

## ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК МЕРЕЖ АБОНЕНТСЬКОГО ДОСТУПУ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ СТРУКТУРИ ТА ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ СТЕКУ ПРОТОКОЛІВ ТЕХНОЛОГІЇ xDSL

### Постановка задачі

Аналіз та оцінка параметрів xDSL систем на фізичному рівні займає важливе місце в процесі оцінки характеристик мережі абонентського доступу (МАД) в цілому та її пропускної спроможності. Але така оцінка не враховує структуру елементів стеку протоколів системи, крім того, сама структура фізичного рівня розбивається на окремі підрівні: PMD (Physical Media Dependence), PMS-TC (Physical Media Specific-Transmission Convergence), TPS-TC (Transport Protocol Specific-Transmission Convergence), кожному з яких характерна своя специфіка функцій, що вони виконують. На рівні PMD здійснюється оцінка пропускної спроможності xDSL систем в залежності від характеристик абонентської лінії. Таку оцінку можна провести за допомогою програмного імітатора «xDSL Simulator». Але при цьому не враховуються параметри формування кадру рівня PMS-TC. Таким чином, багаторівнева еталонна модель систем xDSL, що розробляється, охоплює рівні, що зображені на рис. 1, кожен з яких вносить свій вплив на формування кадру корисного навантаження, в процесі передачі даних між пристроями xTUR – xTUC, та оцінку пропускної спроможності на рівні TCP/IP. В процесі побудови багаторівневої еталонної моделі визначено основні параметри, що впливають на формування та передачу даних окремо по кожному рівню, що входить до складу моделі. В еталонній моделі стеку протоколів передачі в площині користувача, що зображена на рис. 1, представлена точка зору, що сумісна з попередніми моделями xDSL [2].

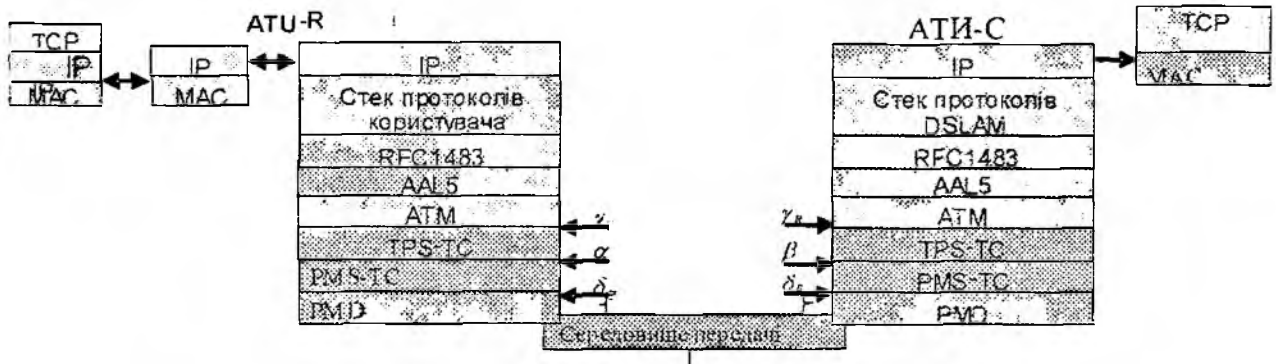


Рис. 1

### Характеристика рівня PMD

Рівень PMD – рівень, що залежить від середовища передачі і характеризується модуляційними характеристиками та параметрами лінії передачі. Оцінка пропускної спроможності рівня PMD у низхідному напрямі здійснюється за допомогою діаграми потоку базової моделі з двома точками, що зображена на рис. 1. Оцінка висхідного напрямку здійснюється по тій же діаграмі, тільки модель, що вносить втрати, переміщується на сторону лінійного закінчення LT.

Моделі перехідних завад враховують той факт, що передача погіршується внаслідок дії окремих джерел перехідних завад, що зосереджені вздовж абонентської лінії.

