

УДК 621.395

ОЦІНКА ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ЦИФРОВИХ АБОНЕНТСЬКИХ ЛІНІЙ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ G.FAST

Балашов В.О., Орешков В.І., Молога В.М.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1.
bva@oniis.org.ua, oreshkov_vi@mail.ru, vmologa@gmail.com*

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВЫХ АБОНЕНТСКИХ ЛИНИЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ G.FAST

Балашов В.А., Орешков В.И., Молога В.Н.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
bva@oniis.org.ua, oreshkov_vi@mail.ru, vmologa@gmail.com*

EVALUATION OF DIGITAL SUBSCRIBER LINE TRANSMISSION RATE USING G.FAST TECHNOLOGY

Balashov V.A., Oreshkov V.I., Mologa V.N.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kovalska St., Odessa, 65029, Ukraine.
bva@oniis.org.ua, oreshkov_vi@mail.ru, vmologa@gmail.com*

Анотація. Удосконалено метод оцінки некомпенсованої перехідної завади при застосуванні системи «векторинг». Надані результати практичного вимірювання частотних параметрів кабелю ТППеп-10х2х0,4 у діапазоні частот до 100 МГц та виконана їх апроксимація, результати якої були використані для дослідження характеристик системи передачі за технологією G.fast. За вторинними параметрами кабелю ТППеп-10х2х0,4 були визначені імпульсні реакції каналу передачі СП G.fast довжиною до 150 м та розраховано розподіл інтерференції по каналах СП G.fast. Оцінено досяжні швидкості передавання СП G.fast при роботі по багатопарному телефонному кабелю ТППеп-10х2х0,4 з урахуванням інтерференційних і перехідних завод та з використанням системи компенсації перехідних завод «векторинг».

Ключові слова: технологія G.fast, система передачі, швидкість передавання, інтерференційні завади, перехідні завади, система «векторинг», багатопарний телефонний кабель.

Аннотация. Усовершенствован метод оценки некомпенсированной переходной помехи при применении системы «векторинг». Представлены результаты практического измерения частотных параметров кабеля ТППэп-10х2х0,4 в диапазоне частот до 100 МГц и выполнена их аппроксимация, результаты которой были использованы для исследования характеристик системы передачи по технологии G.fast. По вторичным параметрам кабеля ТППэп-10х2х0,4 были определены импульсные реакции канала передачи СП G.fast длиной до 150 м и рассчитано распределение интерференции по каналам СП G.fast. Оценены достижимые скорости передачи СП G.fast при работе по многопарному телефонному кабелю ТППэп-10х2х0,4 с учетом интерференционных и переходных помех и с использованием системы компенсации переходных помех «векторинг».

Ключевые слова: технология G.fast, система передачи, скорость передачи, интерференционные помехи, переходные помехи, система «векторинг», многопарный телефонный кабель.

Abstract. Evaluation method of uncompensated crosstalk when using the "vectoring" system is improved. The practical measurement results of the frequency characteristics of the ТППэп-10х2х0,4 cable in the frequency range up to 100 MHz are presented and their approximation is performed, the results of

which were used to study the characteristics of the G.fast technology transmission system. Impulse response of the G.fast TS transmission channel length of up to 150 m from the secondary parameters of the ТППеп-10x2x0,4 cable is determined and for the interference distribution on G.fast TS channels is calculated. Achievable transmission rate of G.fast TS when working on multi-pair telephone ТППеп-10x2x0,4 cable considering interference and crosstalk, and using "vectoring" compensation crosstalk system is estimated.

Key words: G.fast technology, transmission system, transmission rate, interference, crosstalk, «vectoring», multi-pair telephone cable.

Технологія цифрових абонентських ліній (АЛ) G.fast мереж широкопasmового доступу (ШД) призначена для збереження існуючих телефонних кабелів усередині будівель при побудові мереж ШД FTTx, забезпечивши при цьому високі швидкості передавання, які можна порівняти з повністю оптичними мережами ШД FTTH.

Технологія G.fast – це подальший розвиток технології VDSL2, оптимізована для коротких відстаней, що передбачає підключення по мідному багатопарному телефонному кабелю 10...30 абонентів зі швидкістю до 1 Гбіт/с [1]. Таке збільшення швидкості передавання по мідних багатопарних телефонних кабелях досягається за рахунок розширення частотного діапазону до 106 або 212 МГц [2]. При цьому постають певні задачі, що потребують розв'язання.

