

ELECTRONIC COMMUNICATIONS ЕЛЕКТРОННІ КОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396.2

DOI:10.30837/rt.2025.3.222.15

*В.В. ДОВГИЙ, канд. техн. наук, В.М. ГРИГА, канд. техн. наук,
Б.С. ДЗУНДЗА, д-р техн. наук, І.В. СВІД, канд. техн. наук,
А.І. ТЕРЛЕЦЬКИЙ, канд. фіз.-мат. наук, М.Ф. ПАВЛЮК, канд. фіз.-мат. наук*

АНАЛІЗ ЦИФРОВИХ ІНТЕРФЕЙСІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Вступ

На даний час область використання комп'ютерів та Інтернету є настільки великою, що безперебійна робота комп'ютерних систем та мереж є критично важливою для більшості галузей економіки. Важливо, щоб обмін даними був швидким і без помилок, але ще більш важливо забезпечити стабільність зв'язку, зокрема і при аварійних відключеннях електрики. З кожним днем технології, що використовуються, стають кращими завдяки науково-технічному прогресу та розвитку елементної бази. Зокрема, з появою оптоволоконних каналів зв'язку досягнуто надвисоких швидкостей передачі даних [1 – 3]. Оптичні канали зв'язку забезпечують надійність зв'язку тільки у випадку, якщо оптичний кабель заведено напям до абонента, де забезпечено резервне живлення [4, 5]. Але до тепер у використанні залишається велика кількість провідних каналів зв'язку [6].

Технологія DSL (цифрова абонентська лінія) також використовується для швидкої та безпечної передачі даних. Технологія DSL успішно виконує дистанційне підключення та передачу великих об'ємів даних з можливістю роботи від резервного живлення.

Авторами дослідження [7] технологія DSL розглядається з точки зору співвідношення зони використання, відстані та швидкості. Кожен тип xDSL аналізується та порівнюється зі швидкістю передачі даних, структурою (симетрія, асиметрія) і відстанню передачі. Надано пропозиції щодо того, яка технологія xDSL зручніша для конкретної задачі. Також наведено можливі переваги, які може надати технологія DSL. Зазначено, що технологія DSL може працювати з різними типами інтегрованих програм і ефективність може бути збільшена.

У роботі [8] розглянуто побудову інформаційних систем підвищеної надійності. Показано необхідність використання декількох каналів доступу в Інтернет та перспективу використання ADSL як резервного каналу зв'язку. Запропонований варіант дозволяє використовувати програмне й апаратне резервування.

Авторами роботи [9] аналізується практична реалізація віртуальної приватної мережі (VPN) на основі xDSL. Представлено типи реалізації VPN. Обговорено соціально-економічні переваги використання технології xDSL.

Отже, незважаючи на наявність більш швидкісних технологій xDSL і зважаючи на наявність великої інфраструктури мереж та особливості роботи, xDSL досі залишається актуальною, особливо в якості резервного підключення.

Технології управління каналами передачі цифрових даних

Для того щоб цифровий обмін даними був ефективний, необхідно разом з контролем проводити і управління обміном. В роботі детально розглянуто пересилання даних у каналах зв'язку. Для якісного управління фізичним інтерфейсом передачі даних необхідно ввести рівень логіки, яка називається – управління каналом передачі даних. Щоб краще зрозуміти необхідність в управлінні каналом зв'язку, зупинимось на вимогах і умовах, які є необхідними для отримання ефективного зв'язку між комп'ютерними системами:

- синхронізація кадрів, яка зменшить помилковість;

- управління потоком цифрових даних та каналом зв'язку;
- захист від помилок, причому помилкові біти повинні бути виправлені;
- адресація як необхідна умова оптимальної передачі даних;
- передача сигналів управління і даних повинна здійснюватися по одному каналу зв'язку.

Проста форма управління потоком даних, відома як управління потоком із зупинками, працює наступним чином. Об'єкт джерела передає кадр адресату. Після того як об'єкт призначення приймає цей кадр, він демонструє свою готовність прийняти наступний кадр, для чого надсилає підтвердження приймання отриманого кадру. Перш, ніж джерело передає наступний кадр, необхідно отримати підтвердження приймання попереднього. Відповідно, адресат може зупинити потік даних, просто утримавшись від відправки підтвердження приймання. Така процедура працює надійно і її не можна покращити при передачі даних великими блоками.

Другий варіант управління полягає в тому, що в кожному момент в каналі передачі може знаходитись тільки один кадр. Якщо двійкова довжина каналу зв'язку перевищує довжину кадру, то канал використовується дуже неефективно. Суттєво підвищити ефективність передачі можна, якщо дозволити знаходження в каналі передачі декількох кадрів. Розглянемо як буде працювати дана технологія для двох станцій А і В, зв'язаних між собою дуплексним каналом передачі даних. Розмір буфера станції В складає W кадрів. Інакше В станція може прийняти W кадрів без факту підтвердження, щоб можна було слідувати за тим, як підтверджується отримання кадрів, то останні отримують послідовні номери. Станція В підтверджує приймання кадру, відправляє підтвердження, що містить порядковий номер наступного очікуваного кадру. Це підтвердження також неявно вказує, що станція В готова прийняти наступні W кадрів, починаючи з кадру, що має вказаний номер. Описану систему можна використати і для підтвердження приймання декількох кадрів. Станція В може, наприклад, прийняти кадри 2, 3 і 4, але затримати підтвердження їх приймання до прибуття кадру 4. Повернувши підтвердження з порядковим номером 5, станція В одночасно підтверджує приймання кадрів 2, 3 та 4. Станція А зберігає список порядкових номерів кадрів, які вона може посилати, а станція В зберігає список порядкових номерів, які вона готова прийняти. Кожний із цих списків можна розглядати як вікно кадрів. Така схема називається управлінням потоком методом динамічних вікон.

