

УДК 621.395

**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ «ВЕКТОРИНГ»  
НА ВІТЧИЗНЯНИХ ТЕЛЕФОННИХ БАГАТОПАРНИХ КАБЕЛЯХ**

*Орешков В.І.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[oreshkov\\_vi@mail.ru](mailto:oreshkov_vi@mail.ru)*

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ «ВЕКТОРИНГ»  
НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МНОГОПАРНЫХ КАБЕЛЯХ**

*Орешков В.И.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[oreshkov\\_vi@mail.ru](mailto:oreshkov_vi@mail.ru)*

**EFFICIENCY EVALUATION OF THE «VECTORING»  
SYSTEM APPLICATION IN THE DOMESTIC MULTIPAIR CABLES**

*Oreshkov V.I.*

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[oreshkov\\_vi@mail.ru](mailto:oreshkov_vi@mail.ru)*

**Анотація.** Визначено спрощені формули розрахунку сумарної потужності перехідних завод на дальньому кінці, захищеності від сумарної перехідної завади на дальньому кінці та придушення системою «векторинг» перехідних завод при паралельній роботі СП xDSL по кабелям пучкового скручення з кількістю пучків до трьох. Оцінено співвідношення спектральної густини потужності адитивних та перехідних завод на вході приймача систем передачі за технологіями VDSL2 і G.fast без та із застосуванням системи «векторинг» у залежності від частоти сигналу, довжини лінії та кількості пар у кабелю при повному завантаженні цього кабелю системами передачі. Оцінено ефективність застосування системи компенсації перехідних завод «векторинг» за величиною придушення перехідних завод у смузі частот до 100 МГц при паралельній роботі СП xDSL по вітчизняному багатопарному телефонному кабелю ТПП-10x2, 20x2 та 30x2 при довжині лінії до 1 км.

**Ключові слова:** система передачі, перехідні завади, спектральна густина потужності, система «векторинг», багатопарний кабель, придушення завод.

**Аннотация.** Определены упрощенные формулы расчета суммарной мощности переходных помех на дальнем конце, защищенности от суммарной переходной помехи на дальнем конце и подавления системой «векторинг» переходных помех при параллельной работе СП xDSL по кабелям пучковой скрутки с количеством пучков до трех. Оценено соотношение спектральной плотности мощности аддитивных и переходных помех на входе приемника систем передачи по технологиям VDSL2 и G.fast без и с применением системы «векторинг» в зависимости от частоты сигнала, длины линии и количества пар в кабеле при полной загрузке этого кабеля системами передачи. Оценена эффективность применения системы компенсации переходных помех «векторинг» по величине подавления переходных помех в полосе частот до 100 МГц при параллельной работе СП xDSL по отечественному многопарному телефонному кабелю ТПП-10x2, 20x2 и 30x2 при длине линии до 1 км.

**Ключевые слова:** система передачи, переходные помехи, спектральная плотность мощности, система «векторинг», многопарный кабель, подавление помех.

**Abstract.** A simplified formulas for calculating the total power of the crosstalk at the far end, the immunity of the total crosstalk at the far end and suppression "vectoring" system crosstalk in xDSL-systems parallel operation on the bundle twist cables with the number of bundles to three are defined. Power spectral

density of the additive noise and the crosstalk ratio at the receiver input of the transmission systems on VDSL2 and G.fast technologies without "vectoring" system and using it depending on the signal frequency, the line length and the number of pairs in the cable at full load transmission systems is estimated. The efficiency of the "vectoring" crosstalk compensation system application by crosstalk suppression value in the frequency range up to 100 MHz with parallel operation of the xDSL-systems on the domestic multipair telephone cable ТПП-10x2, 20x2 and 30x2 with a cable length to 1 km is estimated.

**Key words:** transmission system, crosstalk, power spectral density, «vectoring» system, multipair telephone cable, crosstalk suppression.

