

**ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ
ПЕРЕДАЧІ SHDSL ПРИ РОБОТІ ПО КАБЕЛЯХ ТИПУ КСПП**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ SHDSL ПРИ РАБОТЕ ПО КАБЕЛЯМ ТИПА КСПП**

**RESEARCH OF RATE CHARACTERISTICS OF SHDSL TRANSMISSION
SYSTEM WHEN WORKING ON KSPП TYPE CABLE**

Анотація. Виконано дослідження швидкісних характеристик системи передачі SHDSL при роботі по сільських кабелях типу КСПП та проведено аналіз ефективності реконструкції сільської телефонної мережі при застосуванні технології SHDSL.

Аннотация. Выполнено исследование скоростных характеристик системы передачи SHDSL при работе по сельским кабелям типа КСПП и проведён анализ эффективности реконструкции сельской телефонной сети при использовании технологии SHDSL.

Summary. Research of the rate characteristics of SHDSL transmission system when working on type КСПП rural cables is completed and analysis of the effectiveness of rural telephone network reconstruction using SHDSL technology is performed.

Однією з глобальних проблем сучасного світу є проблема «цифрового розриву», тобто проблема нерівних можливостей доступу до інфокомунікаційних послуг для різних верств населення. Гостро стоїть проблема «цифрового розриву» і в Україні. Для мешканців сільських населених пунктів сучасні інфокомунікаційні послуги майже недоступні, обмежені навіть можливості користування традиційним телефонним зв'язком. Одним із першочергових кроків має стати побудова сучасної інфокомунікаційної інфраструктури сільських адміністративних районів (САР).

Як відомо, при побудові мережі найбільшу частку витрат складають вартість кабелів та витрати на їх прокладання. З огляду на це економічно ефективним шляхом подолання «цифрового розриву» є використання існуючої кабельної інфраструктури сільської телефонної мережі (СТМ), тобто реконструкція існуючих з'єднувальних ліній між АТС. Адже на СТМ між АТС прокладено понад 100 тис. км кабелів (в основному типу КСПП) [1].

Зазначимо, що реконструкція СТМ в Україні вже здійснюється, при цьому застосовується симетрична технологія SHDSL. Враховуючи це, актуальною задачею є дослідження швидкісних характеристик SHDSL при роботі по сільських кабелях – це дасть можливість розробити науково обґрунтовану концепцію реконструкції СТМ. Проте сьогодні у літературі відсутні науково обґрунтовані результати розрахунку швидкісних характеристик систем передачі (СП) SHDSL, а наводяться лише окремі дані, які надають виробники обладнання [2]. Варто зазначити, що розрахунок швидкісних характеристик потребує відповідного методу дослідження.

Отже, метою даної статті є:

- розробити метод розрахунку довжини регенераційної ділянки СП SHDSL;
- дослідити за допомогою цього методу швидкісні характеристики СП SHDSL при роботі на з'єднувальних лініях СТМ;
- на основі отриманих швидкісних характеристик проаналізувати можливості застосування технології SHDSL для реконструкції СТМ.

Найбільш інформативною характеристикою для оцінки ефективності реконструкції є залежність швидкості передавання від довжини регенераційної ділянки – швидкісна характеристика. На з'єднувальних лініях СТМ, як правило, використовуються кабелі типу КСПП – 1 x 4 з діаметрами жил 0,64; 0,9 та 1,2 мм, тому швидкісні характеристики розраховуємо саме для цих типів кабелів.

У статті «Параллельная работа xDSL-модемной сети абонентского доступа» [3] наведено метод розрахунку довжини регенераційної ділянки для нестандартизованих симетричних технологій xDSL (SDSL, MSDSL), в яких застосовується такий самий, як і у SHDSL, тип лінійного кодування – PAM. Але аналіз результатів розрахунків за цим методом та порівняння їх з результатами, які наводять виробники обладнання SHDSL [2], показав, що для технології SHDSL цей метод непридатний (табл.

1). Якщо даний метод пристосувати для розрахунку довжини регенераційної ділянки без урахування перехідних завад, то отримані результати з певною достовірністю відповідають даним від виробників обладнання. Але наведений метод пропонується для розрахунків при паралельній роботі двох систем передачі, отримані результати при цьому для швидкостей передавання, більших за 2 Мбіт/с, помилкові, оскільки дуже суттєво розходяться з даними від виробників.