По-перше, значне власне загасання телефонного кабелю на високих частотах може призводити до обмеження довжини АЛ, за якої є доцільним застосування систем передачі (СП) G.fast, а тому за певного збільшення довжини лінії СП G.fast втрачатиме свої переваги у швидкості перед СП VDSL2.

По-друге, перехідне загасання між парами багатопарного телефонного кабелю, що має частотнозалежний характер, буде призводити до значних перехідних завад на високих частотах при паралельній роботі таких СП. Причому, перехідне загасання на дальній кінець має ще й залежність від довжини АЛ, тому рівень перехідних завад на дальній кінець (ПЗ ДК, які переважають в асиметричних СП xDSL, що використовують паралельний спосіб передавання інформації з використанням множини ортогональних гармонічних сигналів-носіїв (ОГС) [3]), буде збільшуватися зі зменшенням довжини лінії. Отже, при паралельній роботі СП G.fast по багатопарному телефонному кабелю спостерігатиметься значне зменшення швидкості передавання по кожній з них.

По-третє, широка смуга частот обумовлюватиме значні лінійні спотворення сигналу та наявність інтерференційних завад, а значна кількість каналів посилюватиме цю проблему (у СП xDSL з DMT необхідно враховувати міжсимвольну та міжканальну інтерференцію [3]). Отже, при великій довжині лінії інтерференційні завади також можуть призводити до зменшення швидкості передавання СП G.fast.

Із вищезазначеного можна дійти висновку, що G.fast – це нова технологія ШД телефонними абонентськими лініями, яка потребує детального дослідження.

Отже, дослідження характеристик цифрових АЛ за технологією G.fast з використанням вітчизняних телефонних кабелів та визначення можливих варіантів організації ШД FTTx+G.fast є актуальним.

Метою даної статті є оцінка швидкості передавання СП G.fast при роботі багатопарними кабелями телефонної мережі загального користування з урахуванням впливу перехідних та інтерференційних завад, а також дослідження ефективності застосування системи «векторінг» для компенсації перехідних завад у СП G.fast.

Підхід до оцінки швидкості передавання СП ОГС з урахуванням адитивного гауссівського шуму, перехідних та інтерференційних завад детально розглядався у роботі [4]. Використаємо його як основу, це дасть змогу оцінити вплив перехідних та інтерференційних завад на досяжні швидкості передавання СП G.fast.

Слід зауважити, що дослідження характеристик СП VDSL2, яке проводилося у [5], показало суттєве обмеження ПЗ ДК досяжної швидкості передавання на АЛ довжиною менше 1 км. Тому для впровадження технології G.fast необхідно розробити ефективну систему боротьби з перехідними завадами. МСЕ-Т була розроблена Рекомендація G.993.5, яка регламентує характеристики системи компенсації перехідних завад, що отримала назву «векторинг» (vectoring) (див. рис. 1) [6]. Моделювання системи «векторинг» розглядалося у роботі [7], але виведені формули розрахунку некомпенсованої ПЗ ДК справедливі лише для випадку роботи двох СП. Удосконалимо цей метод розрахунку для визначення некомпенсованої ПЗ ДК у СП з векторингом при роботі більш ніж двох СП.

Алгоритм роботи системи «векторинг» включає: вимірювання ПЗ між паралельно працюючими у багатопарному кабелі СП та їх компенсації шляхом внесення відповідних поправок у сигнали, що передаються (попереднє кодування, передкодування, pre-coding). Основним блоком системи «векторинг» є блок розрахунку сигналів передкомпенсації (VCE – Vectoring Control Entity).