Даний метод є більш ефективним, ніж попередній. Причина полягає в тому, що при використанні методу динамічних вікон канал передачі даних розглядається як конвеєр, який може перенаповнюватись кадрами, які знаходяться на шляху передачі. Метод із зупинками, навпаки, допускає в кожному момент часу наявність в каналі тільки одного кадру.

Розглянемо технологію виявлення помилок в каналі передачі. Для цього визначимо ймовірності, які відносяться до помилок в кадрах, що передаються у каналі зв'язку, а саме:

P_e – ймовірність виникнення окремого помилкового біта, або інакше швидкість виникнення помилкового біта (Bit Error Rate – BER);

P_1 – ймовірність того, що в отриманому кадрі немає помилки;

P_2 – ймовірність того, що в отриманому кадрі є одна або декілька невиявлених помилок.

Тоді зв'язок між цими ймовірностями для кадру розміром F -бітів можна описати виразом

$$\begin{aligned} P_1 &= (1 - P_e)^F, \\ P_2 &= 1 - P_1, \end{aligned} \quad (1)$$

а це дозволяє сформулювати наступний висновок: при рості ймовірності виникнення помилкового біта зменшується ймовірність того, що кадр прийде без помилки, та із збільшенням розміру кадру ймовірність того, що він прийде без помилки, зменшується.

Проста схема виявлення помилки полягає в додаванні у кінці інформаційного блоку біта парності (рис. 1). Типовий приклад: передавання символів, при якій до кожного семибітового символу IRA додається біт парності. Значення цього біта вибирають таким чином, щоб зага-

льна кількість одиниць у символі була парною (додатна парність) і непарною (від'ємна парність). Тому, наприклад, при передаванні символу G в кодуванні IRA (1110001) і при використанні від'ємної парності передавач додає до блоку і передає вже символ як 11100011. Приймач вивчає отриманий код символу і при непарній кількості одиниць робить висновок про безпомилкову його передачу. Якщо в процесі передавання один біт (або будь-яка непарна кількість бітів) був помилково інвертованим (наприклад 1100001), то приймач виявить цю помилку.Dodatna parність традиційно використовується при синхронній передачі, а від'ємна – при асинхронній передачі.

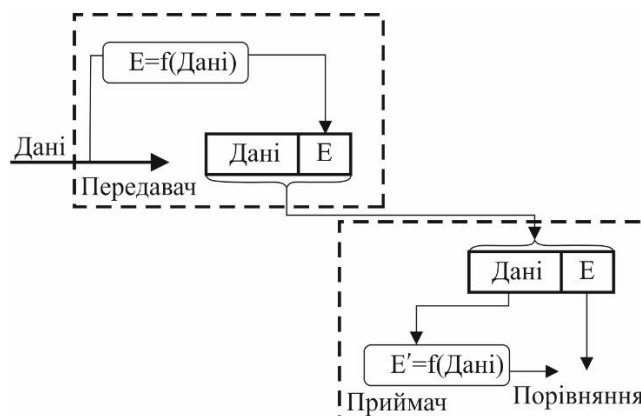


Рис. 1. Структурна схема виявлення помилок
(E, E' – коди виявлення помилок f – функція коду виявлення помилок)

Одним із найбільш розповсюджених і найбільш потужних кодів виявлення помилок є циклічна перевірка парності з надлишковістю (Cyclic Redundancy Check – CRC). Для даного R -бітового інформаційного блоку або повідомлення передавач генерує n -бітову послідовність, яка називається контрольною послідовністю кадру (Frame Check Sequence – FCS). Отриманий в результаті $(R+n)$ – бітовий кадр ділиться без залишку на наперед визначене число i , у випадку відсутності залишку, робить висновок про безпомилкову передачу. Така процедура може здійснюється трьома способами: через арифметичну дію за модулем; дією з поліномами; за допомогою цифрової логіки.

Далі розглянемо механізми захисту від помилок, які з'являються в процесі передавання кадрів. Зокрема, виявлення помилок; позитивне підтвердження для успішно прийнятих, безпомилкових бітів; повторна передача після визначеного часу очікування; від'ємне підтвердження кадрів, в яких були виявлені помилки.

Сукупність таких механізмів утворює автоматичний захист повторної передачі ARQ (Automatic Repeat Request). Стандартизовані версії ARQ передбачають наступні варіанти роботи: 1) запит ARQ із зупинками; 2) запит з поверненням; 3) вибірково-відмовний запит ARQ.

Дуже важливим протоколом управління каналом зв'язку є протокол HDLC (High-level Data Link Control), який підтримує стандарт ISO 3009 [10]. Для того щоб цей протокол міг широко використовуватися, в ньому визначено три типи станцій (головна, підлегла і комбінована); дві конфігурації каналу (несиметрична і симетрична) та три режими передавання даних: 1) нормальний режим, який використовується із несиметричною конфігурацією; 2) асинхронний симетричний режим; 3) режим відгуку, який використовується з несиметричною конфігурацією.

В протоколі HDLC використовується синхронна передача. Вся інформація передається у формі кадрів і є достатньою для передачі всіх типів даних та обміну управляючою інформацією. На рис. 2 подана структура кадру протоколу HDLC. Прапор, адрес і управляючі поля, що додаються до інформаційного поля, називаються заголовком кадру. А поле FSC коду

помилки і прапор, що йде за інформаційним полем, називають контрольною послідовністю кадру. FCS використовується для виявлення помилок і містить залишок від ділення полінома, утвореного вмістом поля даних, на утворюючий поліном CRC-16 і/або CRC-CCITT.

