має вигляд (24), за рахунок чого зменшується ймовірність бітової та символної помилки на виході вирішуючого пристрою каналу електрозв'язку та збільшується інформаційна ефективність такого каналу в радіотехнічних і телекомунікаційних системах порівняно з використанням М-позиційних різновидів модуляції М-АМн, М-ФМн (однакова ефективність порівняно з 6-ФМн), М-АФМн чи М-КАМ при однакових максимальній потужності та інформативності модульованого сигналу.

Для здійснення модуляції й демодуляції АМБС-сигналів запропоновано застосовувати засоби, що базуються на використанні запатентованого пристрою для передавання даних за допомогою інформаційного сигналу, сформованого на основі АМБС (пат. №91950 України). Перевагою такого пристрою є відносна простота формування та оброблення АМБС-сигналів, вища стійкість до дрейфу нуля підсилювачів у підканалах демодулятора, можливість здійснення модуляції та демодуляції АМн, ФМн, КАМ і АМБС.

При демодуляції кожний АМБС-сигнал з  $N$  складовими можливо зобразити у вигляді сигнальної точки з  $N$  координатами, кожна з яких залежить від параметрів АМБС-сигналу, у запропонованому  $N$ -вимірному просторі демодуляції. У випадку 19-АМБС-сигналу із трьома складовими сигнальне сузір'я в тривимірному просторі демодуляції буде мати вигляд, наведений на рис. 3.

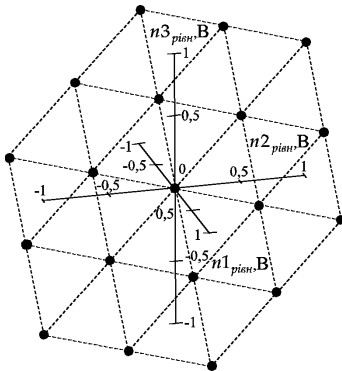


Рис. 3. Простір демодуляції 19-АМБС.

З метою виявлення СКК, що забезпечує максимальну ефективність системи (мережі) в умовах дії обмежуючих факторів, запропоновано метод дослідження й оптимізації СКК за критерієм максимальної інформаційної ефективності ТСМПД засобами математичного моделювання, що полягає в пошуку такого методу модуляції й коректуючого кодування, що входять до складу СКК, застосування яких забезпечить відхилення максимуму функціоналу  $\eta_{СКК} = F(\beta_{СКК}, \gamma_{СКК})$  (9) при виконанні обмежень  $\beta_{СКК} \geq \beta_{обм}$  і  $\gamma_{СКК} \geq \gamma_{обм}$  від

максимально можливого значення інформаційної ефективності  $\eta_{СКК} = 1$  на величину не більше заданої  $\Delta\eta_{СКК}$ , для чого використовують удосконалені відомі чи запропоновані нові методики, процедури, алгоритми, правила й ПЗ.

За результатами досліджень зроблено висновок про адекватність запропонованого методу та можливість його використання для дослідження й оптимізації модуляції сигналу, коректуючого, решіткового кодування або

СКК загалом за критерієм максимальної інформаційної ефективності ТСМ. До переваг методу належать універсальність, застосування математичного моделювання, дослідження та оптимізація методів формування й оброблення сигналів, дослідження впливу завад, обчислення енергетичної  $\beta_{СКК}$ , частотної  $\gamma_{СКК}$  та інформаційної  $\eta_{СКК}$  ефективності досліджуваної ТСМ із використанням значень параметрів, отриманих засобами математичного моделювання, можливість порівняння ряду методів формування та оброблення сигналів на основі єдиних підходів, умов та критеріїв.

За допомогою цього методу досліджено ймовірність символної помилки  $P_{сим}$  для ряду відомих та нових різновидів модуляції (рис. 4).

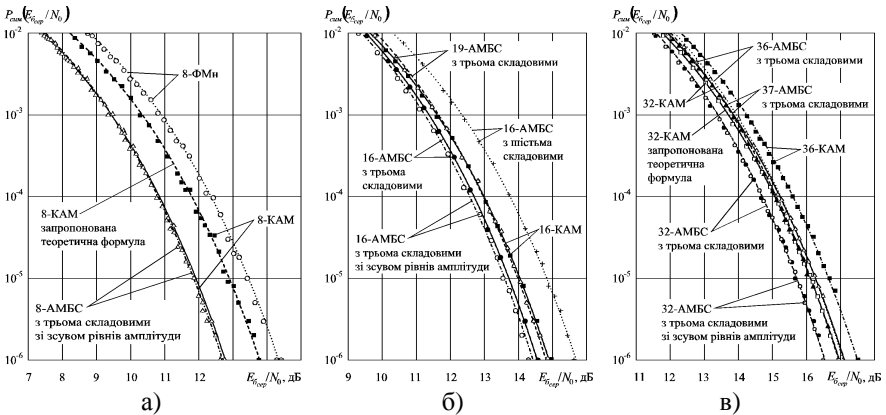


Рис. 4. Залежність імовірності символної помилки  $P_{сим}$  від відношення  $E_{бсер}/N_0$  для різновидів модуляції з кількістю символів: а) 8; б) 16–19; в) 32–37.

На рис. 4 точками позначені дані, отримані за допомогою математичного моделювання з використанням запропонованого методу, а лініями – теоретично обчислені за формулою (23). За результатами досліджень встановлено, що при однаковій максимальній потужності модульованого сигналу та відношенні енергії одного біта інформації до СГП білого шуму 12,95 дБ імовірність символної помилки є меншою при використанні: 8-АМБС зі зсувом порівняно з 8-КАМ – у 19 раз, 8-АМБС зі зсувом порівняно з 8-ФМн – у 66 раз, 16-АМБС зі зсувом порівняно з 16-КАМ – у 2,36 раз, 32-АМБС порівняно з 32-КАМ – у 2,75 раз.

Для ТСМ із використанням деяких відомих та нових різновидів модуляції сигналу при ймовірності  $P_{сим} = 10^{-5}$  та різних  $M$  розраховано ефективність  $\beta_{мод}$  і  $\gamma_{мод}$  (рис. 5). Установлено, що ефективність ТСМ із використанням АМБС у загальному є вищою порівняно із застосуванням інших відомих розглянутих різновидів модуляції. Так, енергетична

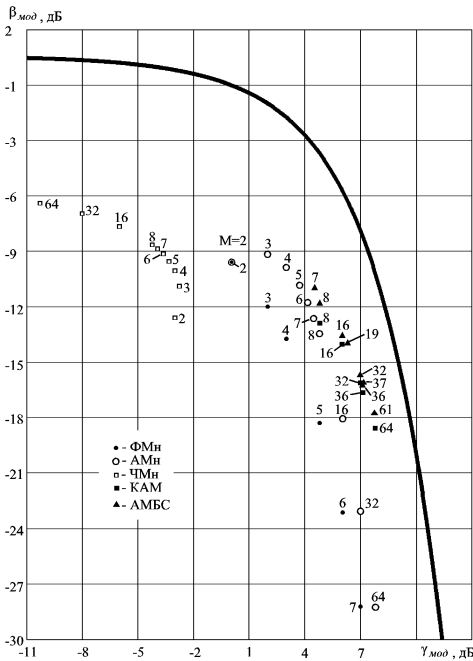


Рис. 5. Ефективність TCM при використанні досліджених різновидів модуляції.

найбільш ефективними для застосування в багатоканальних телекомунікаційних системах. Метод поляризаційного ущільнення доцільно застосовувати при побудові сучасних ВОСП. У системах із нерівномірними амплітудно-частотними характеристиками для підвищення ефективності доцільно використовувати частотно-часове й надрелеєвське частотне ущільнення/розділення каналів та модулюючі сигнали з вузькими спектрами.

**У четвертому розділі** для забезпечення достатньої точності визначення основних характеристик TCMПД на основі різних середовищ передавання з урахуванням впливу застосованих сучасних видів цифрової модуляції, коректуючого чи решіткового кодування й виявлення напрямків підвищення їх ефективності наведено вдосконалені ММ телекомунікаційної мережі доступу на основі симетричних і коаксіальних ЛЗ, телекомунікаційної системи на основі ВОЛЗ та телекомунікаційної системи на основі радіолінії.