На даний час ефективно застосування надшвидкісних систем передачі (СП) xDSL для організації широкосмугового доступу телефонною мережею неможливе без застосування методів компенсації перехідних завад, які є основною причиною обмеження швидкості передавання при паралельній роботі СП по багатопарних телефонних кабелях. Система компенсації перехідних завад реалізована у СП xDSL отримала назву векторинг (*vectoring*) і регламентована Рекомендацією МСЕ-Т G.993.5 [1].

Відомо, що характеристики вітчизняних телефонних кабелів відрізняються від характеристик закордонних аналогів, тому актуальною задачею є дослідження ефективності застосування системи «векторинг» при роботі по вітчизняних багатопарних кабелях.

Застосування «векторингу» вже розглядалося у роботах [2, 3] відповідно у СП VDSL2 та G.fast при роботі найпоширенішим на вітчизняних телефонних мережах кабелем ТПП-0,4 пучкового скручення. Визначено загальний аналітичний вираз, який визначає некомпенсовану перехідну заваду, і який вдалося спростити для випадку 10-парного кабелю пучкового скручення ТПП-10x2 за умови рівності власних та перехідних загасань для всіх пар цього кабелю.

**Метою даної статті** є оцінка ефективності застосування системи «векторинг» у СП xDSL при роботі по вітчизняних багатопарних кабелях.

Як визначено у [2], загальний вираз перехідної завади без використання «векторингу»  $NFext_l$  на вході приймача СП- $l$  за відомих на передачі СП- $m$  сигналах  $S_m$  визначається:

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

де  $l, m = 1, 2 \dots n$ ;  $n$  – число СП;  $l$  – номер СП підданої впливу;  $m$  – номер СП, що впливає;  $H_{l,m}$  – перехідна передатна функція (ППФ) між лініями  $l$  та  $m$ ;  $S_m$  – спектр сигналу на передачі СП, що впливає.

А при використанні системи «векторинг» загальний вираз некомпенсованої перехідної завади  $NFext_l^v$ , що породжена попередньо спотвореними сигналами, визначається:

$$NFext_l^v = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n \frac{S_k \cdot H_{m,k}}{H_m} \cdot H_{l,m}, \quad (2)$$

де  $H_m$  – власна передатна функція (ВПФ) лінії  $m$ .

Для оцінки ефективності застосування системи «векторинг» було введено поняття коефіцієнта придушення, який у загальному вигляді визначався наступним чином:

$$KFext_l = \frac{NFext_l}{NFext_l^v} = \frac{\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^n S_m \cdot H_{l,m}}{\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n \frac{S_k \cdot H_{m,k}}{H_m} \cdot H_{l,m}}, \quad (3)$$

Із загальних виразів (1)...(3) визначимо спрощені формули для розрахунку потужності перехідних завод при роботі по 20-парному та 30-парному кабелях ТПП пучкового скручення, за умови, коли СП xDSL мають однакову потужність передавачів  $S = S_l$  і АЛ у багатопарному кабелі мають однакові ВПФ  $H = H_l$  та ППФ між парами всередині пучка  $HFext^B = H_{l,m}$  і між парами суміжних пучків  $HFext^M = H_{l,m}$ .

У роботах [2, 3] визначення спрощеної формули виконувалося для  $n$  робочих СП, що розташовані у десятипарному пучку. У випадку з двома та трьома пучками необхідно СП розподіляти між усіма пучками: у 0-му пучку –  $x$  СП, у 1-му пучку –  $y$  СП та у 2-му пучку –  $z$  СП, в результаті для ТПП-20  $x + 2 - n = x + y$ , а для ТПП-30  $x + 2 - n = x + y + z$ .