В протоколі HDLC визначено три типи кадрів, кожний з яких має власний формат управляючого поля. Інформаційні кадри переносять дані, які необхідно передати користувачу, а також каскадне підтвердження прийому інформації та захисту від помилок механізмом ARQ. Кадри управління забезпечують реалізацію механізму ARQ, у якого каскадне підтвердження не використовується. Ненумеровані кадри забезпечують додаткові функції управління каналом зв'язку. Перші 1-2 біти управляючого поля визначають тип кадру. Всі формати управляючих полів містять біт запиту-запінання P/F (pol/final). Функціонування протоколу HDLC полягає в обміні I-кадрами, S-кадрами та U-кадрами між двома станціями. Різні види команд і відгуки для цих типів кадрів перераховані в табл. 1.

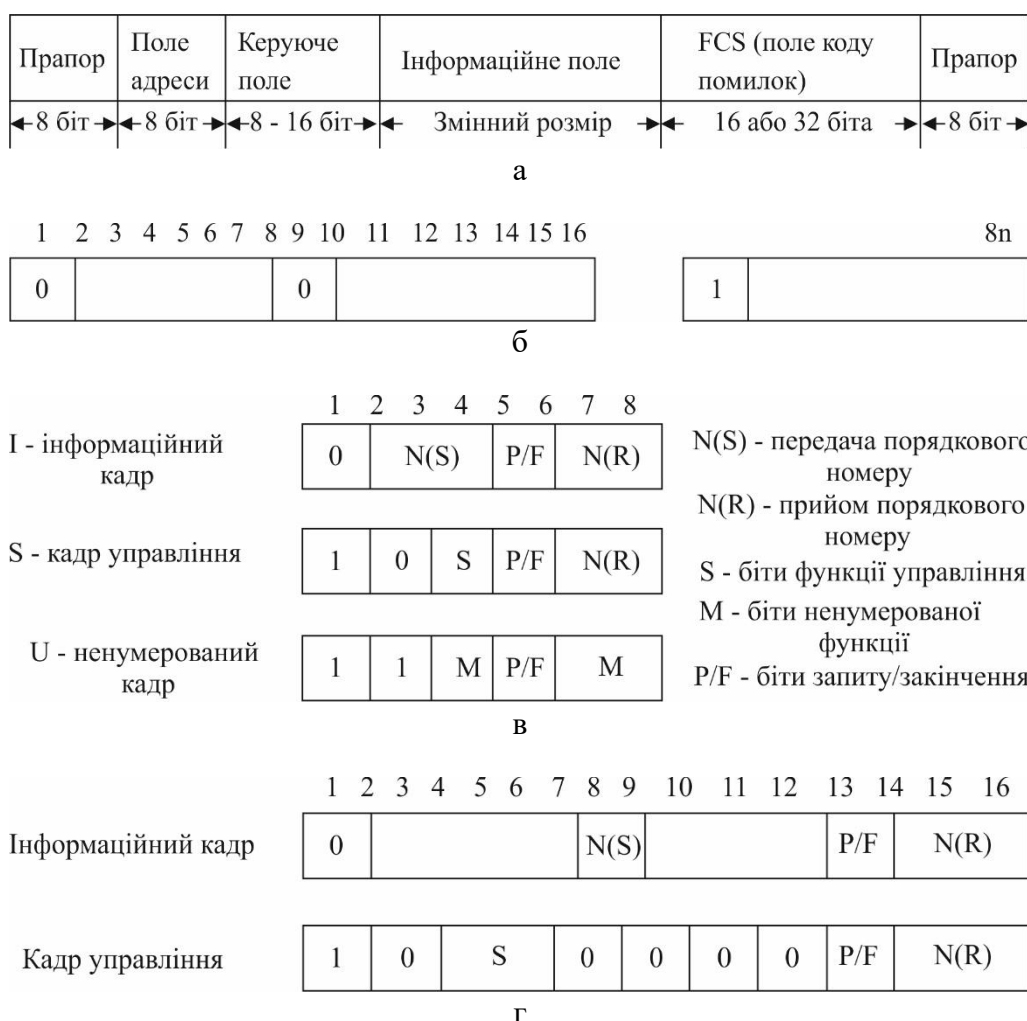


Рис. 2. Структура кадру протоколу HDLC:

а – формат кадру; *б* – розширене поле адреса; *в* – формат управляючого поля із 8 біт;
г – формат управляючого поля із 16 біт

Робота протоколу HDLC проходить в три етапи. Спочатку одна із сторін ініціалізує канал передачі даних, щоб забезпечити впорядкований обмін кадрами. Під час даної фази узгоджуються всі параметри, які будуть використані в процесі передавання. Після ініціаліза-

ції обидві сторони обмінюються даними і управляючою інформацією з метою здійснення управління потоком і захисту від помилок. На завершальному етапі одна із сторін повідомляє про зупинення роботи.