При вдосконаленні ММ телекомунікаційної мережі доступу на основі симетричних і коаксіальних ЛЗ використано запропоновані співвідношення розділу 2, розділу 3 для визначення частотних і енергетичних характеристик застосованих сигналів, сигнальної ефективності мережі. Також для зменшення часу комп'ютерного моделювання запропоновано формулу для наближеного обчислення затухання  $\alpha_{p_{дБ}}(f_p)$  в симетричній кабельній ЛЗ:

ефективність 8-АМБС зі зсувом вища від 8-КАМ на 27%, а інформаційна ефективність – на 6,1%. Енергетична ефективність 16-АМБС зі зсувом вища від 16-КАМ на 11%, а інформаційна ефективність – на 2,3%, енергетична ефективність 32-АМБС вища від 32-КАМ на 10%, а інформаційна ефективність – на 1,8%, енергетична ефективність 37-АМБС вища від 36-КАМ на 12%, а інформаційна ефективність – на 3%. При використанні СКК на основі 16-АМБС і згорткового кодування інформаційна ефективність більша від СКК на основі 16-КАМ і згорткового кодування на 1,85%.

Також встановлено, що методи часового та поляризаційного ущільнення/розділення каналів є

$$\left| \alpha_{p_{об}}(f_p) \right| = 10 \lg \left( 1 / \left[ a(1 + b \cdot f_p)^c \right]^{l_{ЛЗ} / l_{ЛЗ_{макс}}} \right), \quad (30)$$

де  $f_p$  – робоча частота;  $l_{ЛЗ}$  – довжина ЛЗ;  $l_{макс}$  – максимальна довжина ЛЗ, для якої визначені коефіцієнти  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .

За допомогою вдосконаленої ММ обчислено пропускну здатність каналу електрозв'язку при застосуванні технологій VDSL та ADSL, проведено дослідження впливу довжини ЛЗ, потужності білого шуму та ширини смуги робочих частот на пропускну здатність каналу електрозв'язку при застосуванні технології ADSL та її модифікацій, а також наведено рекомендації щодо використання сімейства технологій xDSL при створенні телекомунікаційних мереж доступу на основі симетричних ЛЗ.

Удосконалено ММ телекомунікаційної системи на основі ВОЛЗ за допомогою запропонованих співвідношень для обчислення довжини регенераційної ділянки ВОЛЗ, а також наступного запропонованого співвідношення для обчислення чутливості оптичного приймача при застосуванні різних видів модуляції та коректуючого кодування:

$$P_{нрм} = 10 \lg \left( \left( h_{ex_{мод}} \Big|_{P_{\delta_3}} / h_{ex_{БАМн}} \Big|_{P_{\delta_3}} \right) h f_p n_0 \Delta F_{нрм} \right) - \beta_{код}, \quad (31)$$

де  $h_{ex_{мод}} \Big|_{P_{\delta_3}}$ ,  $h_{ex_{БАМн}} \Big|_{P_{\delta_3}}$  – відношення  $P_c / P_{ш}$  на вході приймача, що забезпечує певне допустиме значення ймовірності бітової помилки  $P_{\delta_3}$  при застосуванні обраного різновиду модуляції та бінарної амплітудної модуляції (БАМн) відповідно, безрозмірні величини;  $h$  – стала Планка, Вт·с;  $f_p$  – робоча частота ОХ, Гц;  $n_0$  – чутливість оптичного приймача при застосуванні БАМн (однополярні сигнали), фотон/біт;  $\Delta F_{нрм}$  – шумова смуга пропускання приймача, Гц;  $\beta_{код}$  – енергетична ефективність кодування, дБ.

Шумова смуга пропускання приймача дорівнює:

$$\Delta F_{нрм} = K_{зан} \cdot v_{\delta} / (\gamma_{мод} \cdot \gamma_{код}), \quad (32)$$

де  $K_{зан}$  – коефіцієнт запасу, безрозмірна величина;  $v_{\delta}$  – швидкість передавання даних, біт/с;  $\gamma_{мод}$ ,  $\gamma_{код}$  – частотна ефективність різновиду модуляції (біт/(с·Гц)) та кодування (безрозмірна величина).

Використовуючи вдосконалену ММ телекомунікаційної системи на основі ВОЛЗ, проаналізовано можливість застосування сучасних методів передавання даних у ВОСП, показано їх переваги та недоліки, виявлено обмеження щодо їх застосування. Установлено, що при застосуванні 37-АМБС без кодування порівняно із БФМн досягнуто збільшення швидкості передавання даних у 5,2 раз при зменшенні номінальної довжини регенераційної ділянки на 20% при ширині спектра модульованого сигналу 1,074 ГГц і на 36% – при 26,84 ГГц.



Установлено, що для забезпечення вищої ефективності та швидкості передавання даних у ВОСП слід застосовувати адаптивні методи та засоби передавання на основі двополяризаційних ДП М-ФМн, ДП М-КАМ та ДП М-АМБС, які, зокрема забезпечують підстроювання поляризації аналізаторів приймача відповідно до поляризації ОПС ОХ на виході оптичного волокна з подальшим цифровим обробленням сигналу в приймальному пристрої.

Удосконалено ММ телекомунікаційної системи на основі радіолінії для підвищення точності визначення основних енергетичних характеристик, імовірності помилки на виході вирішуючого пристрою та інших основних параметрів системи в реальному часі залежно від параметрів компонентів системи, застосованих методів формування й оброблення сигналів та характеристик радіолінії, що суттєво впливають на точність обчислень. ММ є універсальною, оскільки придатна для визначення основних енергетичних характеристик ССЗ, РПС ПВ, систем ДЗЗ із космосу, систем зв'язку між КА й літальним апаратом (ЛА), між двома КА, між двома ЛА або між ЛА й НК. Вхідними даними для ММ є параметри орбіти КА, геодезичні координати НК або радіорелейної станції (РРС), параметри передавального (приймального) пристрою КА, НК або РРС, характеристики радіолінії з урахуванням впливу атмосферних явищ, застосовані методи формування й оброблення сигналів.

У процесі вдосконалення такої ММ запропоновано оригінальний спосіб знаходження змінних у часі істинної аномалії, широти й довготи підсупутникової точки для КА, уточнено співвідношення для обчислення похилої дальності та кута піднесення приймальної антени, кутового розміру зони радіовидимості, похилої дальності та кута піднесення на границі зон радіовидимості, прямої видимості та видимості з урахуванням рефракції за рахунок урахування висоти НК (РРС 2, КА 2 або ЛА 2) та висоти перешкоди над поверхнею океану. Запропоновано співвідношення для обчислення тривалості сеансу зв'язку з КА та швидкості руху підсупутникової точки.

Запропоновано наближені співвідношення для опису нормованих амплітудних діаграм направленості (ДН) за потужністю двох різних антен КА, а також враховано вплив на затухання в радіоканалі кутової похибки наведення антени КА відносно напрямку на центр Землі. Кут відхилення  $\theta_{AKA}(t)$  (°) напрямку головного пелюстка антени КА від напрямку на антену НК залежно від часу  $t$  слід обчислювати згідно запропонованої формули:

$$\theta_{AKA}(t) = \arctan(R_A(t)/(h_{KA}(t) - h_{HK})) \cdot 180/\pi, \quad (33)$$

де  $R_A(t)$  – відстань від підсупутникової точки до точки на поверхні Землі, у яку направлений головний пелюсток антени КА, км;  $h_{KA}(t)$  – висота КА над поверхнею океану, км;  $h_{HK}$  – висота НК над поверхнею океану, км.

Швидкість руху підсупутникової точки для КА, що рухається за коловою орбітою, запропоновано обчислювати так:

$$v_{SKA}^{\circ}(t) = v_{KA} r_{HK} / r_{KA}, \quad (34)$$

де  $v_{КА}$  – швидкість руху КА, км/с;  $r_{КА}$ ,  $r_{НК}$  – радіус-вектори КА й НК, км.