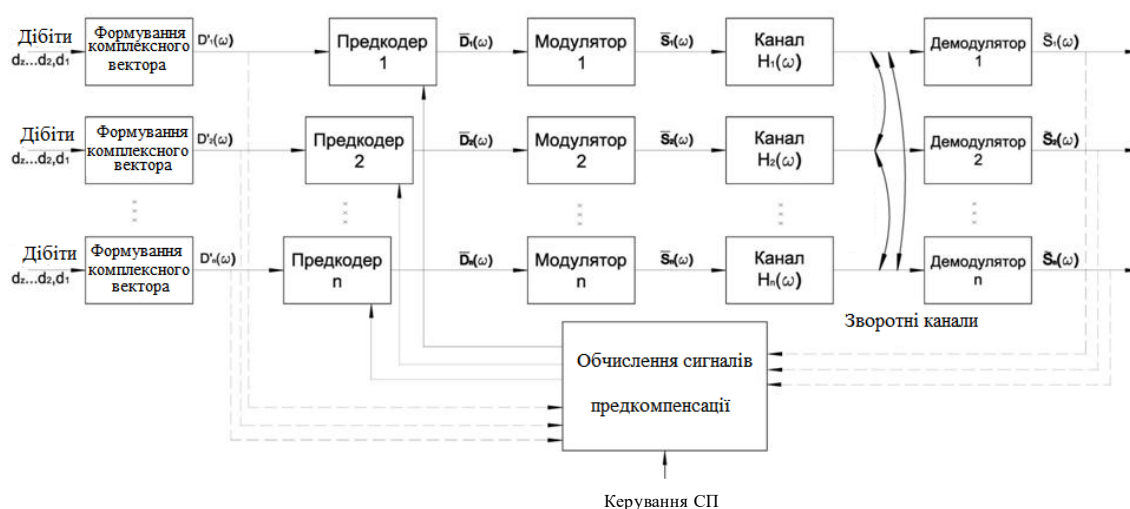


Рисунок 1 – Структурна схема системи «векторинг»

У режимі настроювання кожний з передавачів по чергові передає випробувальний сигнал відомої амплітуди та форми. Приймачі всіх СП приймають як свій сигнал, так і перехідні сигнали від паралельно працюючих СП. Результатом є формування матриці передатних функцій $H_{l,m}$, в якій елементи рядків є перехідними передатними функціями (ППФ) між відповідними СП, а елементи головної діагоналі є власними передатними функціями (ВПФ) лінії зв'язку:

$$H_{l,m} = \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & \dots & H_{1,n} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & \dots & H_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{n,1} & H_{n,2} & \dots & H_{n,n} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де $l, m = 1, 2, \dots, n$; n – число СП; l – номер СП, підданої впливу; m – номер СП, що впливає; $H_{l,m}$ – передатна функція між лініями l та m .

Якщо активується нова СП, тоді знову вмикається режим настроювання та розраховується нова матриця $H_{l,m}$. При деактивації СП достатньо з матриці видалити відповідні рядок та стовпчик.

Перехідна завада $NFext_l$ на вході приймача СП- l при відомих на передачі СП- m сигналах S_m визначається:

$$NFext_l = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^n NFext_{l,m} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^n S_m \cdot H_{l,m}, \quad (2)$$

де S_m – спектр сигналу на передачі СП, що впливає.

У робочому режимі VCE на кожному такті за матрицею (1) та відомими на передачі сигналами S_m з урахуванням (2) розраховує сигнали компенсації C_l для всіх n СП:

$$C_l = \frac{\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^n S_m \cdot H_{l,m}}{H_l}, \quad (3)$$

де H_l – власна передатна функція лінії l .

Сигнали компенсації C_l у передавачі додаються (з протилежним відносно завади знаком) до інформаційних сигналів S_l та результуючі сигнали передаються каналом зв'язку. Таким чином, попередньо спотворений сигнал подавить перехідні завади від інформаційних сигналів інших СП. Але сигнали компенсації також є джерелом ПЗ, які не будуть скомпенсовані, тому повністю подавити ПЗ неможливо принципово.

Визначимо некомпенсовану перехідну заваду, що породжена попередньо спотвореними системою «векторинг» сигналами.

Передавач кожної з n СП з урахуванням сигналів компенсації (3), розрахованих системою «векторинг» VCE, формує сигнал S^v_l . Для СП- l :

$$S^v_l = S_l - C_l = S_l - \frac{\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^n S_m \cdot H_{l,m}}{H_l}. \quad (4)$$

На вхід приймача СП- l надходить сигнал (4) помножений на ВПФ H_l лінії l та ПЗ від інших $(n-1)$ СП, які визначаються також за (4) помноженої на відповідні ППФ $H_{l,m}$:

$$S^v \sim_l = S^v_l \cdot H_l + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^n S^v_m \cdot H_{l,m} = S_l \cdot H_l - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n \frac{S_k \cdot H_{m,k}}{H_m} \cdot H_{l,m}. \quad (5)$$

Друга складова формули (5) визначає некомпенсовану перехідну заваду, що породжена попередньо спотвореними системою «векторинг» сигналами:

$$NFext^v_l = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n \frac{S_k \cdot H_{m,k}}{H_m} \cdot H_{l,m}, \quad (6)$$

де $NFext^v_{l,m} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n \frac{S_k \cdot H_{m,k}}{H_m} \cdot H_{l,m}$ – ПЗ на вході приймача СП- l при відомому на передачі СП- m сигналу компенсації C_m .