Таблиця 1

Команди і відгуки протоколу HDLC

Номер п/п	Назва	Команда/відгук	Опис
1	Інформаційний кадр I.	К/В	Обмін даними користувачів.
2	Кадр управління S: - готовий до приймання (RR); - не готовий до приймання (RNR); - відмова (REJ); - вибіркова відмова (SREJ).	К/В К/В К/В К/В	Додатне підтвердження; готовність до приймання I – кадру. Додатне підтвердження; неготовність до приймання I – кадру. Від'ємне підтвердження; повернення. Від'ємне підтвердження; вибіркова відмова.
3	Ненумерований кадр (U): - вибір звичайного / розширеного режиму відгуку (SARM/SARME); - вибір звичайного / розширеного асинхронного режиму відгуку (SABM/SABME); - вибір звичайного / розширеного асинхронного збалансованого режиму відгуку (SABM/SABME); - встановлення режиму ініціалізації (SIM)K - розрив з'єднання (DISC); - ненумероване підтвердження (UA); - режим розриву з'єднання (DM); - запит на розрив з'єднання RD) - запит на встановлення режиму ініціалізації (RIM); - ненумерована інформація (UI); - ненумероване очікування (UP); - скидання (RSET); - ідентифікація обміну (XID); - тестування (TEST); - відпилення кадра (FRMR).	К К К К К В В В В К/В К К К/В К/В В	Вибір режиму і розширений – семибітові порядкові номери. Вибір режиму і розширений – семибітові порядкові номери. Вибір режиму і розширений – семибітові порядкові номери. Ініціалізація функцій зв'язку на станції – адресат. Розрив логічного з'єднання. Підтвердження однієї з команд вибору режиму. Станція – адресат знаходиться в режимі розриву з'єднання. Запит на команду DISC. Необхідна ініціалізація; запит на команду SIM. Використовується для обміну управляючої інформації. Використовується для запиту управляючої інформації. Використовується для відновлення; відновлює значення N(R) і N(S). Використовується для запиту/ звіту про стан. Обмін ідентичними інформаційними полями з метою тестування. Звіт про отримання неприйнятого кадру.

Окрім протоколу HDLC, існують й інші протоколи управління каналом передавання даних:

- протокол LAPB (Link Access Procedure, Balanced – збалансована процедура доступу до каналу.) Цей протокол є частиною протоколу HDLC, що забезпечує тільки асинхронний симетричний режим (ABM);

- протокол LAPD (Link Access Procedure D-channel – процедура доступу до каналу D), який забезпечує управління каналом зв'язку через D канал, логічний канал інтерфейсу між користувачем і мережею ISDN;

- протокол LLC (Logical Link Control) – управління логічним каналом і відрізняється форматом кадрів з двома рівнями;

- технологія Frame Relay (ретрансляція кадрів) – це засіб управління каналом передачі даних у високошвидкісній мережі з комутацією пакетів;

- технологія ATM (Asynchronous Transfer Mode – асинхронний режим передачі) – засіб передачі даних по високошвидкісній мережі, базується не на протоколі HDLC, а на певному форматі кадра у вигляді комірки, що мінімізує обробку даних.

Для ефективного використання високошвидкісних ліній зв'язку застосовується ущільнення, яке дозволяє декільком передавальним джерелам використовувати більшу пропускну здатність каналу. Може використовуватися дві форми управління: 1) з частотним розділенням каналів; 2) з часовим розділенням каналів.

Управління з частотним розділенням каналів можна використовувати для аналогових сигналів. Кожний із групи сигналів виділяється певна смуга частот, і всі ці сигнали одночасно передаються через одне і теж середовище. Для об'єднання сигналів в необхідну смугу частот використовуються модулюючі пристрої, а для об'єднання отриманих сигналів різної частоти використовують ущільнюючі – мультиплексори. Система з частотним ущільненням подана на рис. 3.