Для врахування впливу кута відхилення напрямку головного пелюстка антени КА від напрямку на антену НК, залежного від часу  $t$ , коефіцієнт підсилення (КП) антени КА (дБ) запропоновано обчислювати так:

$$G_{АКА}(t) = 10 \lg(D_A \eta_A F_{АРКА}(\theta_{АКА}(t))), \quad (35)$$

де  $D_A$  – коефіцієнт направленої дії антени;  $\eta_A$  – коефіцієнт корисної дії антени;  $F_{АРКА}(\theta_{АКА}(t))$  – діаграма направленості (ДН) антени КА.

Уведено уточнюючі коефіцієнти пропорційності в співвідношення для опису нормованих амплітудних ДН декількох різних антен НК. Запропоновано співвідношення для обчислення КП антени НК, що враховує кут  $\theta_{АНК}(t)$  між напрямком головного пелюстка антени НК та напрямком на КА з урахуванням ширини ДН у площинах векторів електричної  $\vec{E}$  та магнітної  $\vec{H}$  напруженостей, вираженої за допомогою кута  $\varphi_{АНК}(t)$ :

$$G_{АНК}(t) = 10 \lg(D_A \eta_A F_{АРНК}(\theta_{АНК}(t), \varphi_{АНК}(t))), \quad (36)$$

де  $F_{АРНК}(\theta_{АНК}(t), \varphi_{АНК}(t))$  – ДН антени НК.

Удосконалено співвідношення для обчислення затухання енергії електромагнітної хвилі в кисні та парах води атмосфери, що дозволяє застосовувати їх для обчислення затухання в радіолінії між КА й НК, між двома КА, між двома ЛА, між ЛА й НК або між КА й ЛА, розташованих на різних висотах над поверхнею океану. Для врахування висоти НК (ЛА або КА) над поверхнею океану вдосконалено формули для обчислення затухання енергії електромагнітної хвилі в хмарах, шарі танення кристалів льоду, дощі, тумані та за рахунок сцинтиляції. Ураховано ширину зони танення кристалів льоду, ширину зони дощу або туману для підвищення точності обчислень.

Запропоновано співвідношення для обчислення реальної чутливості приймача в цифровому каналі електрозв'язку в залежності від застосованих різновидів модуляції сигналу й коректуючого кодування  $P_{нрм}(t)$  (дБВт):

$$P_{нрм}(t) = 10 \lg \left( (E_{\bar{\sigma}} / N_0) \Big|_{P_{\bar{\sigma}_3}} k_B T_{ПТ_{нрм}}^e(t) \nu_{\bar{\sigma}} K_{зан} / a_{дем} \right) - \beta_{код} - \gamma_{код}, \quad (37)$$

де  $a_{дем}$  – коефіцієнт пропорційності, що залежить від типу демодулятора,

безрозмірна величина;  $(E_{\bar{\sigma}} / N_0) \Big|_{P_{\bar{\sigma}_3}}$  – відношення енергії одного біта інформації до СГП білого шуму, необхідне для отримання заданої ймовірності бітової помилки  $P_{\bar{\sigma}_3}$  при застосуванні певного різновиду

модуляції сигналу, Дж/(Вт/Гц);  $k_B$  – стала Больцмана;  $T_{ПТ_{нрм}}^e(t)$  – еквівалентна шумова температура приймального тракту, перерахована на

вхід приймача приймального пристрою,  $K$ ;  $\beta_{код}$ ,  $\gamma_{код}$  – енергетична та частотна ефективність застосованого різновиду кодування, дБ.

З використанням удосконаленої ММ телекомунікаційної системи на основі радіолінії здійснено математичне моделювання радіоканалу КА – НІК для передавання даних ДЗЗ при зв'язку з КА систем ДЗЗ Ресурс-ДК1, TERRA, Quick Bird-2, Ikonos-2, Січ-2 та обчислено його основні енергетичні параметри. Установлено, що при діаметрі приймальної антени НІК 5,5 м при зв'язку зі згаданими КА енергетичний запас радіоканалу може змінюватись у межах 0,2...16,5 дБ. Також здійснено моделювання радіоканалу КА – НКУТК для передавання телеметричної інформації при зв'язку з такими КА та обчислено його основні енергетичні параметри. Установлено, що при діаметрі приймальної антени НКУТК 3,0 м при зв'язку зі згаданими КА енергетичний запас радіоканалу може змінюватись у межах 0,1...12,0 дБ.

Адекватність та точність удосконаленої ММ підтверджена порівнянням результатів моделювання та експериментальних даних, отриманих для радіоканалу між КА Січ-2 та НІК, зокрема похибка визначення потужності сигналу на вході демодулятора НІК не перевищувала 1,2 дБ.

**У п'ятому розділі** для підвищення швидкості передавання та сигнальної ефективності вдосконалено методи адаптивного передавання даних у телекомунікаційних мережах доступу, телекомунікаційних системах на основі ВОЛЗ та телекомунікаційних системах на основі радіоліній.

Запропоновано вдосконалений метод адаптивного передавання даних у телекомунікаційних мережах доступу на основі симетричних і коаксіальних ЛЗ із використанням АМБС, використання якого дозволяє вдосконалити відоме сімейство технологій xDSL для максимізації швидкості передавання даних та адаптивного підвищення сигнальної ефективності мережі доступу. Цей метод полягає в адаптивному виборі різновиду модуляції та коректуючого коду, які при певному відношенні  $P_c / P_{ш}$  в телекомунікаційному каналі забезпечують найвищі можливі швидкість передавання даних та ефективність телекомунікаційного каналу, а також імовірність бітової помилки декодування  $P_{\delta_0}$  на виході вирішуючого пристрою, що не перевищує заданої  $P_{\delta_3}$  для нормальної роботи мережі. Установлено, що при застосуванні 8-АМБС замість 8-КАМ сигнальна ефективність вища на 6,1%, а ймовірність  $P_{\delta_0}$  менша в 19 раз при відношенні  $E_{\delta} / N_0 = 12,95$  дБ.

Запропоновано метод передавання даних у ВОСП за допомогою сигналу, сформованого на основі Д8-ФМн, а також структуру ВОСП, що дозволяють збільшити швидкість передавання даних до 100 Гбіт/с та підвищити сигнальну ефективність. Запропоновано два методи передавання даних у ВОСП за допомогою сигналу, сформованого на основі модуляції ОПС ОХ, а також структури двох відповідних пристроїв, які дозволяють

підвищити швидкість передавання даних у два рази порівняно з телекомунікаційними системами, що не використовують ОПС ОХ.

Запропоновано метод передавання даних у ВОСП із використанням ДП Д8-ФМн та структуру ВОСП, що дозволяють збільшити швидкість передавання даних у 1,5 рази порівняно з використанням модуляції ДП КФМн та підвищити сигнальну ефективність такої системи за рахунок поляризаційного ущільнення ФМн-сигналів.

Запропоновано адаптивний метод передавання даних у ВОСП із використанням ДП БФМн, ДП КФМн та ДП КАМ, що дозволяє підвищити сигнальну ефективність ВОСП, змінюючи швидкість передавання даних за рахунок використання різновидів модуляції ОПС ОХ, а також запропоновано структуру ВОСП, що дозволяє передавати дані зі швидкістю до 300 Гбіт/с та відповідно збільшити сигнальну ефективність такої системи.

Запропоновано вдосконалений метод адаптивного передавання даних у ВОСП із використанням ДП АМБС, що дозволяє максимізувати швидкість передавання даних та підвищити сигнальну ефективність системи до 10,4 раз у залежності від якості ВОЛЗ шляхом вибору застосованого різновиду модуляції ОХ та коректуючого кодування, а також структуру ВОСП із використанням запропонованих засобів для формування й оброблення сигналів, що формують різновиди модуляції ДП М-ФМн, ДП М-КАМ, ДП М-АМБС за допомогою модулятора й демодулятора АМБС і забезпечують швидкість передавання даних до 300 Гбіт/с.

