

УДК 621.391

# ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ VDSL2 НА МЕРЕЖІ ПАТ «УКРТЕЛЕКОМ»

**Evaluation of the Efficiency  
of the VDSL2 Technology Implementation  
on the PJSC «Ukrtelecom» Network**

**В. Балашов**, доктор технічних наук, директор,  
email: bva@oniis.org.ua

**А. Лашко**, кандидат технічних наук,  
провідний науковий співробітник,  
email: lashko@oniis.org.ua

**Л. Ляховецький**, кандидат технічних наук,  
заступник директора з наукової роботи,  
email: lm@oniis.org.ua

Державне підприємство «Одеський  
науково-дослідний інститут зв'язку»,

**В. Орешков**, кандидат технічних наук,  
старший викладач, Одеська національна  
академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
email: oreshkov\_vi@ukr.net

**В. Скуріхін**, начальник служби  
планування мережі Технічного департаменту,  
Одеська філія ПАТ «Укртелеком»

**V. Balashov**, doctor of technical sciences, director,  
email: bva@oniis.org.ua

**A. Lashko**, candidate of technical sciences,  
leading researcher  
email: lashko@oniis.org.ua

**L. Liakhovetsky**, candidate of technical sciences,  
deputy director for scientific work,  
email: lm@oniis.org.ua

State enterprise «Odessa research institute  
of communication»,

**V. Oreshkov**, candidate of technical sciences,  
senior lecturer, Chair Odessa national  
academy of communications. O.S. Popov,  
email: oreshkov\_vi@ukr.net

**V. Skurikhin**, head of service  
network planning of the Technical Department,  
Odessa branch of PJSC «Ukrtelecom»

*Роботу присвячено дослідженню досяжних швидкостей передавання даних системами передавання (СП) за технологією VDSL2 у процесі роботи за багатопарними телефонними кабелями мережі ПАТ «Укртелеком». Представлено результати експериментальних досліджень досяжної швидкості передавання СП VDSL2 за вітчизняними багатопарними телефонними кабелями. Виконано аналітичне моделювання роботи СП VDSL2 з урахуванням характеристик обладнання «Huawei» та коригування методики розрахунку швидкості передавання СП VDSL2. Проведено дослідження залежності швидкості передавання СП VDSL2 від довжини абонентської лінії, коефіцієнта завантаження багатопарного кабеля системами передавання та рівня зовнішніх адитивних завад. За результатами проведених досліджень надано рекомендації щодо впровадження технології VDSL2 на мережі ПАТ «Укртелеком».*

*The work is devoted to the research of achievable data transmission rates by transmission systems using VDSL2 technology (VDSL2-systems) when working on multi-pair telephone cables of the PJSC*

**Ключові слова:** система передавання, технологія VDSL2, швидкість передавання даних, перехідні завади.  
**Keywords:** transmission system, VDSL2 technology, data transmission rate, crosstalk.

До останнього часу технологія ADSL2+ [1] була найшвидшою із xDSL-технологій, які застосовувалися для передавання даних на вітчизняних мережах широкосмугового доступу (ШСД). Технологія ADSL2+ забезпечувала максимальну швидкість передавання даних до 24 Мбіт/с у низхідному напрямку (*downstream, DS*) та до 3 Мбіт/с у висхідному напрямку (*upstream, US*). При цьому реальна швидкість передавання даних за багатопарним телефонним ка-

*«Ukrtelecom» network. The architecture of the modernized telecommunications network of the PJSC «Ukrtelecom» is considered. The results of the experimental research of the achievable transmission rate of the transmission systems using VDSL2 technology for multi-pair telephone cables after the access network of the PJSC «Ukrtelecom» modernization, taking into account the crosstalk that occurs during the parallel operation of the VDSL2-systems and the availability of the ADSL2+-systems working in the multi-pair cable, are provided. Analytical modeling of the VDSL2-systems operation taking into account the characteristics of the «Huawei» equipment and domestic telephone cables is performed. The method for calculating of the transmission rate of the VDSL2-systems has been corrected on the basis of the experiments and modeling results. Using the corrected method, the research of the VDSL2-systems transmission rate dependence on the length of the subscriber line, the load coefficient of the multi-pair cable by transmission systems and the external additive noises level is carried out. The recommendations on the implementation of the VDSL2 technology on the PJSC «Ukrtelecom» network based on the results of the research are given.*

белем залежала від характеристик абонентської лінії (АЛ), рівня завад та коефіцієнта завантаження кабеля (числа систем передавання (СП), що паралельно працюють) [2]. Зауважимо, що відстані від вузла доступу до абонента сягали 2,5 км, а в окремих випадках і більше.

На сьогодні на телекомунікаційній мережі доступу ПАТ «Укртелеком» розпочалося впровадження високошвидкісної технології ШСД VDSL2, яка мо-

же забезпечити сумарну швидкість передавання даних ( $DS + US$ ) до 150 Мбіт/с [3]. Основною умовою збільшення швидкості передавання даних порівняно з технологією *ADSL2+* є зменшення довжини абонентської лінії. Тому технологія *VDSL2* позиціонується як технологія «останньої милі», що застосовується разом із оптичними технологіями за концепціями побудови оптичних мереж *FTTx* (як правило, *FTTC — Fiber to the Curb*), які передбачають наявність мідних кабелів на абонентській лінії (на вітчизняних мережах — це кабелі типу ТПП, КВАЗЕП тощо). Відповідно впровадженню технології *VDSL2* має передувати значна модернізація мережі доступу з класичної побудови лінійно-кабельних споруд на побудову мережі з архітектурою *FTTC*.