Тому постала задача розробити такий метод, який дозволить розраховувати довжину регенераційної ділянки без обмеження у швидкості передавання та типі лінійного кодування.

В основі розробленого методу лежить розрахунок залежності довжини регенераційної ділянки від швидкості передавання «по сумарному відношенню сигнал/завада». Суть методу полягає у наступному: при фіксованій швидкості передавання визначається така довжина регенераційної ділянки, за якої відношення сигнал/завада дорівнює мінімально припустимому відношенню сигнал/завада, що відповідає необхідній ймовірності помилки. Розрахунки проводилися при ймовірності помилки 10^{-7} .

Таблиця 1 – Порівняння розрахованої за методом [3] довжини регенераційної ділянки (км) з даними, наведеними виробниками обладнання SHDSL

Тип кабелю	Джерело інформації	Швидкість передавання R, Мбіт/с						
		1,024	2,048	4,096	5,704	8,1	11,4	15
КСПП – 1 x 4 x 1,2	Дані виробника:	17	12	8	7	5	3	2,5
	– розрахунок для 1 СП	14,9	9,9	6,4	5,2	4,1	2,8	2,2
	– розрахунок для 2 СП	13,2	8,2	4,6	0	0	0	0
КСПП – 1 x 4 x 0,9	Дані виробника:	16	11	7	6	4	2,7	2,3
	– розрахунок для 1 СП	12,2	8	5,2	4,3	3,3	2,3	1,8
	– розрахунок для 2 СП	10,9	6,9	2,9	0	0	0	0

Припустима захищеність залежить від припустимої ймовірності помилки, типу лінійного коду та кількості рівнів передачі даного коду. Для лінійного кодування PAM (Pulse Amplitude Modulation) припустима захищеність може бути розрахована за наступною формулою [3]:

$$A_{з, \text{прип}} = 10,65 + 11,42 \cdot \lg(-\lg(p_{\text{прип}})) + 20 \cdot \lg\left(\frac{n-1}{2}\right), \quad (1)$$

де $A_{з, \text{прип}}$ – припустима захищеність; $p_{\text{прип}}$ – припустима ймовірність помилки (розрахунки проводилися при ймовірності помилки 10^{-7}); n – кількість рівнів передачі сигналу PAM.

При розрахунку очікуваного відношення сигнал/завада (захищеності) крім адитивних завад (спектральна густина потужності (СПП) яких змінюється, як правило, в межах від -140 до -100 дБм/Гц) потрібно враховувати перехідні завади від «свого» передавача. Як відомо, в технології SHDSL для організації передавання цифрових потоків у двох напрямках по одній парі використовується ехокомпенсаційний метод, при цьому загасання ехокомпенсатора в робочій смузі частот складає звичайно близько 60 дБ та має частотну залежність. При розрахунках враховувалося, що загасання ехокомпенсатора в робочій смузі частот змінюється в межах 55...65 дБ за логарифмічним законом з максимумом на частоті 1 кГц. Також враховувався шум-фактор підсилювача-коректора (3 дБ) і вигравш від трелісного (гратчастого) кодування (6 дБ).

Технологія SHDSL, на відміну від ІКМ-30, використовує двопроводову схему двостороннього зв'язку, тому в одночетвірковому кабелі КСПП можуть одночасно працювати дві системи SHDSL. При цьому в розрахунку очікуваного відношення сигнал/завада (захищеності) потрібно враховувати заваду, яка виникає під час паралельної роботи двох систем передачі. З урахуванням того, що в технології SHDSL передавання цифрових потоків у двох напрямках здійснюється в одній смузі частот, тому необхідно враховувати перехідну заваду на ближньому (NEXT) та далекому (FEXT) кінцях.

У рекомендації MCE-T G.991.2 наведені технічні характеристики технології SHDSL для роботи зі швидкостями до 5696 кбіт/с та лінійним кодуванням TC PAM-16/32. Але деякі виробники xDSL вже пропонують обладнання, яке підтримує передавання цифрових потоків зі швидкістю до 15 Мбіт/с та лінійним кодуванням до TC PAM-128, при цьому тактова частота лінійного сигналу обмежена значенням 2,5 МГц, тобто для TC PAM-16 максимальна швидкість дорівнює 7,5 Мбіт/с, для TC PAM-32 – 10 Мбіт/с, TC PAM-64 – 12,5 Мбіт/с та TC PAM-128 – 15 Мбіт/с.