До переваг використання АМБС у ВОСП належать: вища ефективність системи порівняно з використанням різновидів М-ФМн або КАМ при тій самій ймовірності помилки, однакових інформативності та максимальній потужності модульованих сигналів; менша ймовірність помилки порівняно з використанням різновидів М-ФМн або КАМ при однакових інформативності та максимальній потужності модульованих сигналів; придатність модулятора й демодулятора АМБС для здійснення БФМн, КФМн, 8-ФМн і КАМ; більша плавність зміни швидкості передавання при реалізації методу адаптивного передавання даних із використанням АМБС.

Особливістю всіх запропонованих ВОСП є те, що в приймальному пристрої таких ВОСП автоматично підстроюють частоту й фазу ОХ опорного лазера відносно прийнятої ОХ для забезпечення когерентної фазової або амплітудно-фазової демодуляції. У приймальному пристрої ВОСП із використанням модуляції ОПС ОХ коректують поляризацію кожної ОПС за допомогою підстроюваного повертача площини поляризації для компенсації паразитної зміни поляризації ОХ при проходженні через ВОЛЗ. У ВОСП із використанням КАМ чи АМБС застосовують амплітудно-фазові демодулятори з функцією автоматичного регулювання підсилення.

Запропоновано вдосконалений метод адаптивного передавання даних у системах ДЗЗ, ССЗ, РРСП ПВ та інших аналогічних системах із використанням АМБС, що полягає в адаптивному виборі різновиду модуляції та коректуючого коду, які при певному відношенні  $P_c / P_{ш}$  в радіоканалі

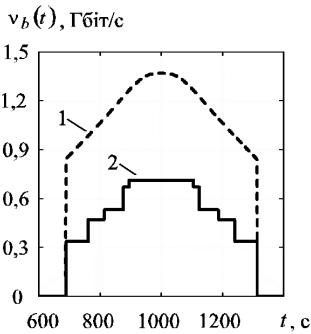


Рис. 6. Залежність швидкості передавання даних через радіоканал КА – НІК від часу  $t$ :

- 1 – максимальне значення;  
2 – при використанні М-ФМн, М-КАМ та М-АМБС.

із застосуванням лише КФМн. Також при застосуванні запропонованого методу можливо збільшити кількість переданих даних і сигнальну ефективність РПСП ПВ на 5,3% при зміні інтенсивності дощу в межах від 16 до 22 мм/год і використанні запропонованих методів модуляції 8-АМБС зі зсувом, 16-АМБС зі зсувом, 32-АМБС зі зсувом замість 8-КАМ, 16-КАМ і 32-КАМ.

Удосконалені вище методи для підвищення ефективності й результати математичного моделювання використано при вдосконаленні засобів формування й оброблення сигналів, а також розробленні оптимальних структур НІК і НКУТК системи ДЗЗ.

Запропоновано оптимальну структуру НІК системи ДЗЗ із космосу, вибрано оптимальні значення основних характеристик та розглянуто принципи побудови складових частин. Оптимізовано основні складові частини НІК за критерієм максимальної сигнальної ефективності, зокрема дзеркальну антену (ДА), опорно-повертальний пристрій (ОПП), систему управління антенною системою (АС), приймач, демодулятор. За допомогою вдосконаленої ММ встановлено, що оптимальний діаметр рефлектора ДА НІК для приймання даних з імовірністю  $P_o \leq 10^{-6}$  з КА систем ДЗЗ Ресурс-ДК1, TERRA, Quick Bird-2, Ikonos-2 і Січ-2 становить 5,5 м, а для приймання даних із КА WorldView-1 – у межах 7...7,3 м, при цьому оптимальний можливий для реалізації коефіцієнт шуму конвертера дорівнює 0,5 дБ.

Запропоновано оптимальну структуру НКУТК системи ДЗЗ із космосу, вибрано оптимальні значення основних характеристик та розглянуто принципи побудови складових частин. Оптимізовано основні складові

забезпечують найвищу можливу швидкість передавання даних та ефективність системи, а також імовірність бітової помилки  $P_{b0}$ , що не перевищує заданої  $P_{b3}$  для нормальної роботи системи. Залежності швидкості передавання даних через досліджуваний радіоканал КА – НІК при використанні КФМн, 7-АМБС, 9-КАМ, 16-АМБС зі зсувом, 19-АМБС та максимального значення цієї швидкості від часу  $t$  зображені на рис. 6. Із проведених досліджень видно, що запропонований метод за таких умов дозволяє збільшити середню швидкість передавання даних, кількість переданих даних протягом сеансу зв'язку та сигнальну ефективність системи в 1,625 раз порівняно із застосуванням лише КФМн. При цьому граничне значення кількості переданих даних через радіоканал в 3,4 рази більше порівняно

частини такого НКУТК за критерієм максимальної сигнальної ефективності, зокрема ДА, ОПП, систему управління АС, приймач, демодулятор. При цьому за результатами проведеного моделювання в запропонованому НКУТК слід застосувати ДА з оптимальним діаметром 4 м.

Зроблено висновок про те, що запропоновані методи та структури доцільно застосовувати при розробленні сучасних ТСМПД.

**У додатках** наведені допоміжні матеріали для ілюстрації сигнальних сузір'їв відомих методів модуляції сигналу, пояснення роботи пристроїв для їх здійснення, деякі співвідношення, що необхідні при дослідженні частотних та енергетичних характеристик сигналів, формули вдосконаленої ММ телекомунікаційної системи на основі радіоліній, що не ввійшли в основну частину дисертації, результати математичного моделювання телекомунікаційних систем на основі радіоліній, структурні схеми запропонованих телекомунікаційних систем на основі ВОЛЗ та їх складових частин, основні характеристики та структурні схеми запропонованих телекомунікаційних систем на основі радіоліній, а також документи про впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана важлива науково-прикладна проблема – підвищення технічної ефективності ТСМ з обмеженими смугою пропускання та потужністю сигналу при передаванні даних в умовах завад. Результати, отримані в дисертаційній роботі, доведено до практичної реалізації та впровадження.

У роботі отримано такі основні результати:

1. Удосконалено теоретичні основи визначення технічної ефективності ТСМ шляхом застосування запропонованої комплексної характеристики – коефіцієнта використання ТСМ за застосованими методами формування й оброблення сигналів (сигнальної ефективності  $\eta_c$ ), що крім інформаційної ефективності методів модуляції та розділення каналів додатково враховує інформаційну ефективність СКК, ефективність методу передавання даних і дозволяє комплексно оцінити технічну ефективність таких систем та мереж.

2. Уперше запропоновано нові різновиди АФМ для застосування в ТСМПД – нове сімейство модуляцій на основі запропонованої АМБС, при здійсненні якої, на відміну від АМн, ФМн та КАМ, модульований сигнал формують у вигляді суми його  $N$  модульованих за амплітудою складових, які зсунуті між собою на фазові кути  $\Delta\varphi_n$ , що дозволяє за допомогою запропонованого методу підвищення ефективності каналів електрозв'язку в радіотехнічних і телекомунікаційних системах при використанні АМБС із застосуванням запатентованого способу передавання даних за допомогою інформаційного сигналу, сформованого на основі АМБС (пат. №91942 України), забезпечити вищу технічну ефективність радіотехнічних і ТСМПД або значно меншу ймовірність помилки при заданій швидкості передавання. При цьому для забезпечення тієї ж завадостійкості при передаванні даних з

використанням 8-АМБС зі зсувом необхідно на 1,55 дБ менше відношення потужності сигналу до потужності шуму в каналі електрозв'язку порівняно з 8-КАМ, а при застосуванні 36-АМБС – на 1,43 дБ менше відношення потужності сигналу до потужності шуму порівняно з 36-КАМ. При однаковій максимальній потужності модульованого сигналу ймовірність бітрової помилки при відношенні енергії одного біта інформації до СГП білого шуму 12,95 дБ є меншою в 19 раз при використанні 8-АМБС зі зсувом порівняно з 8-КАМ і в 66 раз – порівняно з 8-ФМн.