Варто відзначити, що «Укртелеком» проводить глобальну модернізацію власної телекомунікаційної мережі на всіх рівнях. Першим етапом глобаль-

ної модернізації є реалізація проекту «В6» — модернізація телекомунікаційної мережі шістьох найбільших міст України: Києва, Дніпра, Харкова, Одеси, Львова та Запоріжжя.

У рамках проекту «В6» модернізовано ядро мережі *IP/MPLS*, рівень агрегації та мережу доступу. За детального розгляду структури модернізованої телекомунікаційної мережі можна виділити 5 рівнів за функціональним призначенням вузлів та 4 сегменти мережі, що забезпечують взаємодію функціональних вузлів (рис. 1).

Рівні телекомунікаційної мережі: ядра *IP/MPLS*, дистрибуції, агрегації, доступу та закінчення мережі.

Телекомунікаційна мережа складається із транспортної мережі та мережі доступу, при цьому мережа доступу може бути умовно розділена на 3 сегменти: магістральний і розподільний сегменти та сегмент абонентських ліній.

Якщо прив'язуватися до адміністративно-територіального ділення держави, то відповідність між рівнями та сегментами телекомунікаційної мережі можна визначити у такий спосіб:

- перший рівень — рівень ядра *IP/MPLS* — є рівнем транспортної мережі. Це загальнодержавний рівень — транспортна мережа, що об'єднує всі територіально рознесені сегменти мережі в єдину мережу та має вихід на зовнішні транснаціональні мережі;

- другий рівень — рівень дистрибуції, який є площиною розмежування транспортної мережі й мережі доступу та відноситься до мережі доступу, — рівень у рамках адміністративно-територіальної одиниці (області або міста). Сегмент мережі доступу, який забезпечує підключення вузлів агрегації до вузла дистрибуції — це магістральний сегмент мережі доступу (*Metro IP/MPLS*);

- третій рівень — рівень агрегації — місцевий рівень у рамках району. Сегмент мережі доступу, який забезпечує

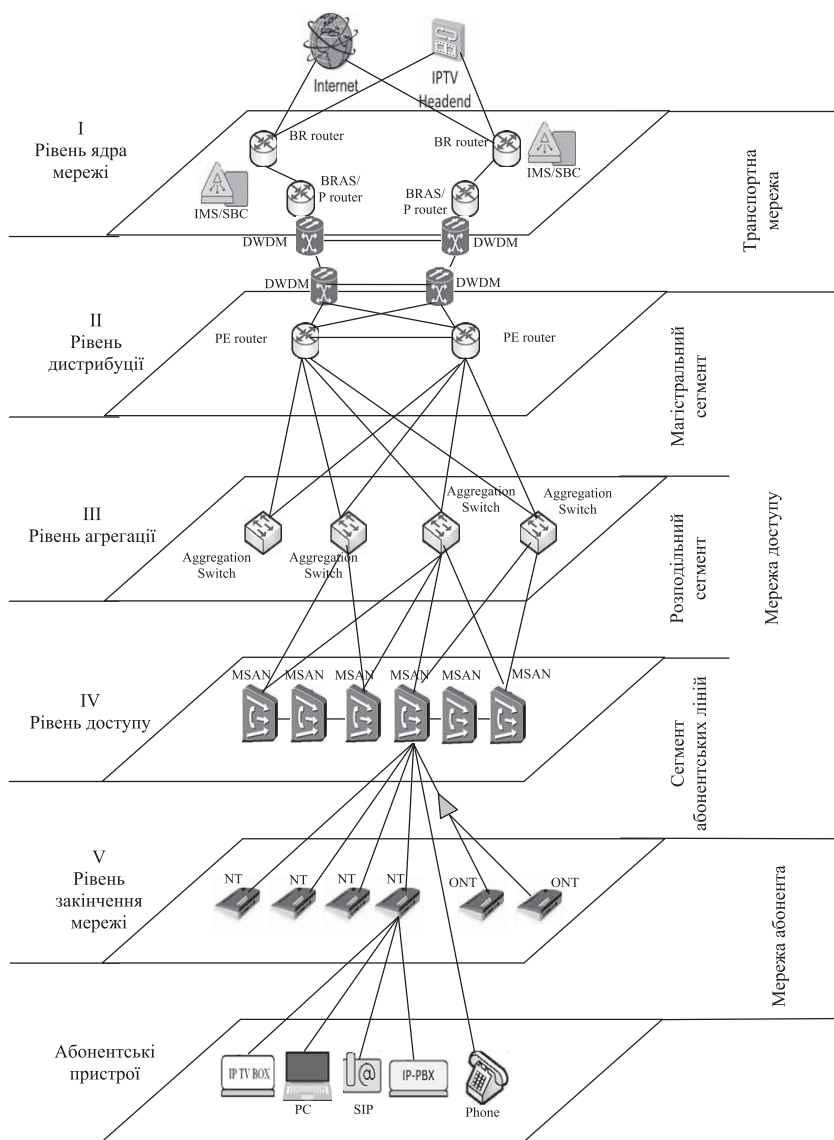


Рис. 1. Архітектура телекомунікаційної мережі  
Fig. 1. Telecommunications network architecture

підключення вузлів доступу до вузла агрегації — це розподільний сегмент мережі доступу (*Metro Ethernet*);

- четвертий рівень — рівень доступу — міститься нижче рівня агрегації, охоплює територію, розмір якої визначається припустимою протяжністю абонентської лінії від вузла доступу до приміщення абонента. Сукупність абонентських ліній складає сегмент абонентських ліній мережі доступу;

- п'ятий рівень — рівень закінчення мережі — це площина розмежування телекомунікаційної мережі та мережі абонента і розміщується у приміщенні абонента або біля нього.