Згідно з вищезазначеним, формула (1) розрахунку потужності перехідної заводи без використання «векторингу»  $NFext_l$  на вході приймача СП- $l$  набуває виду:

$$NFext_l = S \left[ (x-1) \cdot HFext^B + (y+z) \cdot HFext^M \right]. \quad (4)$$

де  $HFext^B$  – потужність перехідної заводи між парами всередині пучка;  $HFext^M$  – потужність перехідної заводи між парами суміжних пучків; для ТПП-20  $x + 2 - z = 0$ .

Формула (2) розрахунку потужності некомпенсованої перехідної заводи  $NFext^v_l$ , що породжена попередньо спотвореними сигналами набуває виду:

$$NFext^v_l = \frac{S}{H} \cdot \left[ (x-1)^2 \cdot (HFext^B)^2 + (x \cdot y + x \cdot z + 2 \cdot y \cdot z) \cdot (HFext^M)^2 + (y^2 + z^2 + x \cdot y + x \cdot z - 2 \cdot y - 2 \cdot z) \cdot HFext^B \cdot HFext^M \right]. \quad (5)$$

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 (СГП) 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 можна виразити через захищеність від перехідної заводи на дальньому кінці (ПЗ ДК) та загасання лінії [4]:

$$Al(i) = A_{з,ДК}(i) + \delta A_{з,ДК}(i) + A_{АЛ}(i),$$

де  $Al(i)$  – перехідне загасання на дальньому кінці;  $A_{з,ДК}(i)$  – захищеність від ПЗ ДК між парами всередині пучка;  $\delta A_{з,ДК}(i)$  – збільшення захищеності від ПЗ ДК між парами різних пучків;  $A_{АЛ}(i)$  – власне загасання лінії;  $i$  – номер несучої СП xDSL (наприклад, 6...2782 для VDSL2 план В8-4 та 39...2047 для G.fast профіль 106a); формули (4) та (5) відповідно набувають виду:

$$Gnl(i) = Gs(i) - A_{з,ДК}(i) - A_{АЛ}(i) + 10 \lg \left[ (x-1) + (y+z) \cdot 10^{-0,1 \cdot \delta A_{з,ДК}(i)} \right], \quad (6)$$

$$Gnl^v(i) = Gs(i) - 2 \cdot A_{з,ДК}(i) - A_{АЛ}(i) + 10 \lg \left[ (x-1)^2 + (x \cdot y + x \cdot z + 2 \cdot y \cdot z) \cdot 10^{-0,2 \cdot \delta A_{з,ДК}(i)} + (y^2 + z^2 + (x-2) \cdot (y+z)) \cdot 10^{-0,1 \cdot \delta A_{з,ДК}(i)} \right]^2, \quad (7)$$

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

Для оцінки ефективності застосування системи «векторинг» визначимо як змінюється значення захищеності від перехідної заводи на дальньому кінці та визначимо величину придушення перехідних завод за рахунок застосування системи «векторинг».

Захищеність визначається як різниця між рівнями сигналу та завади на вході приймача, тому захищеність від сумарної ПЗ ДК можна визначити з (6) та (7):

$$SNR/\Sigma(i) = (Gs(i) - A_{\text{Ал}}(i)) - Gnl(i) = A_{\text{з, ДК}}(i) - 10 \lg[(x-1) + (y+z) \cdot 10^{-0,1 \cdot \delta A_{\text{з, ДК}}(i)}], \quad (8)$$

$$SNR/\Sigma^v(i) = (Gs(i) - A_{\text{Ал}}(i)) - Gnl^v(i) = 2 \cdot A_{\text{з, ДК}}(i) - 10 \lg[(x-1)^2 + (x \cdot y + x \cdot z + 2 \cdot y \cdot z) \cdot 10^{-0,2 \cdot \delta A_{\text{з, ДК}}(i)} + (y^2 + z^2 + (x-2) \cdot (y+z)) \cdot 10^{-0,1 \cdot \delta A_{\text{з, ДК}}(i)}]. \quad (9)$$