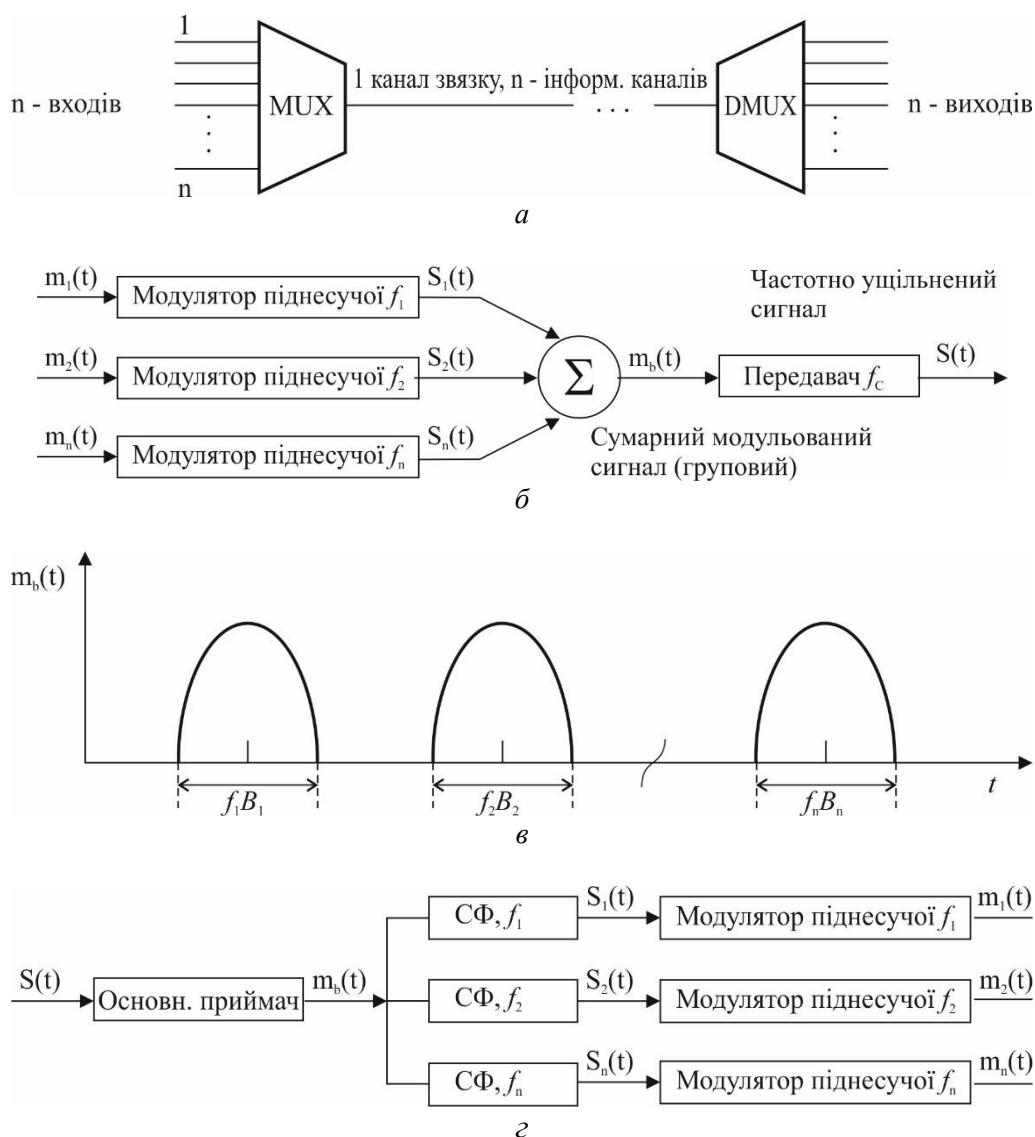


Рис. 3. Система передачі з частотним ущільненням:
а – пристрій ущільнення; б – передавач; в – спектр групового сигналу; з – приймач

Синхронне управління з часовим розділенням використовується з цифровими і з аналоговими сигналами, які переносять цифрові дані. При такому ущільненні дані від різних джерел передаються у вигляді періодично повторюваних кадрів. Кожний такий кадр складається

з набору часових інтервалів, а кожному джерелу виділяється один або декілька інтервалів в кадрі. Результатом такого ущільнення є чергування інформаційних бітів від різних джерел. Чергування може бути побітовим або ж можуть чергуватись цілі блоки. Система синхронного ущільнення з частотним розділенням наведена на рис. 4.

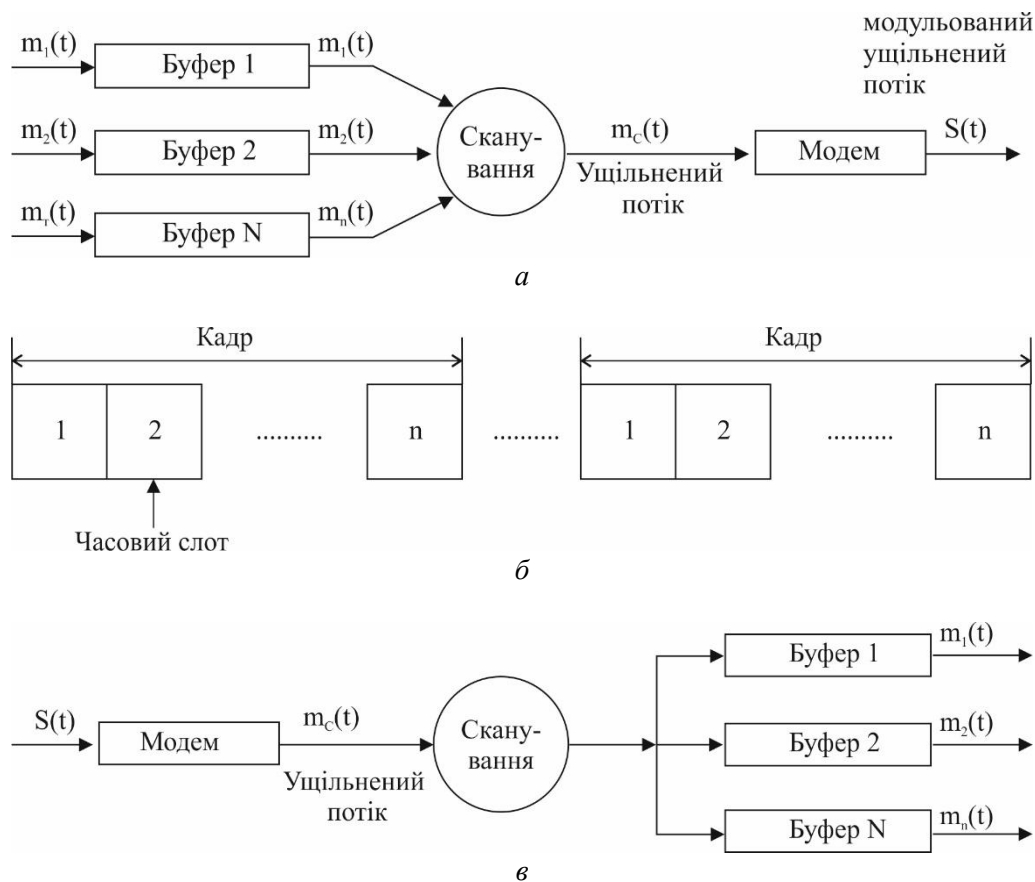


Рис. 4. Система передачі із синхронним часовим ущільненням:
а – передавач; б – кадри ТДМ; в – приймач

Статистичне ущільнення з часовим розділенням є більш ефективним засобом підтримки термінального обладнання, ніж синхронні TDM. При статистичному TDM розподіл часових інтервалів за джерелами інформації вже не виконується попередньо. Замість цього дані користувача заносяться в буфер і передаються у разі появи доступних часових інтервалів. Якщо статистичний і синхронний мультиплексори використовують канали з однаковими швидкостями передачі даних, то статистичний мультиплексор може забезпечити підтримку більшої кількості пристроїв.