Ядро мережі (*IP/MPLS Core network*), яке побудовано на базі технології передавання з комутацією за мітками *MPLS*, що складаються із маршрутизаторів різного рівня: ширококутового маршрутизатора (*BR-router — Broadband Router*), який забезпечує підключення до зовнішніх мереж; маршрутизатора провайдера рівня ядра (*Core P-router — Core Provider Router*), до якого підключається обладнання другого рівня, та *BRAS (Broadband remote access server, віддаленого сервера ширококутового доступу)*. До ядра також відносяться прикордонний контролер сесій (*SBC — Session Border Controller*) і система надання мультимедійних послуг на базі протоколів *IP*-мереж (*IMS — IP Multimedia Subsystem*). Обладнання ядра повинно обов'язково мати стовідсоткове резервування.

Зв'язок між ядром мережі та територіально рознесеними місцевими мережами доступу здійснюється за допомогою телекомунікаційних систем передавання, на сьогодні це, як правило, системи передавання за технологіями *DWDM*.

Рівень дистрибуції складають вузли дистрибуції, які реалізуються за допомогою *PE router (Provider edge router, маршрутизатор рівня постачальника послуг)*. До вузлів дистрибуції підключаються вузли агрегації. Ділянку мережі між вузлами дистрибуції та агрегації назвемо магістральним сегментом мережі доступу.

Для забезпечення резервування у кожній місцевій мережі передбачається використовувати не менше ніж 2 вузла дистрибуції, при цьому магістральний сегмент мережі доступу може будуватися за топологіями: «подвійної зірки», коли всі вузли агрегації підключаються до кожного із вузлів дистрибуції виділеними лініями; «лінійного ланцюга», коли кінцевими точками «ланцюга» є вузли дистрибуції, або може використовуватися гібридна структура мережі.

Рівень агрегації складають вузли агрегації — комутатори (*Aggregation Switch*), що агрегу-

ють *Ethernet*-трафік від вузлів рівня доступу телекомунікаційної мережі. Ділянку мережі між вузлами агрегації та доступу назвемо розподільним сегментом мережі доступу.

Кількість вузлів агрегації визначається припустимою кількістю вузлів доступу, що підключаються до кожного вузла агрегації, та структурою розподільного сегмента мережі доступу. Одним із варіантів побудови розподільного сегмента, який забезпечує захисне перемикання на резерв у випадку аварії на лінії, може бути використання топології «кільця» або «лінійного ланцюга», коли кінцевими точками «ланцюга» є вузли агрегації.

Рівень доступу складають вузли доступу, до яких підключаються кінцеві мережні пристрої у приміщенні користувача (або пристрої закінчення мережі, *NT — network termination*). Ділянку телекомунікаційної мережі між вузлами доступу та *NT* і є сегментом абонентських ліній мережі доступу. На сьогодні як вузли доступу використовуються комутатори доступу (*Ethernet switches*), комутатори *GPON* або *MSAN (Multi-Service Access Node, мультисервісний вузол доступу)* з відповідною до потреб абонентів у послугах комплектацією. *MSAN* може забезпечувати підключення абонентів за різними технологіями, наприклад, аналоговою телефонією за інтерфейсом *FXS/FXO*, *IP*-телефонією *SIP*, *ISDN*, *xDSL*, *xPON*, *Ethernet P2P* та іншими.

Від застосованої технології доступу залежить тип мережних пристроїв (терміналів) *NT* у приміщенні користувача: *xDSL*-модем, *ONT*, *Ethernet*-маршрутизатор та інші, що складають рівень закінчення мережі.

Рівень закінчення мережі є межею «відповідальності» оператора. Обладнання рівня закінчення мережі (мережний термінал *NT*) термінує секцію цифрового доступу ширококутового з'єднання, забезпечуючи керування й моніторинг параметрів передавання; термінує транспортний протокол (наприклад *ATM*), використовуваний для передавання трафіка користувача; а також може виконувати функції комутації/маршрутизації.

Рівень закінчення мережі забезпечує підключення різноманітних абонентських пристроїв (*CPE — customer premises equipment*) до ресурсів телекомунікаційної мережі. Причому тип *CPE* залежить від виду послуг, які бажає отримувати абонент/користувач, — це може бути телефон, ПК (*desktop, laptop* або планшетний комп'ютер), телевізор (з функцією *SmartTV* або підключений через *Set-Top-Box* чи *IP-Box*) тощо.

Сукупність фізичних з'єднань від кінцевого мережного пристрою *NT* до терміналів абонента

як за допомогою абонентських кабелів (наприклад, «вита пара»), так і радіоз'єднань (наприклад, *WiFi*), складають мережу абонента.

Для технічної реалізації зазначеної модернізації на всіх рівнях мережі використовується телекомунікаційне обладнання компанії «Huawei».

Згідно з розглянутою архітектурою технологія *VDSL2* застосовується на сегменті абонентських ліній мережі доступу (рівень доступу — рівень закінчення мережі). Відповідно, «Укртелеком» перебудовує свою мережу доступу з концепції *FTTN*, коли вузли доступу містяться на АТС, на концепцію *FTTC*, за якої вузли доступу «вносяться ближче до абонентів» та розміщуються у розподільних шафах. При цьому із традиційної абонентської лінії у процесі модернізації виключається магістральна ділянка і залишається лише розподільна ділянка та абонентська проводка; відповідно максимальна кількість пар багатопарних кабелів, що використовуються, не перевищує 100 пар, а довжина абонентських мідних ліній зменшується до 500 м, що гарантує надання абонентам сервісу доступу до мережі Інтернет на швидкості 50 Мбіт/с.

При цьому на вузлах доступу застосовується лінійка обладнання «Huawei» *MSAN SmartAX MA5600T/MA5603T/MA5616T* із встановленими модулями *xDSL*-доступу (як правило, це комбоплати *H80DCCPE*, що одночасно поєднують *VDSL2* та *POTS*), а у приміщеннях абонентів встановлюються *VDSL2*-модеми «Huawei» *HG630*.