Розрахунки проводилися при номінальній СПП сигналу, формула якої наведена в рекомендації MCE-T G.991.2 [4]. Коефіцієнти загасання кабелів КСПП – 1 x 4 x 0,64 (0,9 та 1,2 мм)

розраховувалися за формулою (5.78) з [5], а значення перехідних загасань на ближньому та далекому кінцях визначалися з [6].

З урахуванням вищезазначених факторів визначаються сумарні потужність сигналу та потужність завади на вході приймача та, відповідно, відношення сигнал/завада (очікувана захищеність). За робочу прийнята смуга частот від 1 кГц до тактової частоти лінійного сигналу (наприклад, для швидкості передавання 2320 кбіт/с та лінійного кодування ТС РАМ-16 це 776 кГц).

На рис. 1 наведені розраховані залежності швидкості передавання від довжини регенераційної ділянки для технології SHDSL при роботі по одній парі кабелю КСПП – 1 x 4 з діаметром жил 1,2 мм та СГП завад –140 дБм/Гц для різних типів кодування ТС РАМ.

Швидкість передавання SHDSL залежить не тільки від довжини регенераційної ділянки, а й від типу лінійного кодування. Як сказано вище, чим вище рівень кодування, тим більша максимально припустима швидкість передавання, це пов'язано з тим, що за одну послілку передається більше біт інформації (так для 16-рівневої ТС РАМ передаються три інформаційні біти та один додатковий (призначений для треліс-кодування), для ТС РАМ-32 – 4 + 1 біт, ТС РАМ-64 – 5 + 1 біт та ТС РАМ-128 – 6 + 1 біт), тому при малій довжині регенераційної ділянки найбільшу швидкість забезпечує саме ТС РАМ-128. При збільшенні довжини настає такий момент, коли швидкість починає зменшуватися, така довжина регенераційної ділянки відповідає рівності очікуваної та припустимої захищеності (відношення сигнал/завада) для максимальної швидкості. Очікувана захищеність залежить від СГП сигналу на виході передавача, характеристик лінії (коефіцієнт загасання) та завад (СГП адитивної завади та завади, яку створює «свій» передавач на приймальному кінці – «ехо»). Зі збільшенням довжини ділянки очікувана захищеність стрімко зменшується. Припустима захищеність залежить від припустимої ймовірності помилки та кількості точок сигнального сузір'я (ТСС) лінійного коду, для ТС РАМ-128 це 128 рівнів. При фіксованій ймовірності помилки (10^{-7}) чим більше ТСС, тим більша припустима захищеність.