3. Уперше запропоновано принципи функціонування засобів для здійснення модуляції й демодуляції АМБС-сигналів із застосуванням запатентованого пристрою для передавання даних за допомогою інформаційного сигналу, сформованого на основі АМБС (пат. №91950 України), які, на відміну від засобів для здійснення модуляції й демодуляції АМн-, ФМн- та КАМ-сигналів, формують та обробляють АМБС-сигнали у вигляді суми їх  $N$  модульованих за амплітудою та зсунутих між собою на фазові кути  $\Delta\varphi_n$  складових, що дозволяє забезпечити підвищення технічної ефективності радіотехнічних і ТСМПД або значне зменшення ймовірності помилки при заданій швидкості передавання, а також крім АМБС-сигналів формувати АМн-, ФМн-, АФМн- та КАМ-сигнали.

4. Уперше запропоновано представлення процесу демодуляції сигналів у демодуляторі АМБС із  $N$  підканалами за допомогою  $N$ -вимірного простору демодуляції, застосування якого, на відміну від  $N$ -вимірного простору сигналів, дозволяє оцінити зменшення ймовірності помилки при застосуванні демодулятора АМБС порівняно із квадратурним демодулятором при однаковій нестабільності їх параметрів.

5. Уперше запропоновано метод дослідження й оптимізації СКК за критерієм максимальної інформаційної ефективності ТСМПД засобами математичного моделювання, що базується на використанні запропонованих чи вдосконалених методик, процедур, алгоритмів, правил, розробленого ПЗ і дозволяє серед відомих та нових запропонованих СКК виявити такі, які забезпечують мінімальну ймовірність помилки при заданій швидкості передавання або максимальну інформаційну ефективність ТСМ, зокрема знайти найбільш оптимальні сигнальні сузір'я для запропонованої АМБС.

6. Удосконалено аналітичні співвідношення для визначення спектральних характеристик модулюючих та АФМ-сигналів, завдяки яким можливо обчислювати за допомогою ЕОМ спектри сигналів за декілька секунд порівняно з використанням чисельних методів обчислення, які потребують декілька десятків хвилин, та зменшити похибку обчислень амплітуди й початкової фази спектральних складових спектрів модулюючих сигналів, що при використанні чисельних методів обчислення може досягати 33%, похибку обчислень потужності спектральних складових спектрів АФМ-сигналів, що при використанні чисельних методів обчислення може досягати мінус 64%, та аналітичне співвідношення для визначення ймовірності символної помилки в ТСМ, що дозволило підвищити точність обчислення

при здійсненні різновидів АМн, ФМн, АФМн, КАМ і АМБС із довільною кількістю та розташуванням точок на сигнальній площині.

7. Удосконалено три ММ: телекомунікаційної мережі доступу на основі симетричних і коаксіальних ЛЗ, телекомунікаційної системи на основі ВОЛЗ, телекомунікаційної системи на основі радіоліній – шляхом урахування характеристик застосованих відомих чи нових різновидів модуляції та коректуючого кодування, а також уточненням формул для визначення параметрів компонентів таких ТСМ, які найбільш суттєво впливають на точність моделювання, що дозволило зменшити похибку визначення ряду основних параметрів цифрового каналу електров'язку (системи чи мережі), зокрема визначати енергетичний потенціал цифрового радіоканалу з похибкою не більше 1,2 дБ, і завдяки цьому підвищити точність визначення технічної ефективності досліджуваних ТСМ або ймовірності помилки при передаванні даних, здійснювати аналіз відомих і синтез нових високоефективних ТСМ, а також оптимізувати параметри їх окремих компонентів за багатьма критеріями із метою підвищення технічної ефективності.

8. Удосконалено метод адаптивного передавання даних у телекомунікаційних мережах доступу на основі симетричних і коаксіальних ЛЗ із використанням АМБС, застосування якого для вдосконалення сімейства технологій xDSL дозволяє мінімізувати ймовірність бітової помилки при передаванні даних із заданою швидкістю, максимізувати швидкість передавання даних та адаптивно підвищувати сигнальну ефективність мережі доступу, зокрема при застосуванні 8-АМБС зі зсувом сигнальна ефективність більша на 6,1% порівняно з 8-КАМ.

9. Удосконалено метод адаптивного передавання даних у ВОСП із використанням ДП АМБС, що дозволяє мінімізувати ймовірність бітової помилки при передаванні даних із заданою швидкістю, максимізувати швидкість передавання даних та адаптивно підвищувати сигнальну ефективність системи, зокрема при застосуванні 37-АМБС порівняно із БФМн досягнуто збільшення швидкості передавання даних та сигнальної ефективності в 5,2 раз при зменшенні номінальної довжини регенераційної ділянки на 20% при ширині спектра модульованого сигналу 1,074 ГГц і на 36% – при 26,84 ГГц. При застосуванні ДП 37-АМБС порівняно із БФМн можливо підвищити швидкість передавання даних та сигнальну ефективність у 10,4 раз.

10. Удосконалено метод адаптивного передавання даних у системах ДЗЗ, ССЗ, РРСП ПВ та інших аналогічних системах із використанням АМБС, що при застосуванні в радіоканалі КА – НІК для передавання даних системи ДЗЗ КФМн, 7-АМБС, 9-КАМ, 16-АМБС зі зсувом та 19-АМБС дозволяє мінімізувати ймовірність бітової помилки при передаванні даних із заданою швидкістю, збільшити середню швидкість передавання даних і сигнальну ефективність системи в 1,625 раз протягом сеансу зв'язку порівняно із застосуванням лише КФМн. При використанні 8-АМБС зі зсувом, 16-АМБС



зі зсувом та 32-АМБС зі зсувом замість 8-КАМ, 16-КАМ і 32-КАМ можливо збільшити середню швидкість передавання даних через РРСП ПВ на 5,3%.

11. Удосконалено засоби формування й оброблення сигналів у ВОСП, НК і НКУТК системи ДЗЗ із космосу шляхом використання запропонованих чи вдосконалених методів і результатів математичного моделювання із застосуванням ММ таких систем, що дозволило оптимізувати структури досліджуваних систем за критерієм максимальної технічної ефективності.

Запропоновані чи вдосконалені в роботі методи, засоби й ММ доцільно використовувати при розробленні й проектуванні нових та модернізації існуючих ТСМПД для забезпечення їх високої технічної ефективності.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Горбатий І.В. Системи дистанційного зондування Землі з космосу : монографія / І.В. Горбатий. – Львів : СПОЛОМ, 2011. – 612 с.
2. Горбатий І.В. Математичні моделі та методи дослідження телекомунікаційних каналів : монографія / І.В. Горбатий. – Львів : СПОЛОМ, 2006. – 156 с.
3. Gorbaty I.V. Optimization of signal-code constructions using the maximum efficiency criterion / I.V. Gorbaty // *Radioelectronics and communications systems*. – New York, 2013. – Vol. 56, No. 12. – P. 560–567.
4. Gorbaty I.V. Investigation of the technical efficiency of state-of-the-art telecommunication systems and networks with limited bandwidth and signal power / I.V. Gorbaty // *Automatic Control and Computer Sciences*. – New York, 2014. – Vol. 48, No. 1, P. 47–55.
5. Klymash M.M. Decreasing of error probability in telecommunication access networks by using amplitude modulation of many components / M.M. Klymash, I.V. Gorbaty // *ECONTECHMOD*. – Lublin – Rzeszow, 2014. – Vol. 3, No. 1. – P. 55-60.
6. Горбатый И.В. Исследование модуляции сигнала в телекоммуникационных системах и сетях средствами математического моделирования / И.В. Горбатый // *T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт*. – Москва, 2014. – №1. – С. 38–43.
7. Горбатый И.В. Сигнальная эффективность радиотехнических и телекоммуникационных систем и сетей / И.В. Горбатый // *Проблемы управления и информатики*. – Киев, 2014. – №2. – С. 102–113.
8. Горбатий І.В. Нові різновиди модуляції сигналу в цифрових радіорелейних системах передавання [Електронний ресурс] / І.В. Горбатий // *Проблеми телекомунікацій*. – Харків, 2013. – №2 (11). – С. 44–55. – Режим доступу до журн. : [http://pt.journal.kh.ua/2013/2/1/132\\_gorbaty\\_modulation.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2013/2/1/132_gorbaty_modulation.pdf).
9. Климаш М.М. Теоретичні дослідження ймовірності помилки в телекомунікаційних системах та мережах при використанні фазової або амплітудно-фазової модуляції сигналу / М.М. Климаш, І.В. Горбатий // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – Харків, 2014. – №1. – С. 23–30.