Скориставшись формулами (2) та (6) можна оцінити ефективність застосування системи «векторинг» для придушення перехідних завад.

У загальному вигляді формула (7) достатньо громіздка, але в певних випадках її можна спростити. Найпростішим є випадок, коли СП xDSL мають однакову потужність передавачів $S = S_l$ та АЛ у багатопарному кабелі мають однакові власні $H = H_l$ і перехідні $HFext = H_{l,m}$ передатні функції, наприклад, випадок застосування СП G.fast на кабелі ТПП-10x2 пучкового скручення. У цьому випадку (2) та (6) відповідно набувають виду:

$$NFext_l = (n-1) \cdot S \cdot HFext; \quad (7)$$

$$NFext^v_l = \frac{(n-1)^2 \cdot S \cdot HFext^2}{H}, \quad (8)$$

де n – загальна кількість СП G.fast; S – потужність сигналу на виході передавачів кожної з n СП; H – ВПФ ліній багатопарного кабелю; H_{Fext} – ППФ між лініями багатопарного кабелю.

Параметри СП та кабелю надаються у логарифмічних величинах (у дБ, дБп/Гц і т.п.), тому необхідно у вищезазначених формулах замість потужності сигналу використовувати спектральну густину потужності (СП) сигналу, замість власної передатної функції – власне загасання лінії, замість перехідної передатної функції – перехідне загасання на дальньому кінці. А з урахуванням того, що перехідне загасання на дальньому кінці $Al(i)$ можна виразити через захищеність від ПЗ ДК $A_{з\text{ДК}}(i)$ та загасання лінії $A_{\text{АЛ}}(i)$ [8], формули (7)...(8) відповідно набувають виду:

$$\begin{aligned} Gnl(i) &= Gs(i) - Al(i) + 10\lg(n-1) = \\ &= Gs(i) - A_{з\text{ДК}}(i) - A_{\text{АЛ}}(i) + 10\lg(n-1) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Gnl^v(i) &= Gs(i) - 2 \cdot Al(i) + A_{\text{АЛ}}(i) + 20\lg(n-1) = \\ &= Gs(i) - 2 \cdot A_{з\text{ДК}}(i) - A_{\text{АЛ}}(i) + 20\lg(n-1) \end{aligned} \quad (10)$$

де $Gnl(i)$ – рівень СП перехідної завади на дальньому кінці без застосування системи «векторинг»; $Gs(i)$ – рівень СП сигналу на виході передавача; $Gnl^v(i)$ – рівень СП перехідної завади на дальньому кінці із застосуванням системи «векторинг».

Використання формули (10) у методиці [4] дозволить розрахувати швидкість передавання СП G.fast з урахуванням роботи системи компенсації перехідних завад «векторинг».

Визначимо вихідні дані для дослідження характеристик цифрових АЛ за технологією G.fast з використанням вітчизняних телефонних кабелів.

Параметри СП G.fast відповідають Рек. G.9701 МСЕ-Т [2], а саме:

- план частот до 106 МГц;
- основна частота (відстань між несучими частотами каналів) – 51,75 кГц;
- для забезпечення електромагнітної сумісності з СП ADSL2+ використовуються канали – 39...2047;
- кількість відліків інтервалу ортогональності – 4096;
- кількість відліків захисного інтервалу – 256.

СП адитивного гауссівського шуму приймалася рівною мінус 140 дБп/Гц.

Завантаження кабелю системами передавання – 100 %.

У відповідності з параметрами СП G.fast для проведення дослідження необхідно знати вторинні параметри та перехідні загасання телефонних кабелів у діапазоні частот не менше за 100 МГц, а у довідниках надаються значення максимум до 12 МГц [8]. Для розв'язання цієї задачі у ПАТ «Одескабель» за допомогою вимірювальної системи AESA (Швейцарія) були проведені вимірювання загасання, фази, перехідного загасання на ближньому та захищеності на дальньому кінці відрізка кабеля ТППзп-0,4 довжиною 143 м у діапазоні частот від 1 до 100 МГц (див. табл. 1) з подальшою апроксимацією цих параметрів у смузі частот 0...106 МГц (визначення амплітудно-частотної характеристики – $\alpha(f)$; фазочастотної характеристики – $\varphi(f)$ та частотної залежності захищеності на дальньому кінці – $A_{з\text{ДК}}(f)$).