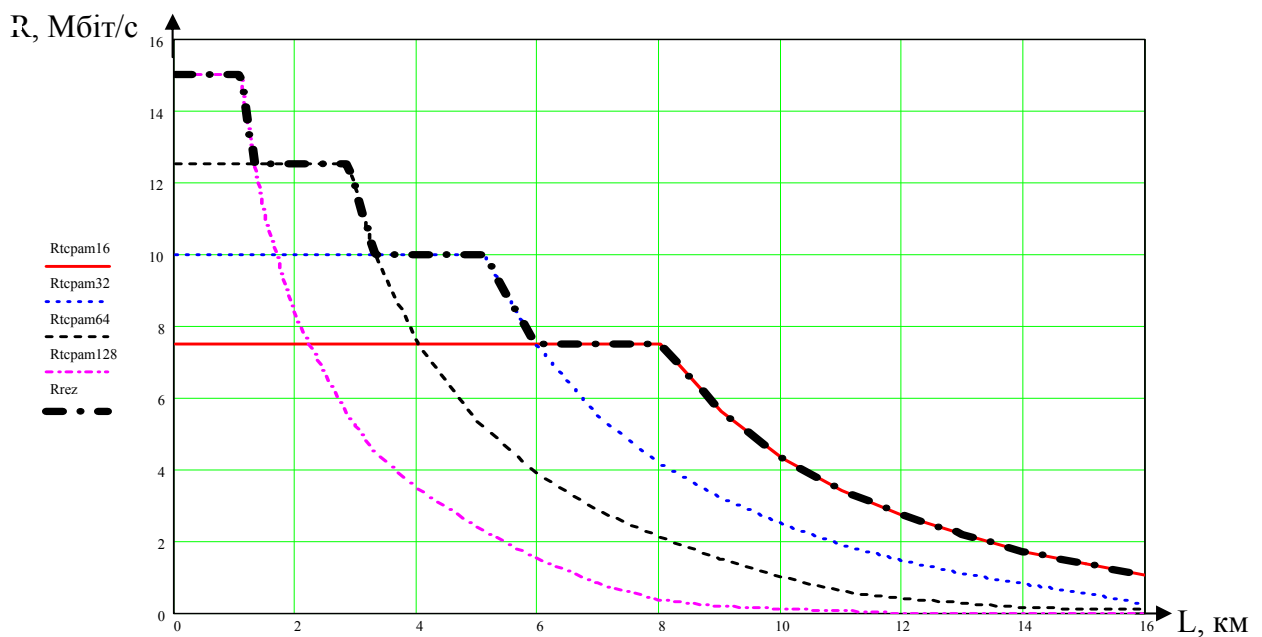


Рисунок 1 – Залежність швидкості передавання SHDSL від довжини лінії при роботі по одній парі кабелю КСПП – 1 x 4 x 1,2 та СГП завад -140 дБм/Гц

Якщо порівняти довжину регенераційної ділянки при фіксованій швидкості передавання, наприклад, 6 Мбіт/с для різних типів лінійного кодування, то побачимо, що найкращий результат дає кодування з меншою кількістю рівнів. Це пов'язане з тим, що зменшення кількості ТСС призводить до зменшення припустимої захищеності, хоча розширення спектра сигналу, що відбувається при зменшенні кількості ТСС, зменшує й очікувану захищеність, але це зменшення не таке суттєве.

На практиці, для лінії заданої довжини доцільно обирати той тип лінійного кодування, який забезпечує найбільшу швидкість передавання, на рис. 1 результуючий графік залежності швидкості передавання від довжини регенераційної ділянки показано жирною штрих-пунктирною лінією. Цей графік має вигляд ламаної лінії, кожна «сходинка» графіка зумовлена переходом від одного рівня ТС

РАМ до іншого. Далі в результатах розрахунків будемо наводити тільки результуючий графік максимальної швидкості.

Порівняння отриманих результатів з результатами, які наводять виробники обладнання SHDSL [2], доводить достовірність розробленого методу як при дослідженні швидкісних характеристик однієї СП SHDSL (у випадку відсутності перехідних завад), так і при дослідженні швидкісних характеристик СП SHDSL, що працює в одному кабелі КСПП паралельно (одночасно) з іншою СП SHDSL, яка призводить до перехідних впливів на досліджувану СП SHDSL (табл. 2).

Таблиця 2 – Порівняння розрахованої за розробленим методом довжини регенераційної ділянки (км) з даними, наведеними виробниками обладнання SHDSL

Тип кабелю	Джерело інформації	Швидкість передавання R, Мбіт/с						
		1,024	2,048	4,096	5,704	8,1	11,4	15
КСПП – 1 x 4 x 1,2	Дані виробника	17	12	8	7	5	3	2,5
	розрахунок для 1 СП	16,1	13,2	10,2	8,9	5,7	3,1	1
	розрахунок для 2 СП	15,2	12	8,8	7,4	4,35	1,6	0,1
КСПП – 1 x 4 x 0,9	Дані виробника	16	11	7	6	4	2,7	2,3
	розрахунок для 1 СП	13,1	10,8	8,3	7,3	4,6	2,5	0,8
	розрахунок для 2 СП	12,4	9,8	7,2	6	3,55	1,4	0,1

На рис. 2 (а, б, в) надані розрахунки швидкісних характеристик SHDSL при роботі однієї системи передачі (тобто без перехідних завад) по кабелю КСПП – 1 x 4 з діаметром жил відповідно 1,2; 0,9 та 0,64 мм; на рис. 3 (а, б, в) – при паралельній роботі двох систем передачі SHDSL (тобто з урахуванням перехідних завад на ближньому та далекому кінцях).