В реалізації високошвидкісних глобальних цифрових мереж більша частина каналу знаходиться між абонентом і мережею, яку називають цифровою абонентською лінією. Сучасна технологія ADSL є однією із модемних технологій, розроблених спеціально для високошвидкісної передачі інформації за звичайними телефонними лініями.

Асиметрична лінія ADSL має високу пропускну здатність в напрямку основного інформаційного потоку, ніж у зворотному напрямку. В ADSL по-іншому застосовується ущільнення із частотним розділенням, що дозволяє підняти пропускну здатність витієї пари до 1 МГц. Технологія ADSL включає в себе три елементи, показані на рис. 5:

- резервування самих низьких частот до 25 Гц для передачі мови – POTS (Plain Old Telephone Service – проста телефонна мережа). Мова передається в смузі частот 0 - 4 кГц, а решта смуги використовується для запобігання перехресних завад між каналами;
- використання ехоподавлення або частотного ущільнення для виділення двох смуг;

- використання частотного ущільнення в обох інформаційних смугах. В цьому випадку єдиний потік бітів розчеплюється на паралельні потоки, кожен з яких передається в окремій смузі.

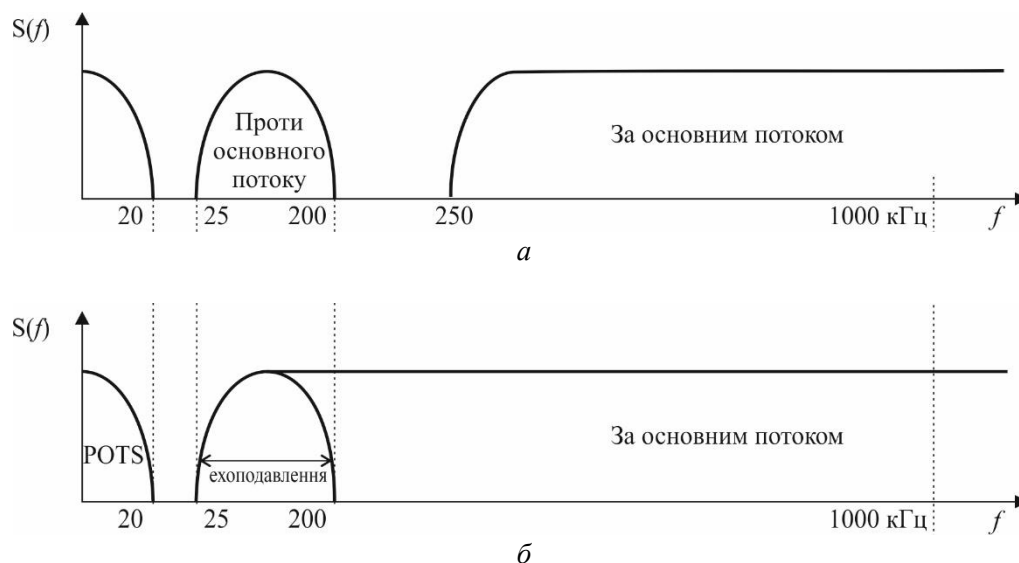


Рис. 5. Конфігурація каналу лінії ADSL:
а – ущільнення з частотним розділенням; б – ехоподавлення

Технологія дискретної багатоканальної посилки (DMT – Discrete Multi Tone) використовує декілька несійних сигналів на різних частотах, передаючи деякі біти за ехо-каналами. DMT-технологія передбачає перетворення двійкового послідовного потоку в паралельний (рис. 6).

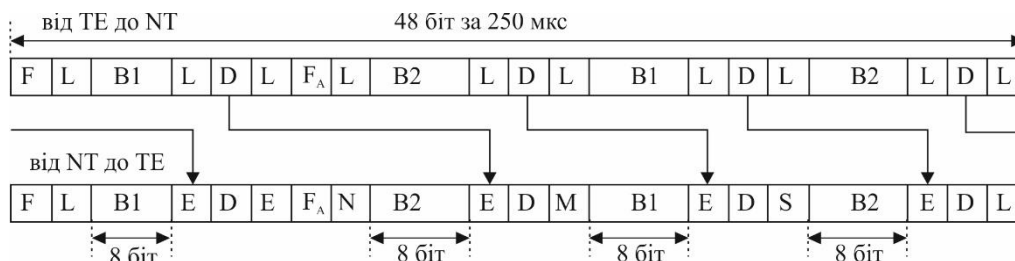


Рис. 6. Структура кадру номінального доступу до ISDN:
F – біт кадрівання; L – біт компенсації; E – ехо-біт D – каналу; A – біт активації;
FA – допоміжний біт кадрівання; N – значення протилежне FA; M – багатоканальний біт;
B1 – біти B-каналу (16 на кадр); B2 – біти B-каналу (16 на кадр);
D – біти D-каналу (4 на кадр); S – резервні біти; E – біт розділення конфлікту

Схеми ADSL/DMT – технології, що використовують 256 каналів передачі за напрямом основного потоку. Теоретично, якщо у кожному чотиригерцовому підканалі буде вестись передача із швидкістю 60 кбіт/с, то загальна швидкість передачі вже може досягти величини $60 \times 256 = 15,36$ Мбіт/с. Міжканальні спотворення і завади дещо знижують таку швидкість, яка складає 9 Мбіт/с.