Базова модель для накопичення перехідних завад (рис. 2) придатна для представлення групи спотворювачів, що розміщені на станційній стороні, у вигляді одиничного еквівалентного джерела, що чинить подібний негативний вплив на модем.

Модель накопичення обчислює статичний розподіл перехідних завад. На вході моделі здійснюється накопичення джерел спотворення з рівнями  $P_{d1} \dots P_{dn}$ , на виході блок оцінює еквівалентний рівень перехідних завад  $P_{d_{eq}}$ .



Значення  $K_{x1}$  та  $K_{x2}$  залежать від кабелю і визначаються для кожного сценарію, що досліджується. Загальновживані значення (в дБ) без зазначення кабелю чи регіону [1]:  $K_{x1 \text{ дБ}} = -50 \text{ дБ}$  і  $K_{x2 \text{ дБ}} = -45 \text{ дБ}$ , для  $f_0 = 1 \text{ МГц}$  та  $L_0 = 1 \text{ км}$ .

Коли повний опір модему, що досліджується, змінюється, то шум (сигнал), що спостерігається на прийомній стороні, також змінюється. Для обчислення цього ефекту в топологію моделі включається блок перехідних завад. Передаточна функція блоку перехідних завад, що вносяться  $H_v$ , залежить від частоти та повного опору. Вираз 5 ілюструє, як дана передаточна функція використовується для оцінки рівня потужності шуму на прийомі  $P_{RN}$ , відносно рівня перехідних завад  $P_{VN}$ :

$$P_{RN} = P_{VN} \times |H_v|^2, \quad (5)$$

де  $H_v$  – передаточна функція абонентської лінії [1];

$$H_v(f, Z_{LV}) = \left( \frac{1/Z_{cal} + 1/Z_{mi} + 1/R_l}{1/Z_{LV} + 1/Z_{mi} + 1/R_l} \right), \quad (6)$$

де  $R_l$  – вихідний опір приймача-передавача;  $Z_{LV}$  – комплексний опір на кінці лінії;  $Z_{cal}$  – комплексний опір калібрування для оцінки пропускної спроможності;  $Z_{mi}$  – комплексний опір, що вноситься.

Рівень потужності перехідних завад  $P_{VN}$  відповідає сумі індивідуальних чинників, відповідно для станційної NT (Network Termination) та лінійної LT (Line Termination) сторони:

$$P_{LV \text{ NT}} = P_{d \text{ eq NT}} \times |H_{ncvt}|^2 + P_{d \text{ eq LT}} \times |H_{jcvl}|^2 + P_{bn \text{ NT}}, \quad (7)$$

$$P_{LV \text{ LT}} = P_{d \text{ eq LT}} \times |H_{ncvt}|^2 + P_{d \text{ eq NT}} \times |H_{jcvl}|^2 + P_{bn \text{ LT}}. \quad (8)$$

З врахуванням вищезгаданих параметрів здійснюється оцінка ефективного співвідношення ССШ. Для спрощення аналізу параметрів пропускної спроможності, таких як величина запасу по шуму та величина запасу сигналу, ефективне значення ССШ можна виразити у відносному форматі за допомогою додаткового параметру  $m$ . При зростанні параметру  $m$  зростає рівень зовнішнього шуму (при обчисленні межі запасу шуму) і навпаки – падає рівень сигналу (при обчисленні межі запасу сигналу). У випадку, коли  $m = 1$  (що еквівалентно нулю дБ), відносне ефективне значення ССШ рівне абсолютному значенню ССШ.

Модель першого порядку є спрощеною і враховує, що ССШ сигналу на вході змінюється всередині приймача під впливом його внутрішнього шуму  $P_{RN0}$ . Вважається, що більшість недосконалостей приймача (шум на аналоговому закінченні, шум квантування та недосконалість детектування) концентруються в одне віртуальне джерело шуму  $P_{RN0}$ . На рис. 3 зображено діаграму передачі приймач-передавач xDSL, що включає елементи моделі входу першого порядку для оцінки ефективного значення ССШ і те, як вони об'єднуються в загальну модель для визначення продуктивності приймача.