Придушення  $\Delta Gnl(i)$  (різницю рівнів СГП) ПЗ ДК за рахунок застосування системи «векторинг», у відповідності з (3), (6) та (7) можна визначити за наступним виразом:

$$\begin{aligned} \Delta Gnl(i) &= Gnl(i) - Gnl^v(i) = \\ &= A_{\text{з, ДК}}(i) - 10 \lg \left[ \frac{(x \cdot y + x \cdot z + 2 \cdot y \cdot z) \cdot 10^{-0,2 \cdot \delta A_{\text{з, ДК}}(i)} + (y^2 + z^2 + (x-2) \cdot (y+z)) \cdot 10^{-0,1 \cdot \delta A_{\text{з, ДК}}(i)}}{(x-1) + (y+z) \cdot 10^{-0,1 \cdot \delta A_{\text{з, ДК}}(i)}} \right]. \quad (10) \end{aligned}$$

З формул (8)...(10) можна дійти висновку, що ефективність застосування системи «векторинг» визначається лише захищеністю від ПЗ ДК та розташуванням СП у багатопарному кабелі незалежно від характеристик самої СП.

Оцінку будемо проводити для смуги частот до 106 МГц, саме її використовують сучасні СП xDSL для передавання інформації (СП G.fast [5]).

Для кабеля ТППзп-0,4 довжиною 143 м були проведені вимірювання параметрів у діапазоні частот від 1 до 100 МГц [6]. При цьому перехідні загасання на ДК були виміряні для пар як усередині пучка, так і для пар у суміжних пучках та через один пучок (використовувався 50-парний кабель).

На рис. 1 показано частотну залежність захищеності від ПЗ ДК для пар усередині пучка та між суміжними пучками.

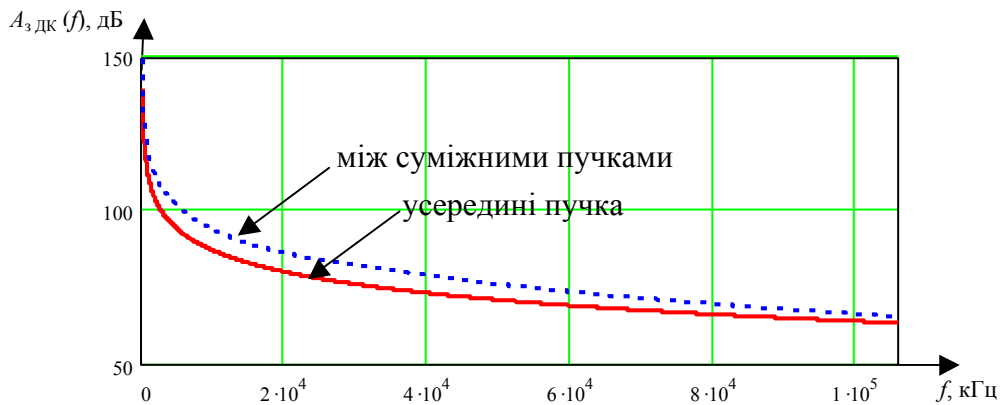


Рисунок 1 – Частотна залежність захищеності від ПЗ ДК для кабеля ТПП довжиною 100 м

На рис. 2, а та б показано частотні залежності захищеності сигналу від сумарної ПЗ ДК у відповідності з (8), (9) для кабелів типу ТПП-10x2, 20x2 і 30x2 при довжині 100 м і 500 м та їх 100-відсотковому завантаженні відповідно системами передачі G.fast і VDSL2.