Для дослідження характеристик технології G.fast, крім частотних характеристик кабелю, важливо визначити і часові характеристики. Зокрема, для дослідження інтерференційних завад та оцінки їх впливу на швидкість передавання СП G.fast потрібно визначити імпульсну реакцію (ІР). Визначення ІР, при відомих АЧХ і ФЧХ, полягає у використанні зворотного перетворення Фур'є [3].

Таблиця 1 – Усереднені значення параметрів передачі кабелю ТППеп-10х2х0,4 в діапазоні частот від 1 до 100 МГц перераховані на довжину кабелю 100 м

Частота, МГц	Загасання, дБ/100 м	Фаза, рад/100 м	Модуль хвильового опору, Ом	Перехідне загасання на ближньому кінці, дБ/100 м	Захищеність на дальньому кінці, дБ/100 м
1	2,19	3,259	115,3	64,04	71,1
5	4,5	12,57	114,3	52,44	59,15
10	6,96	30,965	115	47,18	48,98
15	8,98	50,478	109,4	43,80	44,48
20	10,18	61,428	116,7	42,32	40,21
30	13,42	93,658	121,4	39,19	37,02
60	20,96	186,123	147,7	34,53	30,1
100	27,04	303,542	188,4	31,8	24,98

На рис. 2 наведено розрахунки ІР для СП G.fast з робочим діапазоном частот каналу до 106 МГц при довжині кабелю ТППеп-10х2х0,4 50, 100 і 150 м, де k – номер відліку ІР, а $g(k)$ – його амплітуда.

На рис. 3 надано результати розрахунку інтерференції (відсоткового співвідношення ефективних значень сигналу до інтерференційної завади $h(i)$ %, де i – номер каналу) при довжині кабелю 50, 100 і 150 м.

Отримані результати розрахунку інтерференції дають змогу оцінити вплив інтерференційних завади на швидкість передавання СП G.fast.

За методикою [4] з урахуванням (10) та результатами розрахунку інтерференції проведено дослідження характеристик G.fast при роботі по кабелю ТППеп-10х2х0,4