В рівняннях (9) – (11) виражено абсолютні та відносні значення оцінки ефективного ССШ для вищезгаданої моделі.

Абсолютне значення

$$SNR(f) = \frac{P_{RN}(f)}{P_{RN}(f) + P_{RN0}(f)}. \quad (9)$$

де  $P_{RN}$  – потужність прийнятого сигналу;  $P_{RN}$  – потужність шуму на прийомі;  $P_{RN0}$  – власний шум приймача.

Відносне значення за шумом:

$$SNR_{obs}(m, f) = \frac{P_{RS}(f)}{(P_{RN}(f) \times m) + P_{RNO}(f)} \quad (10)$$

Відносне значення за сигналом

$$SNR(f) = \frac{P_{RS}(f)/m}{P_{RN}(f) + P_{RNO}(f)} \quad (11)$$

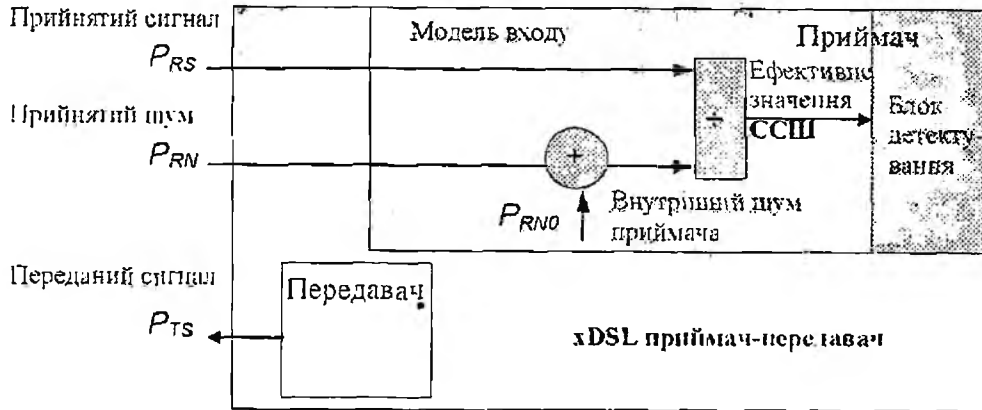


Рис 3

Обчислення швидкості даних в лінії при запасі завадостійкості  $m$  з використанням відносної моделі детектування на основі формули Шенона зводиться до обчислення виразу

$$f_b = \int_{f_c - B/2}^{f_c + B/2} \log_2 \left( 1 + \frac{SNR_{obs}(m, f)}{\Gamma} \right) \times df, \quad (12)$$

де  $f_b$  – лінійна швидкість, зазвичай швидкість передачі даних, плюс швидкість заголовків коригування помилок, заголовків сигналізації та формування кадру,  $B$  – смуга пропускання, що характеризує частотний діапазон, що придатний для передачі даних,  $\Gamma$  – межа співвідношення сигнал/шум, параметр продуктивності, що показує, як близько детектування наближається до теоретичної межі Шенона відповідно у формі відносного та абсолютного значень

$$\Gamma = \Gamma_{MOD} / \Gamma_{coding} \times \Gamma_{impl}, \quad (13)$$

$$\Gamma_{dB} = \Gamma_{MOD\_dB} - \Gamma_{coding\_dB} + \Gamma_{impl\_dB}. \quad (14)$$

де  $\Gamma_{MOD}$  – теоретична межа модуляції,  $\Gamma_{coding}$  – теоретичний виграш від кодування,  $\Gamma_{impl}$  – імперичні втрати застосування (ехокомпенсація, реалізація аналогового закінчення, еквалайзинг)

Межа ССШ  $\Gamma$  і необхідне ССШ  $SNR_{req}$  – еквівалентні параметри і значення одного із них, може бути виражене через значення іншого

$$\Gamma = SNR_{req} / (2^{2^b} - 1). \quad (15)$$

Перевага використання величини  $\Gamma$  над  $SNR_{req}$  полягає в тому, що дана величина має подібне значення для всіх теоретичних моделей в частотному домені (CAP (Carrierless amplitude/phase modulation), DMT (Discrete Multitone)).