Схеми високошвидкісної цифрової передачі даних на основі xDSL

Схема xDSL – це одна із схем, що визначає високошвидкісну цифрову передачу по абонентській лінії. В табл. 2 узагальнюються і порівнюються схеми, які мають загальну назву xDSL: ADSL, HDSL (High Data Rate DSL – високошвидкісна цифрова абонентська лінія),

SDSL (Single Line DSL – одно канална цифрова абонентська лінія), VDSL (Very High Data Rate DSL – супервисокошвидкісна цифрова абонентська лінія).

Таблиця 2

Порівняння параметрів технологій xDSL

Номер п/п	Вид технологій xDSL			
	ADSL	HDSL	SDSL	VDSL
1. R біт/с	1,5 – 9 Мбіт/с (за напрямом потоку) 10 – 640 кбіт/с (проти потоку)	1,544 або 2,048 Мбіт/с	1,544 або 2,048 Мбіт/с	13 – 52 Мбіт/с (за напрямом потоку) 1,5 – 2,3 Мбіт/с (проти потоку)
2. Режим	Асиметричний	Симетричний	Симетричний	Асиметричний
3. Кількість мідних провідників	1	2	1	1
4. Діапазон (довжина) витой пари	3,7 – 5,5 км	3,7 км	3,0 км	1,4 км
5. Передача сигналів	Аналогова	Цифрова	Цифрова	Аналогова
6. Кодіровка каналу зв'язку	CAP/DMT	2B/Q	2B/Q	DMT
7. Частота	1 – 5 МГц	196 кГц	196 кГц	10 МГц
8. Біт/цикл	змінна	4	4	змінна

Технологія xDSL пропонує окремі смуги частот для різних послуг (рис. 5). Цей розподіл виглядає наступним чином: POTS: 0-4 кГц; ISDN: 4-80 кГц; проти основного потоку 300 – 700 кГц; за основним потоком 1МГц і вище.

Технологія ISDN дозволяє ущільнити трафік від кількох пристроїв користувача, підключених однієї лінії, в цифрову мережу з інтеграцією послуг. Можуть використовуватися два інтерфейси: номінальний і базовий.

Структура номінального доступу складається з двох В-каналів на 64 кбіт/с і одного каналу на 16 кбіт/с. Ці канали, які підтримують навантаження в 144 кбіт/с, ущільнюються в інтерфейсі між користувачем і мережею на швидкості 192 кбіт/с. Залишок пропускної спроможності використовується для різних задач синхронізації та керування. Передача при номінальному режимі доступу розбивається на періодично повторювані кадри фіксованого розміру. В даному випадку розмір кадру є рівним 48 біт, і при швидкості передачі 192 кбіт/с кадри повинні повторюватися із швидкістю 1 кадр в 250 мкс. Структура кадру приведена на рис. 6, верхній кадр передається термінальним обладнанням (Terminal Equipment – TE) абонента в мережу (network – NT); нижній кадр передається в зворотному напрямку.

Другий базовий інтерфейс, як і номінальний інтерфейс, працює з ущільненням багатьох каналів в єдиному середовищі передачі. У випадку базового інтерфейсу дозволяється виключно двоточкова конфігурація. Як правило, даний інтерфейс підтримує відомчі або внутрішні телефонні мережі. Для базового інтерфейсу визначені дві швидкості передавання даних 1,544 і 2,048 Мбіт/с. Формат кадру базового доступу до ISDN приведений на рис 7.

Вимірювання параметрів швидкісних систем передачі цифрових даних

Із аналізу видно, що достовірне вимірювання параметрів швидкісних систем передачі цифрових даних, є актуальною задачею.

Для вимірювання параметрів швидкісних цифрових систем пропонується метод комп'ютерного вимірювання, оснований на модульному принципі. На такому принципі побудований, наприклад, універсальний модульний аналізатор мереж доступу типу SunSet MTT [11].

Модульна універсальна портативна платформа SunSet MTT із набором вимірювальних модулів, призначених для: проведення вимірювань в процесі інсталяції систем, вимірювання параметрів, технічного обслуговування та пошуку несправностей в мережах доступу, на

лініях xDSL, волоконно-оптичних систем зв'язку, а також в транспортних цифрових мережах EI, мережах передачі даних, Gigabit Ethernet. Понад тридцять вимірювальних методів можуть задовольнити всі потреби як операторів, так і проведення досліджень у мережах. Всі ці методи встановлюються в базову комп'ютерну вимірювальну систему SunSet MTT, яка забезпечує весь комплекс вимірювань.

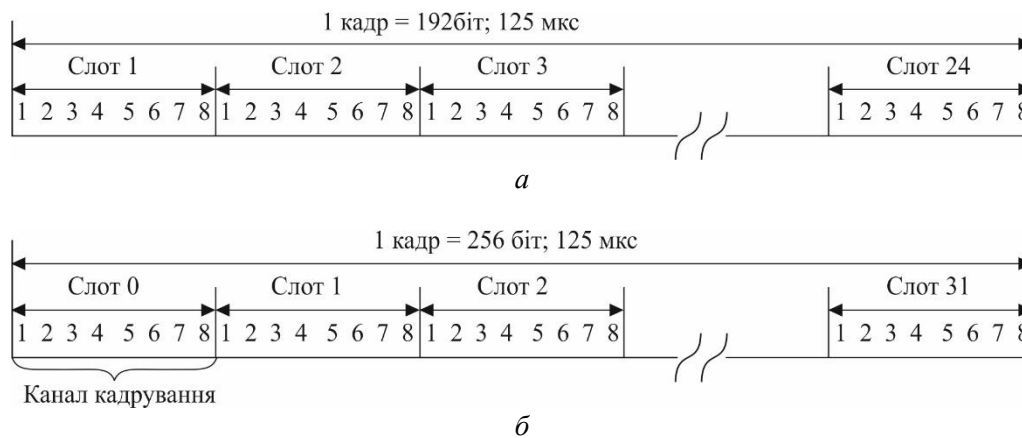


Рис. 7. Структура кадру базового доступу до ISDN:
а – на швидкості 1,54 Мбіт/с; б – на швидкості 2,048 Мбіт/с