10. Горбатий І.В. Амплітудна модуляція багатьох складових / І.В. Горбатий // Зб. наук. пр. (Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України). – Київ, 2009. – Вип. 50. – С. 186–190.
11. Горбатий І. Метод підвищення ефективності телекомунікаційних каналів у системах зв'язку й дистанційного зондування Землі / І. Горбатий // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2009. – №650 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 173–177.
12. Горбатий І.В. Метод та пристрій для здійснення амплітудної модуляції багатьох складових / І.В. Горбатий // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2009. – №646 : Електроніка. – С. 185–190.
13. Горбатий І.В. Методи формування сигналів із зсувом фази на  $90^\circ$  у цифрових системах зв'язку / І.В. Горбатий // Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Київ, 2006. – Вип. 35. – С. 149–153.
14. Горбатий І.В. Дослідження амплітудно-модульованих сигналів за допомогою векторних діаграм / І.В. Горбатий // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Київ, 2007. – Вип. 42. – С. 111–118.
15. Горбатий І.В. Спектральні характеристики послідовностей прямокутних імпульсів з малою кількістю дискретних значень амплітуди / І.В. Горбатий // Зб. наук. пр. (Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України). – Київ, 2007. – Вип. 44. – С. 47–54.
16. Горбатий І.В. Дослідження точності обчислення спектральних характеристик амплітудно-маніпульованих сигналів / І.В. Горбатий // Зб. наук. пр. (Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України). – Київ, 2007. – Вип. 42. – С. 138–145.
17. Горбатий І.В. Дослідження спектральних характеристик КАМ сигналів / І.В. Горбатий // Зб. наук. пр. (Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України). – Київ, 2008. – Вип. 47. – С. 56–62.
18. Горбатий І.В. Теоретичні дослідження впливу параметрів каналу зв'язку на його пропускну здатність / І.В. Горбатий // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2007. – №591 : Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – С. 10–15.
19. Горбатий І.В. Дослідження ймовірності помилки в бінарних телекомунікаційних системах / І.В. Горбатий // Зб. наук. пр. (Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України). – Київ, 2007. – Вип. 41. – С. 98–105.
20. Горбатий І.В. Дослідження ймовірності помилки в телекомунікаційних системах із фазовою модуляцією / І.В. Горбатий // Зб. наук. пр. (Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України). – Київ, 2008. – Вип. 45. – С. 180–186.
21. Горбатий І.В. Дослідження ефективності фазової маніпуляції / І.В. Горбатий // Моделювання та інформаційні технології. – Київ, 2008. – Вип. 48. – С. 210–214.

22. Горбатий І.В. Дослідження інформаційної ефективності сучасних різновидів модуляції сигналу / І.В. Горбатий // Моделювання та інформаційні технології. – Київ, 2009. – Вип. 54. – С. 66–71.
23. Горбатий І.В. Дослідження інформаційної ефективності амплітудної модуляції багатьох складових / І.В. Горбатий // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2010. – №681 : Електроніка. – С. 191–196.
24. Горбатий І.В. Дослідження й оптимізація модуляції сигналу засобами математичного моделювання / І.В. Горбатий, М.М. Климаш // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2010. – №680 : Радіоелектроніка і телекомунікації. – С. 217–224.
25. Тимченко О. Модель виділеного телекомунікаційного каналу для потреб поліграфічного комплексу / О. Тимченко, І. Горбатий // Комп’ютерні технології друкарства. – Львів, 2005. – №13. – С. 183–187.
26. Тимченко О.В. Узагальнена математична модель телекомунікаційного каналу / О.В. Тимченко, І.В. Горбатий, І.Д. Орлевич // Моделювання та інформаційні технології. – Київ, 2005. – Вип. 31. – С. 70–75.
27. Горбатий І. Дослідження точності визначення пропускної здатності телекомунікаційних каналів під час використання різних математичних моделей / І. Горбатий // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2005. – №543 : Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – С. 68–72.
28. Горбатий І.В. Дослідження залежності пропускної здатності телекомунікаційного каналу від довжини кабельної лінії / І.В. Горбатий, О.В. Тимченко // Зб. наук. пр. (Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України). – Київ, 2005. – Вип. 31. – С. 141–145.
29. Горбатий І.В. Метод визначення пропускної здатності каналу або лінії зв’язку з використанням значень згасання кабеля / І.В. Горбатий, О.В. Тимченко // Моделювання та інформаційні технології. – Київ, 2005. – Вип. 34. – С. 147–152.
30. Горбатий І.В. Дослідження методів високошвидкісного передавання даних у сучасних волоконно-оптичних системах / І.В. Горбатий // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2012. – №734 : Електроніка – С. 178–187.
31. Горбатий І.В. Розробка математичної моделі радіоканалу космічний апарат – приймальна станція та її дослідження на прикладі проекту EgyrSat-1 / І.В. Горбатий, В.І. Горбатий // Зб. наук. пр. (Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України). – Київ, 2008. – Вип. 46. – С. 162–170.
32. Горбатий В. Визначення оптимального діаметра антени приймальної станції для приймання даних із супутників ДЗЗ / В. Горбатий, І.В. Горбатий // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2008. – №618 : Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 192–196.
33. Горбатий І. Удосконалення математичної моделі радіоканалів систем дистанційного зондування Землі, супутникових систем зв’язку та радіорелейних систем передавання прямої видимості / І. Горбатий // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2012. – №732 : Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – С. 133–141.

34. Горбатий І.В. Методи передавання інформації за допомогою сигналу, сформованого на основі модуляції ортогонально-поляризованих складових / І.В. Горбатий, М.М. Климаш // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – Київ, 2010. – №4(16). – С. 12–19.
35. Климаш М.М. Метод передавання інформації у волоконно-оптичній системі з використанням двополяризаційної диференційної восьмифазної маніпуляції оптичної хвилі / М.М. Климаш, І.В. Горбатий // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2011. – №705 : Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 90–97.
36. Горбатий І.В. Передавання інформації у волоконно-оптичних системах із використанням сучасних методів формування та оброблення сигналів / І.В. Горбатий // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2011. – №708 : Електроніка. – С. 131–137.
37. Горбатий І.В. Адаптивне передавання даних у волоконно-оптичних системах із використанням амплітудної модуляції багатьох складових / І.В. Горбатий // Зб. наук. пр. (Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України). – Київ, 2011. – Вип. 60. – С. 172–181.
38. Горбатий І.В. Метод адаптивного передавання даних у системах дистанційного зондування Землі, супутникових системах зв'язку, радіорелейних системах передавання прямої видимості / І.В. Горбатий // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2012. – №738 : Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 160–164.
39. Горбатий І.В. Сучасні тенденції розвитку систем дистанційного зондування Землі / І.В. Горбатий, В.І. Горбатий // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ПІМЕ НАН України. – Вип. 49. – Київ, 2008. – С. 275–284.
40. Горбатий І. Основні тенденції розвитку наземних інформаційних комплексів систем дистанційного зондування Землі / І. Горбатий // Комп'ютерні технології друкарства. – Львів, 2009. – №21. – С. 165–174.
41. Горбатий І. Перспективи розвитку дистанційного зондування Землі в Україні та світі / І. Горбатий // Комп'ютерні технології друкарства. – Львів, 2011. – №25. – С. 135–142.
42. Горбатий І.В. Проектування наземних інформаційних комплексів систем дистанційного зондування Землі / І.В. Горбатий // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2009. – №651 : Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – С. 34–39.
43. Пат. №91942 Україна, МПК (2009) Н04L27/34, Н04L27/20, Н03D3/00, Н04L5/00. Спосіб передавання даних за допомогою інформаційного сигналу, сформованого на основі амплітудної модуляції багатьох складових / І.В. Горбатий. – №a200905785 ; заявл. 5.06.2009 ; опубл. 10.09.2010, Бюл. №17. – 4 с.
44. Пат. №91950 Україна, МПК (2009) Н04L27/34, Н04L27/20, Н03D3/00, Н04L5/00. Пристрій для передавання даних за допомогою інформаційного сигналу, сформованого на основі амплітудної модуляції багатьох складових /

І.В. Горбатий. – №а200909567 ; заявл. 18.09.2009 ; опубл. 10.09.2010, Бюл. №17. – 6 с.