Формула (12) є загальною для xDSL систем і для кожної з них визначається в залежності від структури функції передачі специфічного фізичного середовища PMS-TC. Зокрема для технології DMT загальна модель детектування для досягнення швидкості передачі даних в лінії  $f_{bd}$  із забезпеченням запасу  $m$  визначається як

$$f_{bd} = f_{sd} \times b = f_{sd} \times \sum_{k \in \text{канал}} load(b_k), \quad (16)$$

де  $f_{sd}$  – символна швидкість даних в лінії при передачі корисного навантаження без врахування заголовку кадру,  $f_{sd} = 4000$  символів/с,  $b$  – кількість біт на символ даних, що розподілені між всіма піднесучими,  $k$  – кількість піднесучих або її порядковий номер, для ADSL

$k \in [7:255]$ , для ADSL2+  $k \in [7:512]$ ;  $load$  – функція, що визначає алгоритм завантаження біт;  $b_k$  – кількість біт на піднесучу.

З врахуванням формули (12):

$$b_k = \log_2 \left( 1 + \frac{SNR_{ofk}(m, f_k)}{\Gamma} \right), \quad (17)$$

де  $f_k$  – центральна частота піднесучої;  $b_{min} \leq b_k \leq b_{max}$  – відповідно мінімальна і максимальна кількість біт на піднесучу;

$$f_k = k \times \Delta f, \quad (18)$$

де  $\Delta f$  – ширина смуги частот піднесучої, 4,3125 кГц;

$$f_h = f_{hd} + f_{hs} \quad (19)$$

З врахуванням структури DMT кадру:

$$f_h = 69/68 \times f_{hd} \quad (20)$$

З врахуванням формули (16), швидкість даних в лінії:

$$f_h = 69/68 \times 4000 \sum_{k \in [1:m]} load(b_k). \quad (21)$$

### Характеристика рівня PMS-TC

Формування кадру DMT на рівні PMS-TC здійснюється згідно з блок-діаграмою функції передачі PMS-TC, що зображена на рис. 4, з врахуванням максимально досяжної лінійної швидкості при заданому запасі завадостійкості  $m$ .

В табл. 1 проілюстровано термінологію швидкості даних та визначення, що використовуються відносно різних контрольних точок, що показані по відношенню до таких же контрольних точок в еталонній моделі на рис. 1 та блок-діаграмі PMS-TC (рис. 4).

Таблиця 1

Швидкість даних	Рівняння (кбіт/с)	Контрольна точка
Швидкість даних в мережі	$\sum Net_{p,act}$	$\alpha, \beta$
Сумарна швидкість даних = Швидкість даних в мережі + Швидкість заголовка кадру	$\sum (Net_{p,act} + OR_p)$	$A$
Загальна швидкість даних = Сумарна швидкість даних + Швидкість кодування заголовку Ріда-Соломона	$(\sum L_p) \times 4$	$B, C, \delta$
Лінійна швидкість = Загальна швидкість даних – Швидкість заголовку Треліс кодування	$(\sum b_k) \times 4$	$U$

В середині функції передачі PMS-TC (рис. 4) зображено функції, що підтримують носії кадрів  $N_{pc}$  ( $1 \leq N_{pc} \leq 4$ ), що є примітивами функції TPS-TC, та від однієї до чотирьох функцій каналів з часом затримки, що приймають на вході один або більше носіїв кадрів або жодного. В середині кожної функції каналу із затримкою є три контрольні точки, що позначені як  $A, B$  і  $C$ . Вихідні сигнали кожної функції каналу з часом затримки в контрольній точці  $C$  об'єднують додатковою функцією мультиплексування для формування бітів PMD. Сигнали керування на вході кодують в загальний канал заголовку один октет, що пов'язаний з кожною функцією каналу із затримкою. В контрольній точці  $A$  ці октети синхронізації об'єднуються з даними носія кадрів в середині функції каналу із затримкою.