Дана система забезпечує: тестування середовища передачі цифрової абонентської лінії xDSL: ADSL, GSHDSL, IDSL, SDSL, VDSL; тестування послуг доступу до Інтернету: ATM BERT, IP, IP PING, вимірювання пропускної здатності ATM і IP; тестування регіональних мереж Ethernet, Gigabit Ethernet, Fibre Channel; тестування мереж PDH/SDH; вимірювання параметрів та діагностика в оптичних мережах: оптичний рефлектометр, тестування оптичних каналів, вимірювання оптичних параметрів; тестування мереж доступу: мережі передачі даних, DDS, EI, ISDN, ретрансляція кадрів; вимірювання і оцінка параметрів витієї пари, зокрема, аналіз спектральної густини потужності (PSD) шуму, широкосмугового вимірювання рівня, вимірювання асиметрії в кабелі, відношення сигнал/шум, перехідних завад, режим цифрового мультиметра (DMM), рефлектометра (TDR).

Висновки

Проаналізовано технології управління каналом передачі цифрових даних з ущільненням з використанням швидкісних ліній передачі типу xDSL та приведена методологія вимірювання їх параметрів, що базується на модульному принципі з застосуванням універсальних модульних аналізаторів мереж. Показано, що на основі технології xDSL можна будувати високошвидкісні мережі передачі даних, перевагою яких є використання наявної інфраструктури та можливість роботи від резервного живлення що дозволяє будувати мережі підвищеної надійності. Все це робить xDSL технологію актуальною, особливо в якості резервного каналу доступу до Інтернету.

Список літератури:

1. L. Gilli, G. Cossu, E. Ciaramella. New Prospects of Optical Wireless Communication Systems Exploiting VCSEL-Based Transmitters // Journal of Lightwave Technology. 2025. Vol.43, no.4. P. 1615–1624. <https://doi.org/10.1109/JLT.2025.3530819>
2. Ahmed Al-Kinani, Cheng-Xiang Wang, Li Zhou, Wensheng Zhang Optical Wireless Communication Channel Measurements and Models // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20, I. 3. P. 1939–1962. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2838096>
3. Безрук В.М., Бідний Ю.М., Колтун Ю.М., Астраханцев А.А., Свид І.В., Ширяев А.В., Харченко Н.А. Інформаційні мережі зв'язку. Ч. 2. Телекомунікаційні технології стаціонарних мереж зв'язку: навч. посіб. Харків : ХНУРЕ, 2011. 492 с.

4. Ситников В. Д., Колесник І. С., Черняк О. І. Комп'ютерна мережа із застосуванням оптичної лінії зв'язку із автономним живленням // Матеріали ЛІІІ наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ, Вінниця, 20–22 березня 2024 р. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2024/paper/view/19714>.
5. Romanov O. I., Svyd I. V., Korniienko N. I., Romanov A. O. Optical Network Management by ONOS-Based SDN Controller // Radiotekhnika. № 210. P. 188–196, верес. 2022. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.3.210.16>
6. Singh S.V., Khursheed A., Alam Z. Wired Communication Technologies and Networks for Smart Grid-A Review // Studies in Computational Intelligence. 2022. Vol 1007. P. 183–195. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8012-0_15
7. Esra Söğüt, Saadin Oyucu, O. Ayhan Erdem, Hüseyin POLAT Recommendations for xDSL Technologies and Applications // ICENS International Conference on Engineering and Natural Science, 3-7 May 2017, Budapest, Hungary <https://www.researchgate.net/publication/333561999>
8. Octávio Pereira, Paulo Neves, Ricardo Mostardinha, Eduardo Valente, Vasco Soares, Paulo Alves, Fernando Silva, Hélder Coutinho. A Network Project Case Study Leveraging xDSL Technology // IADIS International Conference Applied Computing 2007. P. 781–783.
9. О.І. Чумаченко, В.В. Цілицький, М.О. Білий Побудова інформаційної системи підвищеної надійності одного класу // Електроніка та системи управління. 2011. №4(30). С. 127–134.
10. ISO 3009:2003. ISO. <https://www.iso.org/standard/37415.html>
11. Методика вимірювань параметрів телекомунікаційних мереж. Офіційний вебпортал парламенту України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0582-21>

Надійшла до редколегії 06.06.2025

Відомості про авторів:

Довгий Віктор Володимирович – канд. техн. наук, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Україна; e-mail: viktor.dovhyi@pnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7158-6938>

Грига Володимир Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Україна; e-mail: volodymyr.gryga@pnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5458-525X>

Дзундза Богдан Степанович – д-р техн. наук, с.н.с., Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Україна; e-mail: bohdan.dzundza@pnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6657-5347>

Свид Ірина Вікторівна – канд. техн. наук, доцент, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки; Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, доцент кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки, Україна; e-mail: iryna.svyd@pnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4635-6542>

Терлецький Андрій Іванович – канд. фіз.-мат. наук, доцент, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Україна; e-mail: andrii.terletskyi@pnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1667-3467>

Павлюк Мирослав Федорович – канд. фіз.-мат. наук, доцент, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Україна; e-mail: myroslav.pavlyuk@pnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5663-2918>