Метою дослідження є:

- експериментальна оцінка досяжної швидкості передавання СП за технологією *VDSL2* за багатопарними телефонними кабелями мережі ПАТ «Укртелеком» після зазначеної модернізації з урахуванням впливу довжини лінії, рівня зовнішніх адитивних завад і перехідних завад, що виникають у процесі паралельної роботи СП *VDSL2*, та наявності у багатопарному кабелі працюючих СП *ADSL2+*;
- аналітичне моделювання варіантів паралельної роботи СП *VDSL2* з урахуванням характеристик обладнання «Huawei» та вітчизняних телефонних кабелів;
- коригування методики розрахунку швидкості передавання за результатами експериментів і моделювання.

Одним із основних факторів, що обмежують швидкість передавання в СП *VDSL2*, є перехідні завади під час паралельної роботи за багатопарним телефонним кабелем [2].

Вихідними даними для дослідження є:

- ♦ абонентська лінія, побудована із використан-

ням кабелів ТПП-0,4 та ТППЗ-0,4 з кількістю пар від 10 до 100;

- ♦ довжина лінії — (100...500) метрів;
- ♦ коефіцієнт завантаження (КЗ) багатопарного кабеля системами передавання — (10...100) %;
- ♦ рівень СГП зовнішніх адитивних завад приймався рівномірним (*AWGN*) — (мінус 140...мінус 100) дБм/Гц;
- ♦ *SNR-margin* приймався рівним 6 дБ для низхідного (*DS*) та 10 дБ для висхідного (*US*) напрямів передавання;
- ♦ рівень СГП сигналу на виході передавача СП *VDSL2* приймався на 3,5 дБ меншим від маски, згідно з Рекомендацією *ITU-T G.993.2*, для частотного плану *B8-6* [998-*M2x-B*] [3];
- ♦ характеристики лінії передавання (власне загасання, перехідне загасання на ближньому кінці та захищеність від перехідних завад на далекому кінці) визначалися із [4].

Відзначимо, що впровадження нової технології, більш високошвидкісної і більш широкосмужової, на наявній уже мережі ШД гостро ставить проблему сумісності систем передавання *VDSL2*, що встановлюються, із вже наявними в кабелі СП *ADSL2+* та іншими системами. Тому важливо забезпечити електромагнітну сумісність між новими СП *VDSL2*, що встановлюються, та вже наявними в кабелі системами передавання.

На рис. 2 наведено залежності перехідних загасань на ближньому (*NEXT*) та дальньому (*FEXT*) кінцях кабелю ТППЗ-10х2х0,4 від частоти та довжини лінії, які дозволяють порівняти можливий внесок перехідних завад *NEXT* та *FEXT* у сумарну заваду.

Із рис. 2 видно, що *NEXT* не залежить від довжини лінії та є меншою від *FEXT* на (8...20) дБ у робочій смузі частот СП *VDSL2* за довжини лінії 100 м. У разі збільшення довжини лінії *FEXT* збільшується на величину власного загасання лінії [4]. Отже, для

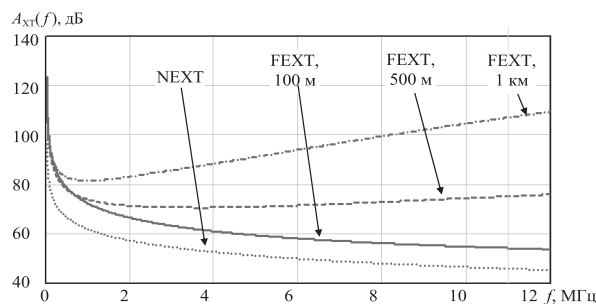


Рис. 2. Залежність перехідних загасань на ближньому та дальньому кінці кабелю ТППЗ-10х2х0,4 від частоти та довжини лінії

Fig. 2. The dependence of transient attenuation at the near and far end of the TPPZ-10x2x0.4 cable on the frequency and length of the line

мінімізації перехідних завад між СП *VDSL2* та *ADSL2+* важливим є правильний вибір плану частот СП *VDSL2* та *ADSL2+*: смуги частот низхідного та висхідного напрямів передавання різнотипних СП не повинні перекриватися.

Отже, на ділянках мережі, де вже функціонують СП *ADSL2+* Annex A, в процесі впровадження технології *VDSL2* необхідно використовувати СП *VDSL2* з частотним планом B8-4 [998-M2x-A]. Якщо наявні СП *ADSL2+* використовують частотний план Annex M, то необхідно використовувати СП *VDSL2* з частотним планом B8-6 [998-M2x-B].

Для визначення досяжних швидкостей передавання СП *VDSL2* використовувалися математичні моделі та методика розрахунку характеристик СП *VDSL2*, наведені у [5] та [6]. При цьому важливо забезпечити адекватність розроблених моделей реальним системам передавання та, за необхідності, коригування цих моделей. Для виконання цієї умови на мережі ПАТ «Укртелеком» (м. Одеса, вузол доступу 16-21 — крос АТС 726) проведено натурні випробування роботи обладнання *xDSL*-доступу компанії «Huawei» з вимірюванням характеристик абонентських ліній та СП *VDSL2* [7].

Схему натурних випробувань наведено на рис. 3.

Методика оцінки швидкості передавання враховує тільки базові характеристики *xDSL*-систем, які визначаються відповідними Рекомендаціями ITU-T, такі як маска СПП сигналу, запас за заводозахисністю (*SNR-margin*), загальна кількість несучих частот, що використовуються для передавання у низхід-

ному та висхідному напрямках, частота передавання інформаційних кадрів, припустима ймовірність помилки тощо. Разом із тим, завжди існують певні особливості реалізації систем (наприклад, стосовно корекції частотних спотворень та алгоритмів адаптації до завад), які може вносити виробник обладнання і які відповідно відомі тільки цьому виробнику; тому результати розрахунків за такою методикою можуть у деяких випадках суттєво відрізнятися від результатів вимірювань. Тому у процесі порівняння результатів вимірювань та розрахунків за цією методикою виконано коригування методики шляхом введення певних поправкових коефіцієнтів.