45. Горбатий І. Математична модель для визначення зони видимості та тривалості сеансу зв'язку між космічними апаратами й наземними комплексами / І. Горбатий // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – Львів, 2012. – Вип. 15. – С. 20–28.

46. Горбатий І. Удосконалення сімейства технологій передавання даних ADSL використанням амплітудної модуляції багатьох складових / І. Горбатий // Електроніка та інформаційні технології. – Львів, 2013. – Вип. 3. – С. 133–143.

47. Горбатий І. Математичне моделювання телекомунікаційних систем в умовах гаусівських завад при використанні різних видів модуляції сигналу / І. Горбатий // Збірник наук. пр. Львівського держ. ін-ту новітніх технологій та управління ім. В. Чорновола. Серія “Фізико-математичні та технічні науки”. – Львів, 2010. – №3. – С. 67–74.

48. Gorbatyy I. Particularities of the amplitude shift keying signal spectrum calculation / I. Gorbatyy // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science : the International Conf. TCSET'2008, february 19–23, 2008, Lviv – Slavsko, Ukraine : proc. of conf. – Lviv, 2008. – P. 475–476.

49. Gorbatyy I. Research of efficiency of the data transmission telecommunication systems with limited by the frequency stripe and power / I. Gorbatyy // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science : the Xth International Conf. TCSET'2010, february 29–27, 2010, Lviv – Slavske, Ukraine : proc. of conf. – Lviv, 2010. – P. 240.

50. Gorbatyy I. Method for calculation of the reception capacity of leased telecommunication channel / I. Gorbatyy, A. Tymchenko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science : the International Conf. TCSET'2006, february 28 – march 4, 2006, Lviv – Slavsko, Ukraine : proc. of conf. – Lviv, 2006. – P. 475–476.

51. Klymash M. Fiber optic telecommunication system with the use of modulation D8PSK / M. Klymash, I. Gorbatyy // The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics : the XIth International Conf. CADSM 2011, february 22–25, 2011, Polyana – Svalyava, Ukraine : proc. of conf. – Lviv, 2011. – P. 147–148.

52. Klymash M. Modernization of the ADSL technologies family by the use of new variety of modulation / M. Klymash, I. Gorbatyy, I. Tybel // The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics : the XIIth International Conf. CADSM 2013, february 19–23, 2013, Lviv – Polyana, Ukraine : proc. of conf. – Lviv, 2013. – P. 167–168.

53. Gorbatyy I.V. Signal-code constructions with the use of amplitude modulation of many components / I.V. Gorbatyy // Information Technologies and Systems 2012 (ITS 2012) : Proceeding of The International Conference, BSUIR, Minsk, 24th October 2012. – Минск : БГУИР, 2012. – С. 18–19.

54. Горбатий І.В. Дослідження нових різновидів модуляції сигналу / І.В. Горбатий // Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии (PIC S&T'2013) : Первая международная науч.-практ. конф., 9–11 октября 2013 г., Харьков : сборник научных трудов. – Харьков, 2013. – С. 229–232.
55. Горбатий І.В. Підвищення швидкості передавання даних у радіорелейних системах і телекомунікаційних мережах доступу при використанні амплітудної модуляції багатьох складових / І.В. Горбатий // Інфокомунікації – сучасність та майбутнє : третя міжнародна наук.-практ. конф., 17–18 жовтня 2013 р., Одеса : збірник тез, частина 3. Одеса, 2013. С. 39–43.
56. Gorbatyy I. Comparison of methods of manipulated signals forming in the digital communication systems / I. Gorbatyy // Computer science and information technologies : the III International Conf. CSIT'2008, september 25–27, 2008, Lviv, Ukraine : proc. of conf. – Lviv, 2008. – P. 21–23.
57. Климаш М.М. Моделювання та дослідження телекомунікаційних систем і мереж передавання даних з амплітудною модуляцією багатьох складових / М.М. Климаш, І.В. Горбатий // Шоста міжнародна наук.-техн. конф. та Четверта студ. наук.-техн. конф. “Проблеми телекомунікацій”, 24–27 квітня 2012 р., Київ : матеріали конф. – Київ, 2012. – С. 100–102.
58. Горбатий І.В. Дослідження спектральних характеристик сучасних різновидів смужової модуляції сигналу / І.В. Горбатий // Шевченківська весна – 2014 : XII Міжнародна наук.-практ. конф., 25–28 березня 2014 р., Київ, Україна : матеріали конф., частина II, фіз.-мат. науки. – Київ, 2014. – С. 9–11.
59. Горбатий І.В. Моделі спектральних характеристик послідовності прямокутних імпульсів із незмінною щільністю / І.В. Горбатий // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2007 : наук.-метод. конф., 17–20 жовтня 2007 р., Львів : матеріали конф. – Львів, 2007. – С. 23–24.
60. І.В. Горбатий. Дослідження неортогональних різновидів амплітудно-фазової модуляції та реалізація модуляторів для їх здійснення / І.В. Горбатий // 12-а відкрита наук.-техн. конф. професорсько-викладацького складу ІТРЕ НУ “Львівська політехніка” з проблем електроніки, 7–9 квітня 2009 р., Львів : тези доп. – Львів, 2009. – С. 20.
61. Горбатий І.В. Дослідження ймовірності помилки у телекомунікаційних системах з використанням різновидів амплітудно-фазової модуляції / І.В. Горбатий // 13-а відкрита наук.-техн. конф. ІТРЕ з проблем електроніки, 13–15 квітня 2010 р., Львів : тези доп. – Львів, 2010. – С. 18.
62. Горбатий І. Дослідження ймовірності помилки при застосуванні в телекомунікаційних системах різновидів модуляції сигналу методами математичного моделювання / І. Горбатий // Математичне моделювання складних систем : наук.-техн. конф., 12–14 травня 2010 р., Львів : матеріали конф. – Львів, 2010. – С. 59–60.
63. Горбатий І.В. Оцінка ефективності сучасних різновидів модуляції сигналу при передаванні даних / І.В. Горбатий // Сучасні проблеми телекомунікацій і

- підготовка фахівців в галузі телекомунікацій : наук.-метод. конф., 28–30 жовтня 2009 р., Львів : матеріали конф. – Львів, 2009. – С. 43–44.
64. Горбатий І.В. Математична модель телекомунікаційного каналу для визначення пропускної здатності в умовах завод / І.В. Горбатий, О.В. Тимченко, І.Д. Орлевич // Сучасні проблеми телекомунікацій – 2005 : наук.-практ. конф., 20–23 жовтня 2005 р., Львів : матеріали конф. – Львів, 2005. – С. 5.
65. Горбатий І.В. Дослідження впливу довжини лінії зв'язку на пропускну здатність каналу зв'язку на основі технологій ADSL2 та ADSL2+ / І.В. Горбатий, О.В. Тимченко // Сучасні проблеми телекомунікації і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2006 : наук.-метод. конф., 19–22 жовтня 2006 р., Львів : матеріали конф. – Львів, 2006. – С. 42–44.
66. Горбатий І.В. Удосконалення методів модуляції сигналу при передаванні даних згідно технологій ADSL/ADSL2/ADSL2+ / І.В. Горбатий, М.М. Климаш, І.Д. Орлевич // Сучасні проблеми телекомунікацій – 2010 : наук.-практ. конф., 28–30 жовтня 2010 р., Львів : матеріали конф. – Львів, 2010. – С. 46–49.
67. Климаш М.М. Методи формування інформаційних сигналів у волоконно-оптичних системах / М.М. Климаш, І.В. Горбатий // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2011 : наук.-метод. конф., 27–30 жовтня 2011 р., Львів : матеріали конф. – Львів, 2011. – С. 3–5.
68. Горбатий І.В. Когерентні системи передавання на основі волоконно-оптичних ліній зв'язку / І.В. Горбатий // 15-а відкрита наук.-техн. конф. ІТРЕ з проблем електроніки та інфокомунікаційних систем, 3–5 квітня 2012 р., Львів : програма та тези доп. – Львів, 2012. – С. 48.
69. Горбатий І.В. Сигнально-кодові конструкції у волоконно-оптичних системах передавання / І.В. Горбатий, М.І. Олексін // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012 : наук.-метод. конф., 1–4 листопада 2012 р., Львів : матеріали конф. – Львів, 2012. – С. 38–40.
70. Горбатий І.В. Перспективи й основні тенденції розвитку космічного сегменту систем дистанційного зондування Землі / І.В. Горбатий, В.І. Горбатий // Сучасні проблеми телекомунікацій – 2008 : наук.-практ. конф., 29–30 жовтня 2008 р., Львів : матеріали конф. – Львів, 2008. – С. 69–71.
71. Климаш М.М. Зменшення ймовірності помилки у волоконно-оптичних системах при використанні амплітудної модуляції багатьох складових / М.М. Климаш, І.В. Горбатий // Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013 (СПТЕЛ – 2013) : Ювілейна Всеукраїнська наук.-практ. конф., 30 жовтня – 1 листопада 2013 р., Львів : збірник тез. – Львів, 2013. С. 56–59.