Число октетів на кадр даних, що мультиплексується (MDF) в функції каналу із затримкою  $N_p$ , визначається як:

$$K_p = \sum_{n=0}^{N_{pc}-1} B_{p,n} + 1. \quad (22)$$

де  $B_{p,n}$  – відношення номінального числа октетів носія кадрів №  $n$  до кадру даних, що мультимуплексується в контрольній точці А функції каналу із затримкою №  $p$ ,  $N_{BC}$  – число можливих носіїв кадрів та функцій TPS-TC

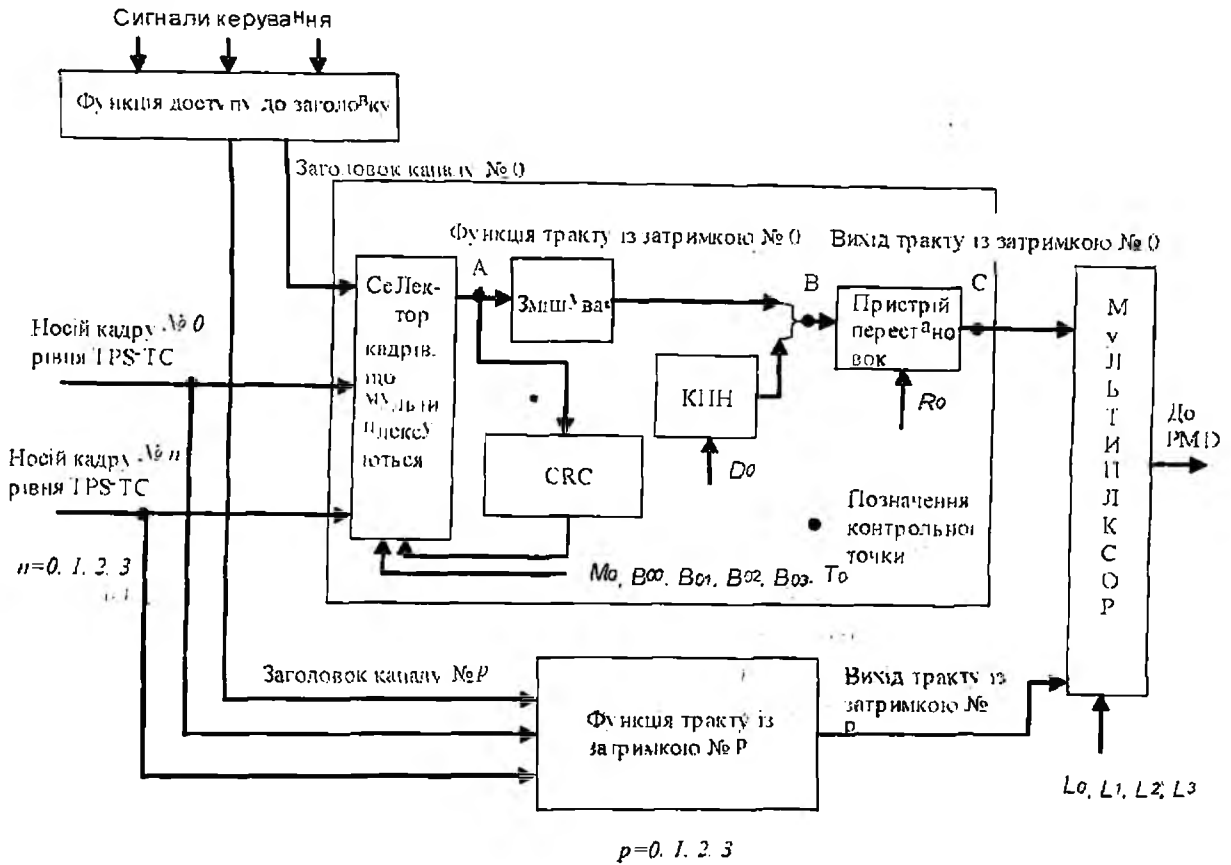


Рис 4

Число октетів на кадр даних КПН та кадр даних перестановок коригування помилок на випередження (КПН) в функції каналу із затримкою №  $p$ .