Результати показують, що адитивна завада із СГП не більше -120 дБм/Гц суттєво не впливає на розрахунок швидкості, тому що вона менша за заваду, яку створює «свій» передавач. Обмеження швидкості передавання за рахунок адитивної завади починає проявлятися при СГП, більшій за -110 дБм/Гц. При роботі двох систем передачі SHDSL, наявність перехідних завад на ближньому та далекому кінцях призводить до зменшення швидкості передавання приблизно на 20 %.

Якщо порівнювати можливості SHDSL з ІКМ-30, то для передавання потоку Е1, в залежності від рівня адитивної завади, виграш по довжині регенераційної ділянки складає 2...3 рази, а при роботі на стандартних для ІКМ-30 довжинах регенераційної ділянки виграш по швидкості передавання складає 3,5...5 разів, якщо застосовується одна СП (табл. 3). Робота одночасно двох систем дозволяє збільшити сумарну швидкість передавання по кабелю КСПП – 1 x 4 приблизно у 1,6 разів, що дає виграш порівняно з ІКМ-30 – 6,7...8 разів (табл. 4).

Таблиця 3 – Результати розрахунків швидкості передавання СП SHDSL при роботі по одній парі кабелю КСПП на стандартних довжинах регенераційної ділянки ІКМ-30, Мбіт/с

Довжина регенераційної ділянки ІКМ-30С, км	Тип кабелю	СГП завад, дБм/Гц				
		-140	-130	-120	-110	-100
4,4	КСПП-1x4x1,2	10	10	10	9,85	7,48
3,6	КСПП-1x4x0,9	10	10	10	9,85	7,5
2,8	КСПП-1x4x0,64	10	10	10	9,8	7,42

Таблиця 4 – Результати розрахунків швидкості передавання СП SHDSL при паралельній роботі двох систем по кабелю КСПП на стандартних довжинах регенераційної ділянки ІКМ-30, Мбіт/с

Довжина регенераційної ділянки ІКМ-30С, км	Тип кабелю	СГП завад, дБм/Гц				
		-140	-130	-120	-110	-100
4,4	КСПП-1x4x1,2	8	8	7,9	7,5	6,82
3,6	КСПП-1x4x0,9	8,05	8,05	7,95	7,5	6,8
2,8	КСПП-1x4x0,64	7,9	7,9	7,8	7,5	6,7