## АНОТАЦІЯ

**Горбатий І.В. Методи та засоби формування й оброблення сигналів для підвищення ефективності телекомунікаційних систем та мереж передавання даних.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі. – Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, Львів, 2014.

Дисертація присвячена розробленню методів та засобів формування й оброблення сигналів для підвищення технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж з обмеженими смугою пропускання та потужністю сигналу при передаванні даних в умовах завод.

Запропоновано нове сімейство високоефективних модуляцій на основі амплітудної модуляції багатьох складових (АМБС),  $N$ -вимірний простір демодуляції, принципи функціонування засобів для здійснення модуляції й демодуляції АМБС-сигналів, що дозволило підвищити ефективність телекомунікаційних систем та мереж. Запропоновано метод дослідження й оптимізації сигнально-кодової конструкції за критерієм максимальної інформаційної ефективності телекомунікаційної системи чи мережі передавання даних, що дозволяє виявити найбільш ефективні серед відомих та нових запропонованих сигнально-кодових конструкцій.

Удосконалено теоретичні основи визначення технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж, аналітичні співвідношення для визначення частотних та енергетичних характеристик модулюючих та модульованих сигналів, математичні моделі телекомунікаційної мережі доступу на основі симетричних і коаксіальних ліній зв'язку, телекомунікаційної системи на основі волоконно-оптичних ліній зв'язку та телекомунікаційної системи на основі радіоліній, що дозволило підвищити точність визначення ефективності досліджуваних систем чи мереж.

Запропоновано вдосконалені методи адаптивного передавання даних у телекомунікаційних мережах доступу на основі симетричних і коаксіальних ліній зв'язку, волоконно-оптичних системах передавання, системах дистанційного зондування Землі, супутникових системах зв'язку, радіорелейних системах передавання прямої видимості та інших аналогічних системах із використанням АМБС, що дозволило мінімізувати ймовірність бітової помилки при передаванні даних із заданою швидкістю, максимізувати швидкість передавання даних та підвищити ефективність системи чи мережі.

**Ключові слова:** телекомунікаційна мережа, телекомунікаційна система, передавання даних, технічна ефективність, модуляція, демодуляція, сигнально-кодова конструкція, математична модель.

## АННОТАЦИЯ

**Горбатый И.В. Методы и средства формирования и обработки сигналов для повышения эффективности телекоммуникационных систем и сетей передачи данных.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук



по специальности 05.12.02 – Телекоммуникационные системы и сети. – Национальный университет “Львовская политехника” Министерства образования и науки Украины, Львов, 2014.

Диссертация посвящена разработке методов и средств формирования и обработки сигналов для повышения технической эффективности телекоммуникационных систем и сетей с ограниченными полосой пропускания и мощностью сигнала при передаче данных в условиях помех.

Предложено новое семейство высокоэффективных модуляций на основе амплитудной модуляции многих составляющих (АММС), метод повышения эффективности каналов электросвязи в радиотехнических и телекоммуникационных системах при использовании АММС с применением запатентованного способа,  $N$ -мерное пространство демодуляции, необходимое для представления АММС-сигналов с  $N$  составляющими при их демодуляции, принципы функционирования средств для осуществления модуляции и демодуляции АММС-сигналов с использованием запатентованного устройства, что позволило повысить эффективность телекоммуникационных систем и сетей передачи данных.

Предложен метод исследования и оптимизации сигнально-кодовой конструкции за критерием максимальной информационной эффективности телекоммуникационной системы или сети передачи данных средствами математического моделирования, который позволяет выявить наиболее эффективные среди известных и новых предложенных сигнально-кодовых конструкций.

Усовершенствованы теоретические основы определения технической эффективности телекоммуникационных систем и сетей, что позволило комплексно оценить их техническую эффективность. Усовершенствованы аналитические соотношения для определения частотных и энергетических характеристик модулирующих и модулированных сигналов, что позволило повысить точность при определении и сравнении характеристик сигналов, влияющих на эффективность телекоммуникационных систем и сетей.

Усовершенствованы математические модели телекоммуникационной сети доступа на основе симметричных и коаксиальных линий связи, телекоммуникационной системы на основе волоконно-оптических линий связи и телекоммуникационной системы на основе радиолиний, что позволило повысить точность определения эффективности исследуемых систем или сетей, осуществлять анализ известных и синтез новых высокоэффективных систем или сетей, а также оптимизировать параметры их отдельных компонентов с целью повышения эффективности.

Предложены три усовершенствованные методы адаптивной передачи данных: в телекоммуникационных сетях доступа на основе симметричных и коаксиальных линий связи, волоконно-оптических системах передачи, системах дистанционного зондирования Земли, спутниковых системах связи, радиорелейных системах передачи прямой видимости и других аналогичных системах с использованием АММС, что позволило минимизировать вероятность битовой ошибки при передаче данных с заданной скоростью,

максимизировать скорость передачи данных при заданной вероятности ошибки и повысить эффективность системы или сети.

**Ключевые слова:** телекоммуникационная сеть, телекоммуникационная система, передача данных, техническая эффективность, модуляция, демодуляция, сигнально-кодовая конструкция, математическая модель.

### ABSTRACT

**Gorbatyy I.V. Methods and facilities of signal forming and processing for efficiency increasing of the data transmission telecommunication systems and networks.** – As a manuscript.

A thesis submitted in fulfillment of the Doctor's degree in technical sciences on specialty 05.12.02 – Telecommunication systems and networks. – Lviv Polytechnic National University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2014.

A thesis was devoted to development of methods and facilities of signal forming and processing for technical efficiency increasing of the telecommunication systems and networks with limited bandwidth and signal power in case of data transmission in the conditions of noises.

The new high efficient modulation group based on amplitude modulation of many components (AMMC),  $N$ -measured space of demodulation, functioning principles of facilities for realization of modulation and demodulation of AMMC-signals was offered, that allowed to increase the efficiency of the telecommunication systems and networks. The method of research and optimization of signal-code construction by the criterion of maximal informative efficiency of the data transmission telecommunication system or network was offered, that allows to find most effective among the known and new offer signal-code constructions.

Theoretical bases for determination of technical efficiency of the telecommunication systems and networks, analytical correlations for determination of frequency and energy descriptions of modulating and modulated signals, mathematical model of the telecommunication access network based on symmetric and coaxial communication lines, mathematical model of the fiber optic telecommunication system and mathematical model of the telecommunication system based on radio line was modernized, that allowed to increase exactness of determination of the explore systems or networks efficiency.

The modernized methods of adaptive data transmission in the telecommunication access networks based on symmetric and coaxial telecommunication lines, fiber optic telecommunication systems, systems of the remote sensing of Earth, satellite systems, radio relay transmission systems of direct visibility and others similar systems with the use of AMMC was offered, that allowed to maximize a speed of data transmission and increase the efficiency of the system or network.

**Key words:** telecommunication network, telecommunication system, data transmission, technical efficiency, modulation, demodulation, signal-code construction, mathematical model.