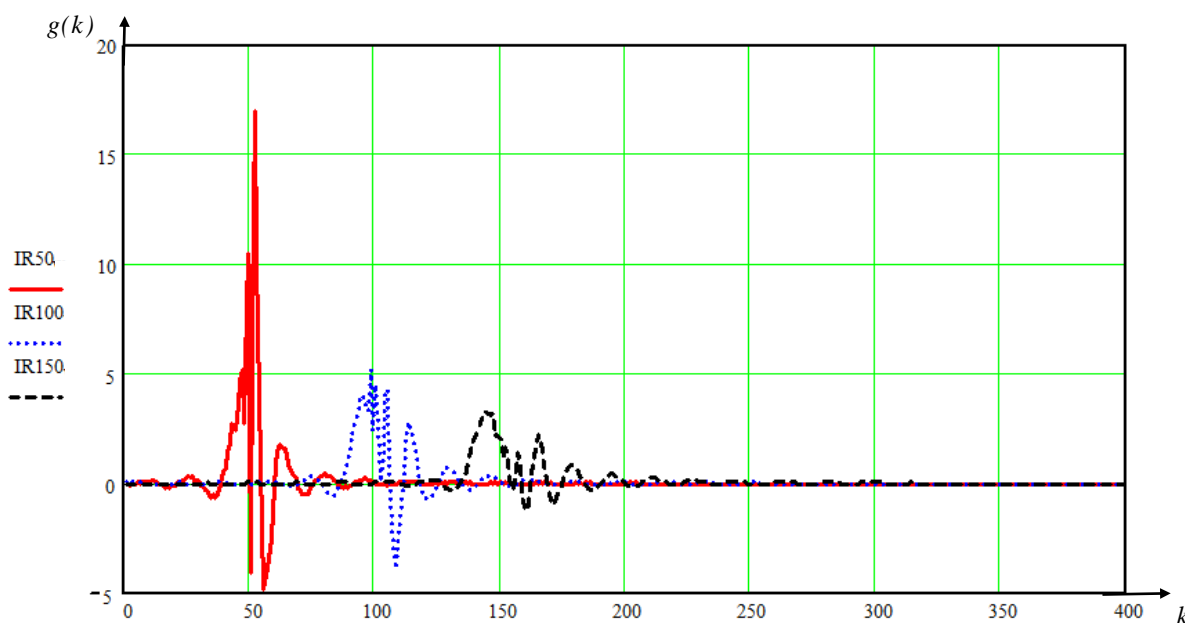


Рисунок 2 – Імпульсні реакції каналу передачі СП G.fast при роботі по кабелю ТППеп-10х2х0,4

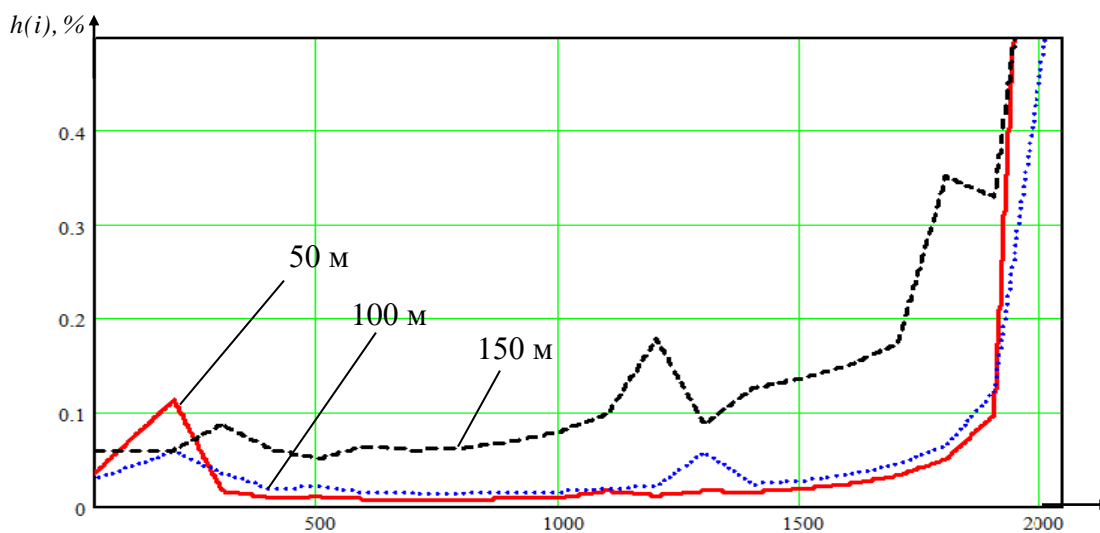


Рисунок 3 – Розподіл інтерференції по каналах СП G.fast

У табл. 2 та на рис. 4 надано результати розрахунку швидкості передавання СП G.fast з урахуванням інтерференційних та перехідних завад, а також використання системи «векторинг».

За результатами розрахунків можна зробити наступні висновки:

- інтерференційні завади суттєво не впливають на швидкість передавання, це пов'язано з тим, що при довжині АЛ меншої за 200 м тривалість ІР менша за тривалість захисного інтервалу СП G.fast (див. рис. 2);
- для СП G.fast перехідні завади є основною причиною зменшення швидкості передавання і на таких коротких лініях (менших за 250 м) це виявляється ще яскравіше ніж для СП VDSL2, так при 100-відсотковому завантаженні 10-парного кабелю швидкість передавання зменшується у 2,5...3,3 раза;

Таблиця 2 – Швидкість передавання СП G.fast, Мбіт/с

Довжина лінії, м	R_0	R_{int}	R_{xt}	R_v	$R_{\Sigma xt}$	$R_{\Sigma v}$
25	1157	1156	453,7	1090	453,7	1090
50	1143	1137	367,3	992,83	367,2	992,83
75	1056	1054	320,06	915,55	320,02	915,36
100	938,11	937,92	291,31	839,14	291,26	838,99
125	811,73	811,63	263,14	756,67	263,09	756,58
150	689,14	688,99	239,33	662,78	239,28	662,64