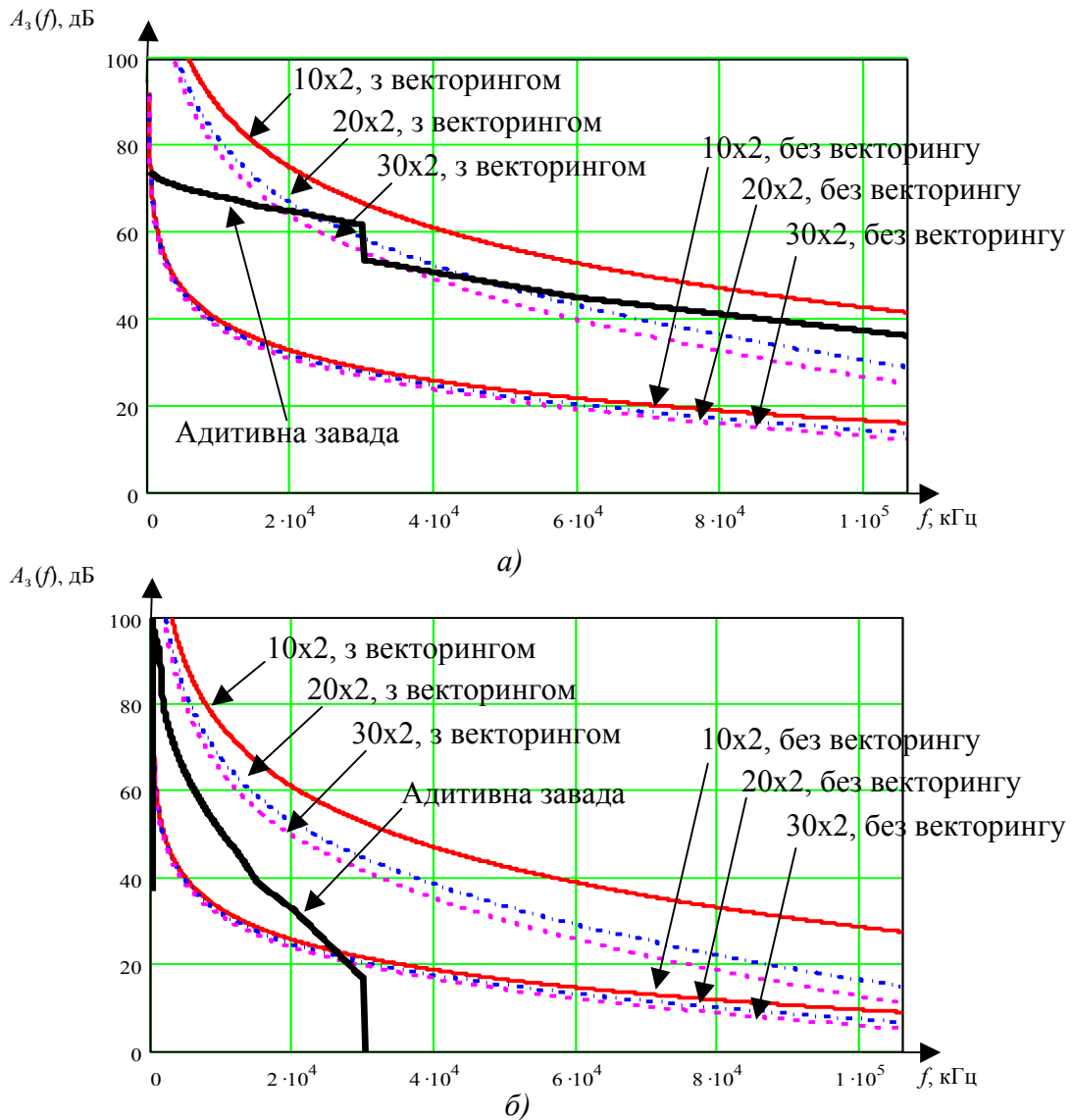


Рисунок 2 – Частотна залежність захищеності від сумарної ПЗ ДК при довжині лінії:  
 а) 100 м (СП G.fast); б) 500 м (СП VDSL2)

А на рис. 3, а, б та в відповідно показані залежності захищеності від довжини кабелю відповідно на частоті 1, 35 та 100 МГц.