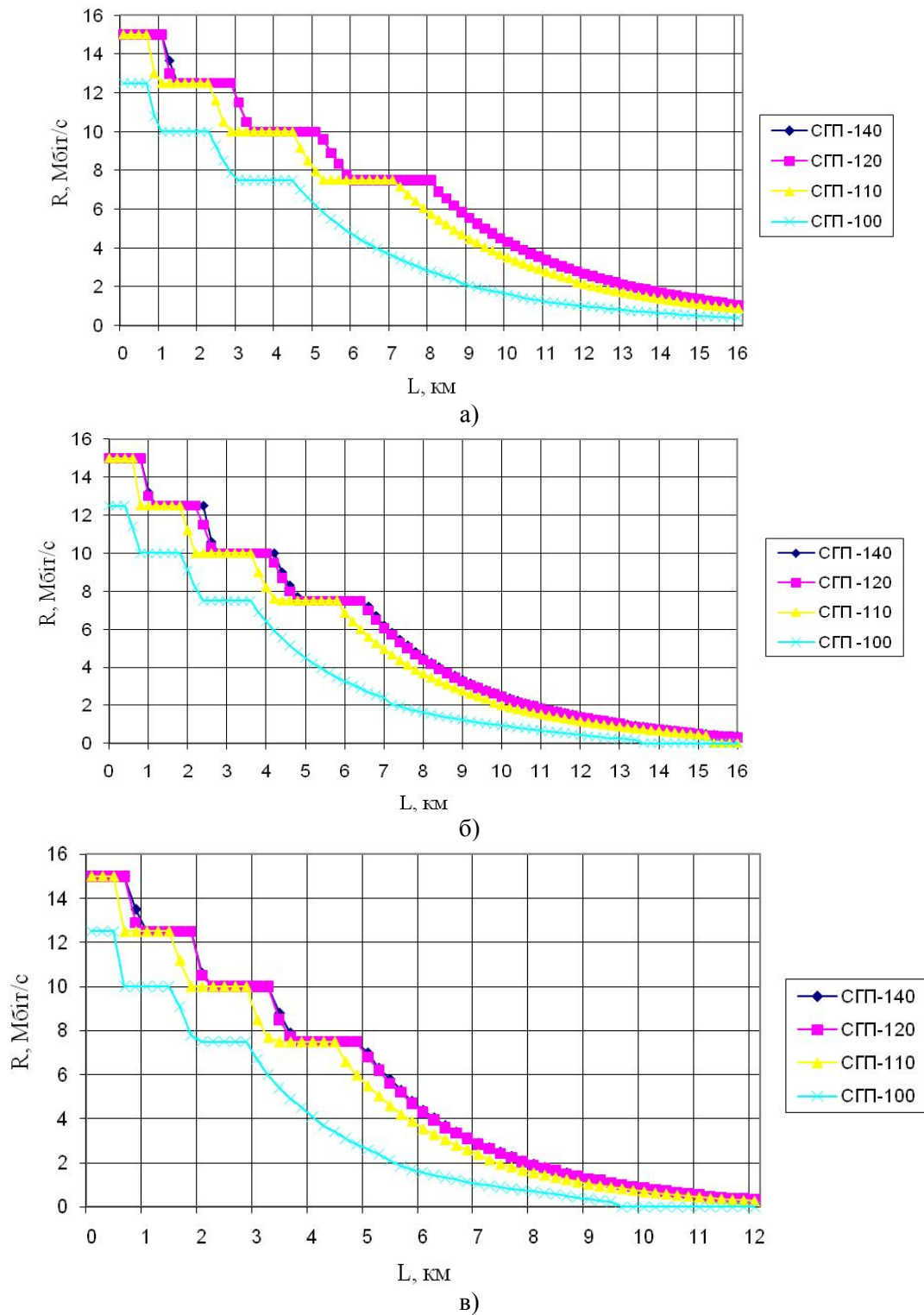


Рисунок 2 – Швидкісні характеристики СП SHDSL без перехідних завод при роботі по кабелю КСПП – 1 x 4 з діаметром жил: 1,2 (а); 0,9 (б); 0,64 мм (в)