У табл. 1 надано результати вимірювань та розрахунків із коригуванням (з урахуванням внесення поправкових коефіцієнтів) середніх значень швидкості передавання залежно від коефіцієнта завантаження кабеля системами передавання.

За допомогою коригованої методики отримано результати розрахунку мінімальних (гарантованих) та середніх значень досяжних швидкостей передавання СП *VDSL2* залежно від довжини лінії та кількості систем, що паралельно працюють у багатопарному кабелі. Певні показові результати надані в табл. 2, 3 для рівнів зовнішніх завад мінус 140, мінус 120 та мінус 100 дБм/Гц відповідно.

Аналіз отриманих результатів засвідчив:

1) у разі збільшення довжини лінії від 100 до 500 метрів:

\* середня швидкість передавання зменшується на (10...20) % (від 89,6 до 79,3 Мбіт/с (для  $K_3 = 10\%$ ) та від 70,2 до 56,2 Мбіт/с (для  $K_3 = 100\%$ )) для *DS* та на 25...30 % (від 54,6 до 40,9 Мбіт/с (для  $K_3 = 10\%$ ) та від 35,3 до 24,6 Мбіт/с (для  $K_3 = 100\%$ )) для *US*, залежно від коефіцієнта завантаження (для більшого  $K_3$  — більше зменшення швидкості передавання) за низьких рівнів завад (*AWGN* не перевищує мінус 140 дБм/Гц);

\* за високих рівнів завад (*AWGN* дорівнює мінус 100 дБм/Гц) зменшення швидкості передавання значно суттєвіше і становить  $\approx 60\%$  (від 54,2 до 22,9 Мбіт/с (для  $K_3 = 10\%$ ) та від 52,8 до 22,6 Мбіт/с (для  $K_3 = 100\%$ )) для *DS* та  $\approx 65\%$  (від 7,6 до 2,7 Мбіт/с як для

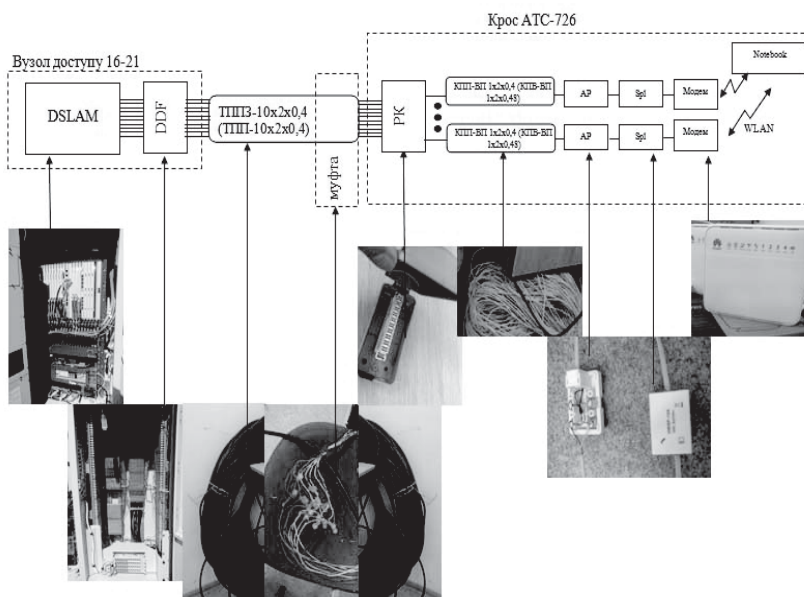


Рис. 3. Схема організації *xDSL*-ліній для проведення вимірювань швидкості передавання СП *VDSL2* та *ADSL2+* у процесі роботи багатопарними кабелями  
Fig. 3. Scheme of organization of *xDSL* lines for carrying out measurements of transmission speed of *VDSL2* and *ADSL2+* couplings in the process of operation with multi-wired cables

Таблиця 1. Результати вимірювання та розрахунків середньої швидкості передавання СП VDSL2

Table 1. Results of measurements and calculations of the average rate of transmission of VDSL2 joint ventures

КЗ, %	Результати вимірювання		Результати розрахунку	
	$R_{DS}$ , Мбіт/с	$R_{US}$ , Мбіт/с	$R_{DS}$ , Мбіт/с	$R_{US}$ , Мбіт/с
лінія довжиною 150 м, кабель ТППЗ-10х2х0,4, новий кабель				
10	91,9968	61,5921	94,26	62,992
20	85,9876	51,56954	86,548	50,288
30	80,144	44,2775	82,524	46,208
40	79,99	43,864375	79,9	43,78
50	78,0884	42,2357	77,82	41,892
60	76,4127	40,8433	76,456	40,476
70	73,414	38,1597	74,896	39,36
80	72,332	37,4731	73,604	38,448
90	70,7587	36,19789	72,612	37,456
100	69,956	35,4187	71,808	36,672
лінія довжиною 430 м, кабель ТППЗ-10х2х0,4, новий кабель				
10	89,4136	48,1294	89,072	49,432
20	80,30445	42,3935	79,128	41,368
30	75,36133	38,23067	74,624	38,272
40	74,617	37,63975	71,82	35,968
50	71,8184	35,497	69,52	34,492
60	66,24867	31,9735	67,608	32,904
70	65,916	31,4349	66,356	31,8
80	63,613	29,962	65,228	31,036
90	63,0284	29,7141	63,984	30,228
100	62,572	29,1297	62,9	29,624
лінія довжиною 162 м, кабель ТПП-10х2х0,4, 12 років експлуатації				
10	92,1296	60,9386	94,26	62,836
20	85,73	49,3681	84,392	47,948
30	78,6433	43,3485	80,068	43,668
40	78,5035	42,194125	77,388	40,956
50	75,4724	39,5288	75,164	39,228
60	73,5147	38,3423	73,38	37,644
70	70,64343	35,95271	72,212	36,496
80	69,552	35,032375	71,06	35,592
90	68,58844	34,13989	69,84	34,808
100	66,8688	32,5836	68,816	34,1