Примітка. На рисунках та у таблицях використовуються наступні позначення: R_0 – швидкість передавання розрахована без урахування завад (враховується тільки тепловий шум – мінус 140 дБн/Гц); R_{int} – швидкість передавання, розрахована з урахуванням тільки інтерференційних завад; R_{xt} – швидкість передавання, розрахована з урахуванням тільки перехідних завад при 100-відсотковому завантаженні кабелю ТППен-10х2х0,4 системами G.fast; R_v – швидкість передавання, розрахована з урахуванням системи «векторинг» при 100-відсотковому завантаженні кабелю; $R_{\Sigma xt}$ – швидкість передавання, розрахована з урахуванням інтерференційних та перехідних завад без векторингу; $R_{\Sigma v}$ – швидкість передавання, розрахована з урахуванням інтерференційних та векторингу.

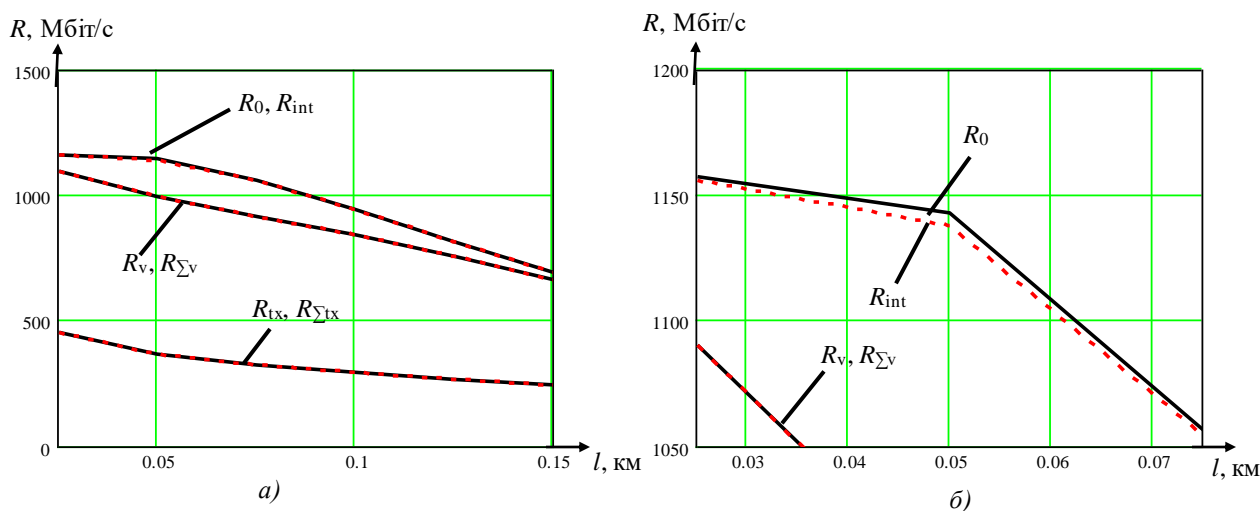


Рисунок 4 – Швидкість передавання СП G.fast при роботі по багатопарному кабелю ТППеп-10х2х0,4: а) графік у нормальному масштабі; б) графік у збільшеному масштабі

- застосування системи компенсації перехідних завад «векторинг» дозволяє суттєво зменшити вплив перехідних завад на швидкість передавання СП G.fast – при 100-відсотковому завантаженні 10-парного кабелю швидкість передавання зменшується не більше ніж на 14 %, тобто застосування технології G.fast на багатопарних телефонних кабелях доцільне лише за умови використання системи «векторинг»;
- моделювання СП G.fast при роботі по вітчизняному багатопарному телефонному кабелю ТППеп-10х2х0,4 показало, що за відсутності перехідних завад швидкість у 1 Гбіт/с можливо забезпечити на відстань 80 м, а за рахунок застосування системи «векторинг» при 100-відсотковому завантаженні кабелю таку швидкість можливо забезпечити на відстань 50 м. При довжині АЛ 150 м швидкість передавання складає не менше 660 Мбіт/с.