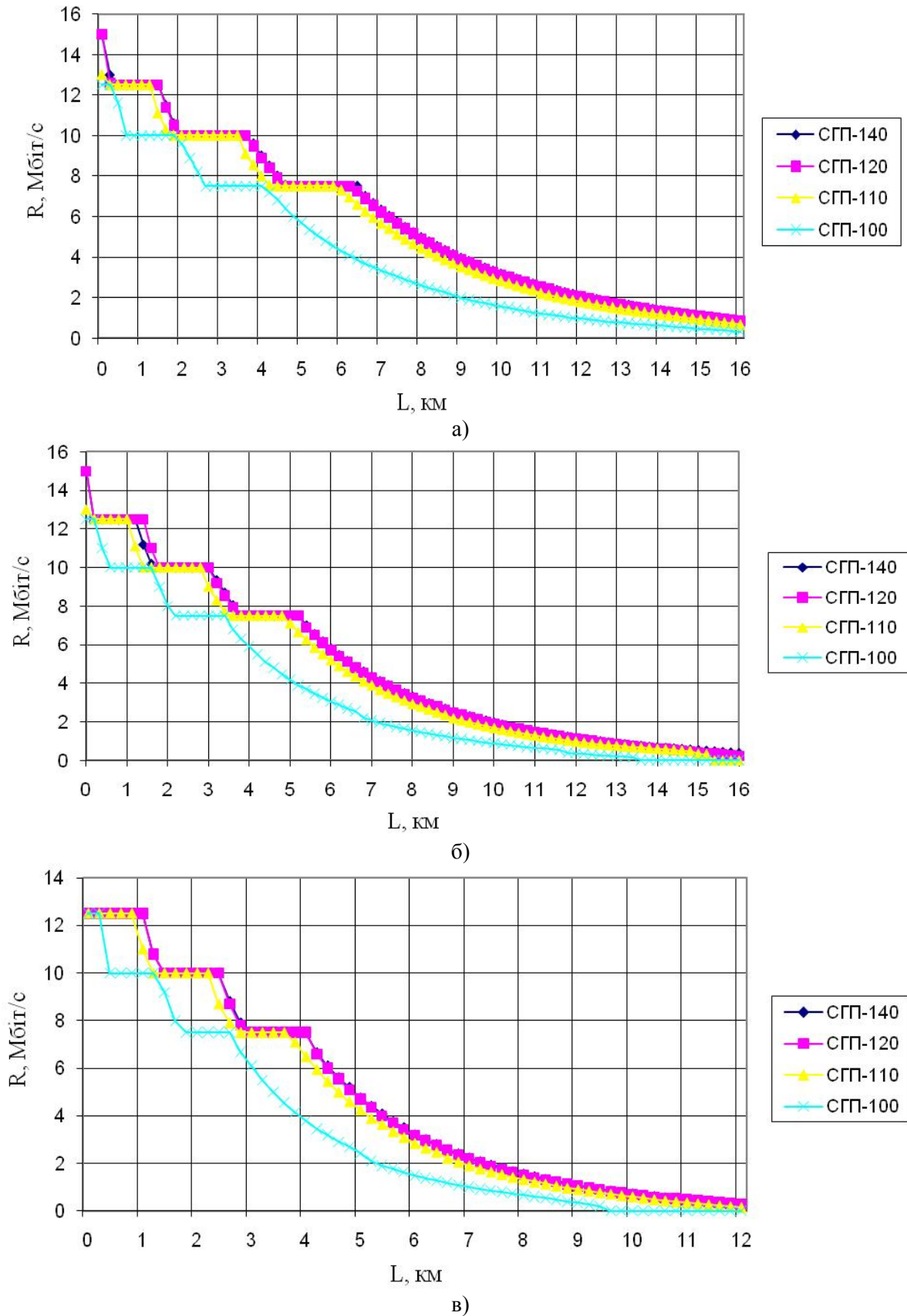


Рисунок 3 – Швидкісні характеристики SHDSL при паралельній роботі двох СП по кабелю КСПП – 1 x 4 з діаметром жил: 1,2 (а); 0,9 (б); 0,64 мм (в)

Якщо враховувати той факт, що на сільській мережі майже відсутні зовнішні джерела завад, то СГП адитивної завади можна вважати близькою до рівня теплових шумів – мінус 140 дБм/Гц. Отже, впровадження технології SHDSL дозволяє збільшити досяжну швидкість передавання з'єднувальними лініями у вісім разів (до 16 Мбіт/с), замінивши лише станційне обладнання та регенератори на НРП (регенераційних пунктах, що не обслуговуються).

Порівняння результатів розрахунків за запропонованим методом з даними від виробників обладнання SHDSL доводить достовірність цього методу. Аналіз результатів дослідження швидкісних характеристик СП SHDSL показує, що при роботі однієї СП основним обмежуючим фактором є завада, яку створює «свій» передавач через обмеженість загасання ехокомпенсатора. При паралельній роботі двох систем також суттєвий внесок у сумарну заваду дає перехідна завада на ближній кінець (NEXT). Отримані результати дозволяють зробити висновок про доцільність реконструкції СТМ за допомогою технології SHDSL. Така реконструкція дозволить подолати «цифровий розрив» в Україні з мінімальними витратами та у стислі терміни.

У висновку зазначимо, що у статі розроблено метод розрахунку довжини регенераційної ділянки СП SHDSL, досліджено швидкісні характеристики СП SHDSL при роботі на з'єднувальних лініях СТМ та здійснено аналіз можливостей застосування технології SHDSL для реконструкції СТМ.

Література

1. Стан розвитку зв'язку в Україні за 2006 рік. //Статистичний бюлетень. – К., 2007.
2. Петрук А.Ю. Модемы Gion3 семейства FlexDSL для построения транспортных сетей / А.Ю. Петрук // Зв'язок.– 2011.– № 3.
3. Мамедов Г.А. Параллельная работа xDSL-модемной сети абонентского доступа. / Г.А. Мамедов, Т. М. Мансуров, Э.Т. Мансуров // Электросвязь.– 2011.– № 2.
4. Рекомендація ІТУ-Т МСЕ-Т G.991.2 Single-pair high-speed digital subscriber line (SHDSL) transceivers (Прийомопередавачі однопарної високошвидкісної цифрової абонентської лінії (SHDSL));
5. Гроднев И.И. Линии связи. / И.И. Гроднев, С.М. Верник – М.: Радио и связь, 1988.–544 с.
6. Парфенов Ю.А. Кабели электросвязи. / Ю.А. Парфенов – М. Эко-Трендз, 2003. –256 с.