КЗ = 10 %, так і для КЗ = 100 %) для US, при цьому практично не залежить від коефіцієнта завантаження кабеля системами передавання;

\* причиною цього є співвідношення між зовнішніми адитивними завадами та перехідними завадами: рівень СПП перехідних завад становить приблизно мінус 120 дБм/Гц, тому за рівня AWGN, більшого за мінус 120 дБм/Гц, саме зовнішні завади стають домінуючими, і збільшення коефіцієнта завантаження суттєво на швидкість не впливає;

2) збільшення коефіцієнта завантаження багатопарного кабеля системами передавання від 10 % до 100 % призводить до зменшення швидкості передавання у випадку низьких рівнів зовнішніх завад, коли домінуючими є перехідні завади:

\* за рівня AWGN мінус 140 дБм/Гц та довжини лінії 100 м зменшення середньої швидкості складає 22 % (від 89,6 до 70,2 Мбіт/с) для DS та 35 % (від 54,6 до 35,3 Мбіт/с) для US; за довжини 500 м зменшення складає 20 % (від 73,9 до 56,2 Мбіт/с) для DS та 40 % (від 40,9 до 24,6 Мбіт/с) для US;

\* за рівня AWGN мінус 120 дБм/Гц та довжини лінії 100 м зменшення середньої швидкості складає 19 % (від 85,8 до 69,6 Мбіт/с) для DS та 14 % (від 36,7 до 31,4 Мбіт/с) для US; за довжини 500 м зменшення складає 13 % (від 58,4 до 51 Мбіт/с) для DS та 17 % (від 17,4 до 15,4 Мбіт/с) для US;

\* збільшення зовнішніх завад до мінус 100 дБм/Гц призводить до того, що залежність швидкості передавання від коефіцієнта завантаження не перевищує 2 %;

3) збільшення рівня зовнішніх завад AWGN від мінус 140 дБм/Гц до мінус 100 дБм/Гц призводить до суттєвого зменшення швидкості передавання, яке, залежно від довжини лінії та коефіцієнта завантаження, може досягати 71 % для DS та 93 % для US. Отже, важливо забезпечити умови експлуатації абонентських ліній, за яких зовнішні адитивні завади не перевищуватимуть рівень мінус 120 дБм/Гц.

Результати дослідження дозволяють сформулювати рекомендації щодо впровадження технології VDSL2 на мережі ПАТ «Укртелеком» [7]:

1) електричні параметри абонентських ліній повинні відповідати вимогам, встановленим у [7—10];

2) необхідно забезпечити електромагнітну сумісність нових СП за технологією VDSL2 з уже наявними СП ADSL2+ шляхом правильного вибору частотного профілю. За виконання цієї умови за довжини лінії до 500 метрів перехідні завади суттєво не впливають на швидкість передавання як СП VDSL2, так і СП ADSL2+ (максимальне зменшення швидкості передавання не перевищує 10 %), тому під час вибору пар для СП VDSL2 наявність у багатопарному кабелі працюючих СП ADSL2+ може не враховуватися;

Таблиця 2. Мінімальні (гарантовані) швидкості передавання  $R_{DS}/R_{US}$  СП VDSL2 залежно від довжини лінії та коефіцієнта завантаження багатопарного кабелю ( $AWGN = \text{мінус } 140 \text{ дБм/Гц}$ , кабель ТППЗ-100x2x0,4), Мбіт/с

Table 2. Minimum (guaranteed) speeds of RDS / RUS transmission VDSL2, depending on the length of the line and the multiplier cable load factor ( $AWGN = \text{minus } 140 \text{ dBm / Hz}$ , TPPZ-100x2x0.4 cable), Mbps

Довжина лінії, км	Коефіцієнт завантаження багатопарного кабелю, %									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0,1	72,3/37,2	71,6/36,5	71/35,9	70,4/35,4	69,8/35	69,2/34,6	68,7/34,3	68,2/34	67,8/33,7	67,4/33,3
0,2	66,7/32,7	66/32	65,3/31,4	64,7/31	64/30,5	63,4/30,2	62,9/29,8	62,4/29,5	61,9/29,2	61,5/28,9
0,3	63,3/30,1	62,4/29,5	61,5/28,9	61/28,3	60,5/27,9	60,1/27,5	59,6/27,1	59,2/26,8	58,7/26,4	58,2/26,1
0,4	60,8/28	60/27,3	59,3/26,7	58,7/26,3	58/25,8	57,4/25,5	56,9/25,2	56,3/24,8	55,8/24,5	55,5/24,2
0,5	58,9/26,1	57,9/25,4	56,9/25	56,3/24,5	55,6/23,9	55,2/23,4	54,8/23,1	54,4/22,8	53,9/22,5	53,6/22,2

3) у багатопарному кабелі основною причиною обмеження швидкості передавання СП VDSL2 є перехідні завади, за умови, що рівень СП зовнішніх завад не перевищує значення мінус 120 дБм/Гц;