На завершення підсумуємо, що у даній статті наведено удосконалений метод розрахунку некомпенсованої перехідної завади у СП з векторингом та результати практичного вимірювання частотних параметрів кабелю ТППеп-10х2х0,4 у діапазоні частот до 100 МГц, які були нами апроксимовані в усій робочій смузі СП G.fast. Це дало змогу оцінити досяжні швидкості передавання СП G.fast з урахуванням усіх можливих видів завад та використанням системи компенсації перехідних завад «векторинг». Визначено, що застосування СП G.fast для роботи по багатопарних кабелях є доцільним лише при застосуванні векторинга, тому що при 100-відсотковому завантаженні кабелю системами G.fast без компенсації перехідних завад їх швидкість передавання зменшується більш ніж у 2,5 раза. При 100-відсотковому завантаженні кабелю ТППеп-10х2х0,4 системами G.fast із застосуванням векторинга на відстань 50 м можливо забезпечити швидкість передавання 1 Гбіт/, а на відстань 150 м – 660 Мбіт/с.

ЛІТЕРАТУРА:

1. "G.Fast Delivers Gigabit Broadband Speeds To Customers Over Copper (FTTdp)" / [Електронний ресурс] / Tim Verry (2013-08-05) // PC Perspective. – Режим доступу: <http://www.pcper.com/news/General-Tech/GFast-Delivers-Gigabit-Broadband-Speeds-Customers-Over-Copper-FTTdp>. – Дата доступу: 29.08.2015. – Заголовок з екрану.
2. ITU-T. Recommendation G.9701 : Fast access to subscriber terminals (G.fast) – Power spectral density specification. [Text]. – Apr. 2014-04-04. – Geneva, 2014. – 22 p.

3. Балашов В. А. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами / Балашов В. А, Воробийченко П.П, Ляховецкий Л.М. – М.:Эко – Трендз, 2012. – 228 с.: ил.
4. Ляховецький Л.М. Удосконалення методу оцінки швидкості передавання систем передачі ортогональними гармонічними сигналами / Л.М. Ляховецький, В.І. Орешков, І.Б. Барба // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2014. – № 2. – Частина 2. – С. 186 – 193.
5. Ляховецький Л.М. Характеристики широкопосмугового доступу за технологією VDSL2 / Л.М. Ляховецький, В.І. Орешков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2012. – № 2. – С. 93 – 98.
6. ITU-T. Recommendation G.993.5 : Self-FEXT cancellation (vectoring) for use with VDSL2 transceivers. [Text]. – Appr. 2010, April. – Geneva, 2010. – 80 p.
7. Балашов В.А. Межканальные помехи в системах передачи по технологии G.FAST/ В.А. Балашов, В.Н. Молога // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2014. – № 1. – С. 65 – 69.
8. Балашов В.А. Технологии широкополосного доступа xDSL. Инженерно-технический справочник; под общей ред. В.А. Балашова. – М.: ЭкоТрендз. – 2008. – 262 с.

REFERENCES:

1. "G.Fast Delivers Gigabit Broadband Speeds To Customers Over Copper (FTTdp)" / [Electronic resource] / Tim Verry (2013-08-05) // PC Perspective. – Access mode: <http://www.pcper.com/news/General-Tech/GFast-Delivers-Gigabit-Broadband-Speeds-Customers-Over-Copper-FTTdp>. – Access date: 29.08.2015. – Title from the screen.
2. ITU-T. Recommendation G.9701 : Fast access to subscriber terminals (G.fast) – Power spectral density specification. [Text]. – Appr. 2014-04-04. – Geneva, 2014. – 22 p.
3. Balashov, V.A., Vorobienko P.P., Lyakhovetskiy L.M. Orthogonal harmonic signals transmission system.– М.: Eco-Trends, 2012. Print.
4. Lyakhovetskiy L.M., Oreshkov V.I., Barba I.B. "Enhancement of orthogonal harmonic signals transmission systems transmission rate evaluation method." Proc. of the O.S. Popov ONAT №2 (2014): 186-193.
5. Lyakhovetskiy L.M., Oreshkov V.I. "Characteristics of broadband technology VDSL2." Proc. of the O.S. Popov ONAT №2 (2012): 93-98.
6. ITU-T. Recommendation G.993.5 : Self-FEXT cancellation (vectoring) for use with VDSL2 transceivers. [Text]. – Appr. 2010, April. – Geneva, 2010. – 80 p.
7. Balashov V.A., Mologa V.N. "The inter-channel interference in communication systems by technology G.Fast." Proc. of the O.S. Popov ONAT №1 (2014): 65-69.
8. Balashov, V.A. Broadband access technology xDSL. Engineering Handbook; Ed. V.A. Balashov. – М.: Eco-Trends, 2008. Print.