$$N_{FEC, p} = M_p \times K_p + R_p, \quad (23)$$

де  $M_p$  – число кадрів даних, що мультимуплексується в кадр даних КПН (коригування помилок на випередження) в функції каналу із затримкою №  $p$ ;  $R_p$  – число надмірних октетів на одне кодове слово Ріда – Соломона в функції каналу із затримкою №  $p$

Число DMT символів, на які поширюється кадр даних КПН, визначається як

$$S_p = \frac{8 \times N_{FEC, p}}{L_p}, \quad (24)$$

де  $L_p$  – число біт функції каналу із затримкою №  $p$ , що приходяться на один символ DMT

Для досягнення високих швидкостей передачі параметр  $S_p$  може бути нецілою величиною Швидкість даних мережі носія кадрів №  $n$  функції каналу із затримкою №  $p$  визначається як

$$Net_{act, p, n} = \frac{B_{p, n} \times M_p}{S_p} \times 32 \text{ кбіт/с} = \frac{B_{p, n} \times M_p \times L_p}{K_p \times M_p + R_p} \times 4 \text{ кбіт/с} \quad (25)$$

Швидкість даних мережі функції каналу із затримкою №  $p$

$$Net_{p, net} = \frac{(K_p - 1) \times M_p}{S_p} \times 32 \text{ кбіт/с} = \frac{(K_p - 1) \times M_p \times L_p}{K_p \times M_p + R_p} \times 4 \text{ кбіт/с} \quad (26)$$

Швидкість заголовку каналу із затримкою №  $p$  визначається як

$$OR_p = \frac{M_p}{T_p \times S_p} \times 32 \text{ кбіт/с} = \frac{M_p \times L_p}{T_p \times (K_p \times M_p + R_p)} \times 4 \text{ кбіт/с}. \quad (27)$$

Захист від імпульсного шуму в числі символів DMT визначається як

$$INP_p = \left(\frac{1}{2}\right) \times (S \times D) \times \left(\frac{R}{N_{DMT}}\right), \quad (28)$$

де  $D$  – глибина перестановок в кодовому слові Ріда – Соломона.

Дана специфіка формування кадру на рівні PMS-TC системи ADSL є загальною для рівня даних на базі ATM (Asynchronous Transfer Mode), STM (Synchronous Transfer Mode), EFM (Ethernet First Mile).

### Оцінка ймовірності помилки в кодовому слові та пропускної спроможності на рівні TCP

В процесі оцінки пропускної спроможності на рівні TCP береться до уваги в першу чергу пропускна спроможність на фізичному рівні системи ADSL, а також збитковість, що вноситься верхніми рівнями етатонної моделі. Таким чином, ефективність фізичного рівня в загальному випадку можна визначити за формулою

$$\eta_{ADSL} = \frac{K}{N}, \quad (29)$$

де  $K$  – кількість байтів даних в ADSL кадрі,  $N$  – загальна кількість байтів даних в кадрі.

Величину  $K$  можна визначити за формулою

$$K = N - h - \frac{R}{S}, \quad (30)$$

де  $h$  – кількість октетів заголовку кадру ADSL,  $R$  – кількість перевірочних октетів КПН,  $S$  – кількість DMT кадрів на кодове слово Ріда – Соломона.