4) для АЛ довжиною до 500 м можливо забезпечити гарантовані швидкості передавання в межах (45...70) Мбіт/с у напрямку до абонента (DS) та (12...34) Мбіт/с у напрямку від абонента (US) залежно від коефіцієнта завантаження та довжини лінії. За тих самих умов середні швидкості передавання можуть досягати (50...90) Мбіт/с (DS) та (15...55) Мбіт/с (US);

5) якщо АЛ складається із кабелів різної ємності (з різною кількістю пар), оцінку характеристик рекомендується виконувати за АЛ максимальної протяжності й однорідного кабелю максимальної ємності;

6) якщо АЛ складається із кабелів різного року виробництва, рекомендується оцінку характеристик виконувати для кабелю, що має більш тривалий термін експлуатації;

7) за визначення максимального коефіцієнта завантаження багатопарного кабелю системами передавання VDSL2 рекомендується обов'язково користуватися таблицями мінімальних (гарантованих)

Таблиця 3. Середні швидкості передавання  $R_{DS}/R_{US}$  СП VDSL2 залежно від довжини лінії та коефіцієнта завантаження багатопарного кабелю

Table 3. Average transmission speeds RDS / RUS VDSL2 SP depending on line length and multiphase cable loading ratio

Довжина лінії, км	Коефіцієнт завантаження багатопарного кабелю, %									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$AWGN = \text{мінус } 140 \text{ дБм/Гц}$ , кабель ТППЗ-100x2x0,4, Мбіт/с										
0,1	89,6/54,6	83,6/47,6	80,3/44,1	77,8/41,9	76,2/40,2	74,4/39	73/38	72/36,9	71,2/36	70,2/35,3
0,2	86,5/50,5	79/43,2	75,3/39,6	72,5/37,4	70,8/35,8	68,9/34,5	67,4/33,5	66,4/32,4	65,5/31,6	64,5/30,9
0,3	84/47,9	76,3/40,1	72,1/36,9	69,3/34,8	67,2/33,1	65,7/31,7	64,3/30,7	62,9/29,8	61,7/29	60,9/28,2
0,4	82/44,8	73,7/38,2	69,7/34,8	66,9/32,6	65/31	63,1/29,8	61,6/28,8	60,5/27,7	59,5/26,9	58,5/26,2
0,5	79,3/40,9	71,8/35,5	67,5/32,4	65/30,6	62,7/29,2	61/27,7	59,7/26,7	58,5/25,9	57,3/25,2	56,2/24,6
$AWGN = \text{мінус } 120 \text{ дБм/Гц}$ , кабель ТППЗ-100x2x0,4), Мбіт/с										
0,1	85,8/36,7	81,5/35,5	78,6/34,4	76,6/33,8	75/33,2	73,5/32,6	72,3/35,2	71,4/32,3	70,6/31,8	69,6/31,4
0,2	79,6/34,3	75,7/33,4	72,8/32,3	71/31,4	69,1/30,6	67,6/30,1	66,6/29,6	65,6/29,1	64,7/28,6	63,7/28,1
0,3	73,1/31,4	70,1/30,6	67,9/29,8	66,4/28,6	64,7/27,8	63,4/27,2	62,2/26,7	61,3/26,2	60,6/25,9	59,8/25,5
0,4	66,1/24	64,2/23,6	62,4/23,2	61,2/22,9	60/22,5	59/22,1	58/21,9	57,2/21,6	56,3/21,3	55,8/21
0,5	58,4/17,4	57,2/17,2	56,2/17	55,3/16,8	54,5/16,6	53,7/16,3	52,9/16,1	52,2/15,8	51,6/15,5	51/15,4
$AWGN = \text{мінус } 100 \text{ дБм/Гц}$ , кабель ТППЗ-100x2x0,4, Мбіт/с										
0,1	54,2/7,6	54/7,6	53,8/7,6	53,6/7,6	53,5/7,6	53,4/7,6	53,2/7,6	53,1/7,6	53/7,6	52,8/7,6
0,2	45,5/6,9	45,4/6,9	45,3/6,9	45,2/6,9	45,1/6,9	45/6,9	44,8/6,8	44,7/6,8	44,6/6,8	44,5/6,8
0,3	37,3/5,1	37,2/5,1	37,1/5,1	37,1/5,1	37/5,1	36,9/5,1	36,9/5,1	36,8/5,1	36,7/5,1	36,7/5
0,4	29,4/3,7	29,4/3,7	29,3/3,7	29,3/3,7	29,2/3,7	29,2/3,7	29,1/3,6	29,1/3,6	29/3,6	29/3,6
0,5	22,9/2,7	22,9/2,7	22,8/2,7	22,8/2,7	22,7/2,7	22,7/2,7	22,7/2,7	22,6/2,7	22,6/2,7	22,6/2,7

швидкостей передавання. Але при цьому, якщо кількість СП у кабелі не перевищує 50 %, допускається можливість визначати швидкість, яку (також гарантовано) можливо пропонувати абонентам, за таблицею середніх швидкостей, за умови проведення робіт з відбору пар з кращими параметрами.

#### РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РОЗВИТКУ МЕРЕЖІ ШД ПАТ «УКРТЕЛЕКОМ»

На поточному етапі розвитку мережі доступу ПАТ «Укртелеком» відбувається впровадження варіанту технології *VDSL2* без застосування опції «векторинг» — технології боротьби з перехідними завадами, що дозволяє суттєво збільшити досягнуту швидкість передавання. Такий варіант є виправданим, доки відсоток завантаження багатопарних кабелів не перевищує 50 % і є можливість відбору пар з кращими параметрами.

У випадку переходу рубежу у 50 % як наступний крок у процесі модернізації мережі доступу ПАТ «Укртелеком» пропонується включення опції «векторинг» в обладнанні *VDSL2*, що використовується на мережі доступу ПАТ «Укртелеком». Такий варіант дозволить суттєво підвищити ефективність функціонування обладнання *VDSL2*, практично до швидкостей без перехідних завад. Більш докладні рекомендації можливі після проведення додаткових досліджень з ефективності застосування опції «векторинг» на мережі ПАТ «Укртелеком».