З врахуванням того, що через кожні 68 DMT кадрів передається кадр синхронізації, та формул (21) та (30) маємо

$$N = \frac{68}{69} \times \frac{1}{4000} \times \mu = \alpha \times \mu, \quad (31)$$

де  $\mu$  – швидкість передачі в лінії;

$$\eta_{ADSL} = 1 - \frac{h + R/S}{\alpha \times \mu}. \quad (32)$$

При використанні кодування Ріда – Соломона, ймовірність помилки в кодовому слові [3, 4]:

$$q = P_{кс} = \binom{n}{l+1} P_{бит}^{l+1} (1 - P_{бит})^{n-(l+1)}, \quad (33)$$

де  $n$  – розмір кодового слова в байтах;  $P_{бит}$  – ймовірність спотворення байту;  $l$  – коригуюча здатність коду Ріда-Соломона в байтах;

$$l = \frac{R}{2}. \quad (34)$$

Час затримки при передачі корисного навантаження між контрольними точками  $\gamma_c$  і  $\gamma_k$  складається із суми:

- час затримки при проходженні через TPS-TC в xTU-C і xTU-R;
- час затримки при проходженні через PMS-TC в xTU-C і xTU-R;
- час затримки при проходженні через PMD в xTU-C і xTU-R.

Час затримки при проходженні через TPS-TC залежить від типу TPS-TC, що використовується. Час затримки проходження через рівні PMS-TC та PMD, тобто затримка між контрольними точками  $\alpha$  і  $\beta$ , може бути змодельований незалежно від типу TPS-TC, що використовується.

ється Номінальним вважається час затримки передачі корисного навантаження в одному напрямі і визначається як

$$delay_{\alpha \beta} = \left\lceil 3.75 + \frac{S \times D}{4} \right\rceil \mu\text{с}, \quad (35)$$

де  $\lceil \bullet \rceil$  означає округлення до цілого в більшу сторону.

Час передачі пакету на рівні TCP складається із часу, що витрачається на кодування-декодування, часу відсилання підтвердження та часу передачі байтів кодового слова

$$RTT = RTT_0 + \frac{n \times D}{\mu}, \quad (36)$$

де  $RTT_0$  – час кодування-декодування та передачі зворотного підтвердження.

Максимальний розмір вікна TCP при цьому становить:

$$W_{\text{max}} = RTT \times \mu \quad (37)$$

З врахуванням наведених параметрів формування кадру ADSL, та, як зазначено в роботі [3], пропускну спроможність на рівні TCP можна визначити наступним чином:

$$\eta_{\text{TCP}} = \left( 1 - \frac{1}{8} \times q \times n \times D^2 \right) \times \left( 1 - \frac{h - R \cdot S}{\alpha \times \mu} \right) \quad (38)$$

### Результати моделювання та висновки

Моделювання рівнів еталонної моделі здійснено в програмі «Matlab» на базі імітатора фізичного рівня PMD «xDSL Simulator». За допомогою даного пакету було отримано залежність швидкості передачі даних в лінії у низхідному та висхідному напрямках (рис. 5) від довжини лінії. Дані результати моделювання використовувались для оцінки пропускну спроможності на рівні TCP в залежності від параметрів формування кадру корисного навантаження рівня PMS-TC та ймовірності помилки в кодовому слові.

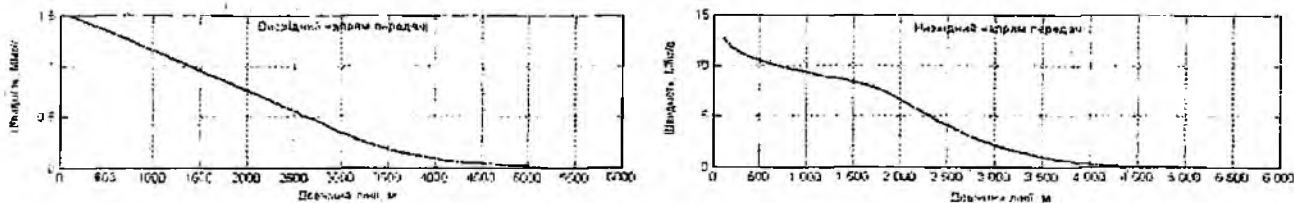


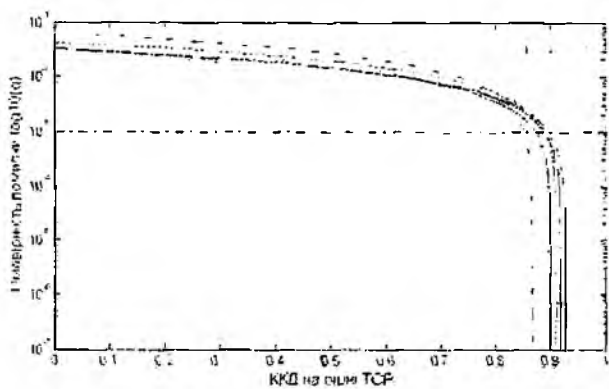
Рис. 5

На рис. 6, а наведено графік залежності пропускну спроможності на рівні TCP від ймовірності помилки для швидкості передачі в лінії 1, 2, 4, 8, 12 Мбіт/с. Як видно із графіку, при ймовірності помилки в кодовому слові  $10^{-3}$  забезпечується оптимальний ККД для всього діапазону швидкостей, а далі спостерігається різке погіршення продуктивності. Таким чином, можна відокремити оптимальний режим роботи системи, що досягається при забезпеченні ймовірності помилки в межах від  $10^{-3}$  до  $10^{-7}$ .

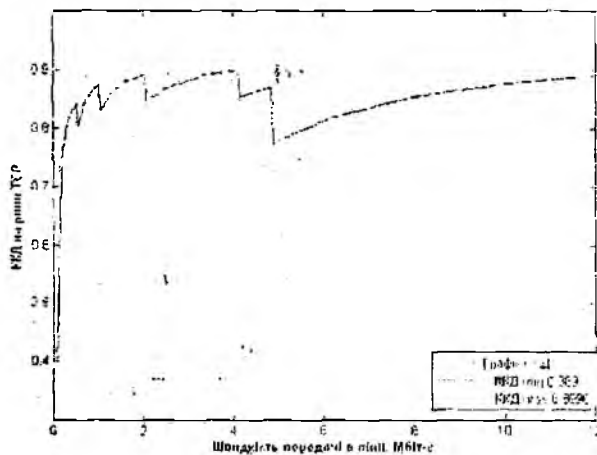
Результати моделювання для різних швидкостей з кратністю 32 Кбіт/с при ймовірності помилки в кодовому слові  $10^{-3}$  наведено на рис. 6, б. В процесі моделювання використовувалась глибина перестановок, що дорівнює 1, і максимальна кількість DMT символів в залежності від швидкості. Зростанню лінійної швидкості на 32 Кбіт/с відповідає збільшення величини кодового слова на 1 октет. Кількість DMT символів на кодове слово із ростом швидкості зменшується відповідно до ряду чисел 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1, 1/2. В точках переходу від однієї величини  $S$  до іншої спостерігається спад пропускну спроможності. Таким чином можна обирати оптимальні діапазони швидкостей.

Використання багаторівневої функціональної моделі дає змогу реально оцінити пропускну спроможність xDSL систем з врахуванням повної структури фізичного рівня та елементів стеку протоколів. В подальшому планується провести розширення функціональної моделі.

з врахуванням особливостей та структури всього стеку протоколів xDSL та провести порівняльний аналіз пропускної спроможності систем на базі ATM та EFM



а



б

Рис. 6

Список літератури: 1. *Rob F. M.* First approved version of ETSI spectral management, part 2 (TR 101 830-2), technical methods for performance evaluation 2005. 2. *Рекомендації МСЕ-T G992.* 3. *Приймачі-передавачі асиметричної цифрової абонентської лінії* 2005. 4. *Broersma H J, Hurink J.* Throughput of ADSL modems 1998. 5. *Wei Yu, Tsoumpakaris D, John M.* Performance of asymmetric digital subscriber lines in an impulse noise environment. 2003.

Харківський національний  
університет радіоелектроніки

Надійшло до редакції 15.10.2008