Сучасним найбільш високошвидкісним варіантом технологій *xDSL*, який активно впроваджу-

ється на мережах ШД у світі, наразі є технологія *G.fast*, що здатна забезпечити швидкість передавання до 1 Гбіт/с за абонентськими лініями малої довжини. Це ймовірний подальший крок у розвитку мережі ШД ПАТ «Укртелеком».

#### ВИСНОВКИ

У результаті проведення теоретичного та експериментального дослідження фрагмента мережі доступу, на якому використані вітчизняні кабелі типу ТПП, ТППЗ та СП *VDSL2* фірми «Huawei»:

► виконано коригування методики розрахунку характеристик *xDSL*-систем у відповідності до особливостей реалізації технології *VDSL2* в обладнанні фірми «Huawei»;

► визначено середні та гарантовані швидкості передавання сигналів залежно від довжини абонентських ліній, коефіцієнта завантаження вітчизняних телефонних кабелів системами *VDSL2* та рівня зовнішніх завад;

► сформульовано рекомендації щодо впровадження технології *VDSL2* на мережі ПАТ «Укртелеком».

За виконання зазначених умов, залежно від характеристик абонентських ліній, гарантовано можливо забезпечити швидкості передавання у межах (45...70) Мбіт/с у напрямку до абонента (*DS*) та (12...34) Мбіт/с у напрямку від абонента (*US*), при цьому середні (серед усіх паралельно працюючих систем у багатопарному кабелі) швидкості передавання складають (50...90) Мбіт/с (*DS*) та (15...55) Мбіт/с (*US*).

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- ITU-T Recommendation G.992.5: Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (ADSL2) — Extended bandwidth (ADSL2plus). [Text]. — Appr. 2009, January. — Geneva, 2009. — 110 p.
- Балашов В.А. Сети и оборудование широкополосного доступа по технологиям *xDSL* / В.А. Балашов, П.П. Воробийченко, А.Г. Лашко, Л.М. Ляховецкий — Одесса (Balashov V.A. Seti i oborudovanie shirokopolosnogo dostupa po tehnologiyam *xDSL* / V.A. Balashov, P.P. Vorobienko, A.G. Lashko, L.M. Liakhovetskiy — Odessa). — 2010.
- ITU-T Recommendation G.993.2: Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2). [Text]. — Appr. 2015, January. — Geneva, 2015. — 313 p.
- Балашов В.А. Технологии широкополосного доступа *xDSL*. Инженерно-технический справочник / Под общей ред. В.А. Балашова. — М.: Эко-трендз (Balashov V.A. Tehnologii shirokopolosnogo dostupa *xDSL*. Inzhenerno-tehnicheskii spravochnik / Pod obschey redaktsiyey V.A. Balashova. — M.: Eko-trendz). — 2009. — 256 c/s.
- Балашов В.А. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами / В.А. Балашов, П.П. Воробийченко, Л.М. Ляховецкий — М.: Эко-трендз (Balashov V.A. Systemi peredachi ortogonalnimi garmonicheskimi signalami / V.A. Balashov, P.P. Vorobienko, L.M. Liakhovetskiy — M.: Eko-trendz). — 2012. — 228 c/s.
- Перспективні телекомунікаційні технології мереж широко-смугового доступу: монографія / [В.О. Балашов, А.Г. Лашко, Л.М. Ляховецький, В.І. Орешков, В.В. Педяш, О.С. Решетнікова, А.В. Солдаткіна] — Одеса: КУПРИЄНКО СВ (Perspektivni telekomunikatsijni tehnologii meresh shirokopolosnogo dostupu: monografiya / [V.O. Balashov, A.G. Lashko, L.M. Liakhovetskiy, V.I. Oreshkov, V.V. Pedjash, O.S. Reshetnikova, A.V.Soldatkina] — Odessa: KUPRIENKO CV.) — 2016. — 200 c/s.: ISBN 978-966-2769-98-2.
- Дослідження технології *VDSL2* мережі ШД ПАТ «Укртелеком»: Звіт про НДР / Державне підприємство «Одеський науково-дослідний інститут зв'язку»; керівн. В.О. Балашов; викон.: В. Орешков [та ін.]. — Одеса (Doslidzhennja tehnologii *VDSL2* mereshi ShSD PAT «Ukrtelecom»: Zvit pro NDR / Derzhavne pidpriemstvo «Odeskiy naukovo-doslidnyi institut зв'язку»; kerivn. V.O. Balashov; vikon.: V. Oreshkov [ta in.]. — Odessa) — 2017. — 117 c/s. — № DR 0116U008197.
- ITU-T Recommendation L.19: Multi-pair copper network cable supporting shared multiple services such as POTS, ISDN and *xDSL*. [Text]. — Appr. 2010, May. — Geneva, 2010. — 20 p.
- КНД 45-189 Керівництво з експлуатації лінійно-кабельних споруд місцевих мереж зв'язку. Видання офіційне. — К.: Зв'язок (KND 45-189 Kerivnitstvo z ekspluatatsii liniyno-kabelnih sporud mistsevih meresh зв'язку. Vidannja ofitsijne. — K.: Zvjazok) — 2003. — 231 c/s.
- ТУ У 05758730.014 Кабелі телефонні з поліетиленовою ізоляцією і пластмасовою оболонкою (TU U 05758730.014 Kabeli telefonni z polietilenovuju izoljatsieju i plastmassovuju obolonkoju). [2]

Отримано / received: 04.07.2018.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. В.В. Корчинським (Україна).  
Prof. V.V. Korchinskiy, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.