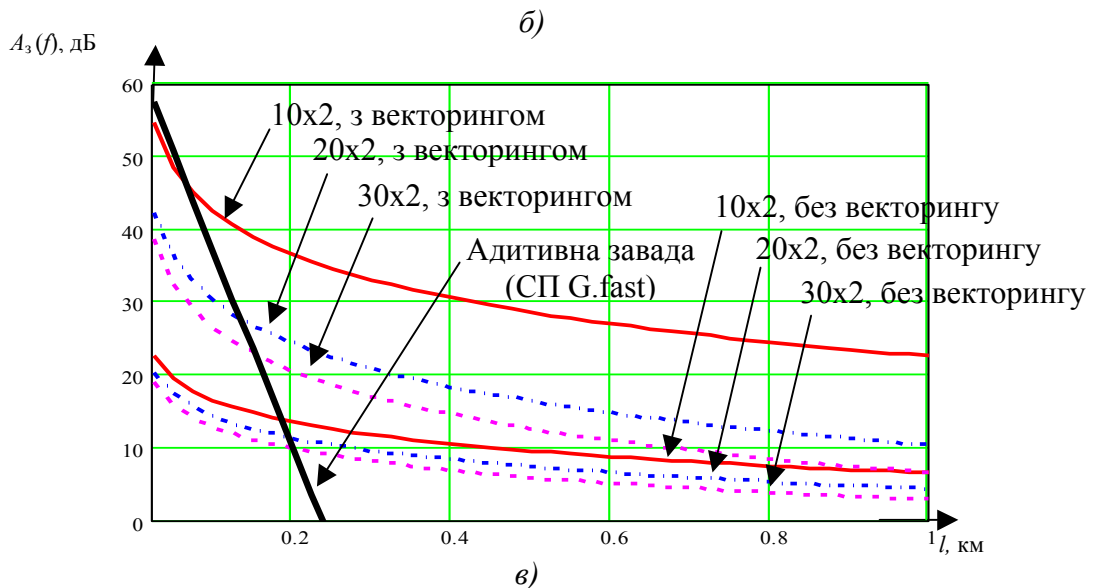
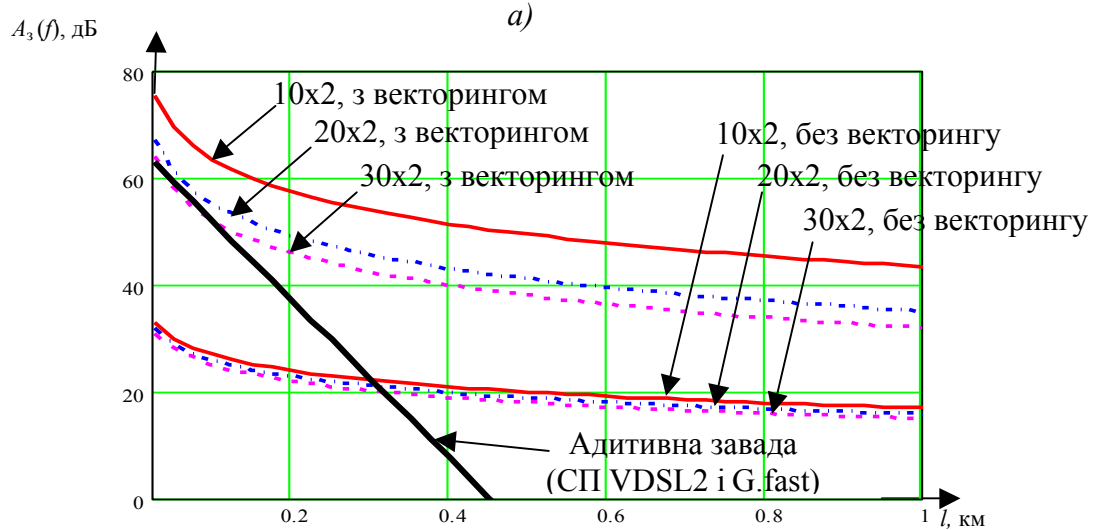
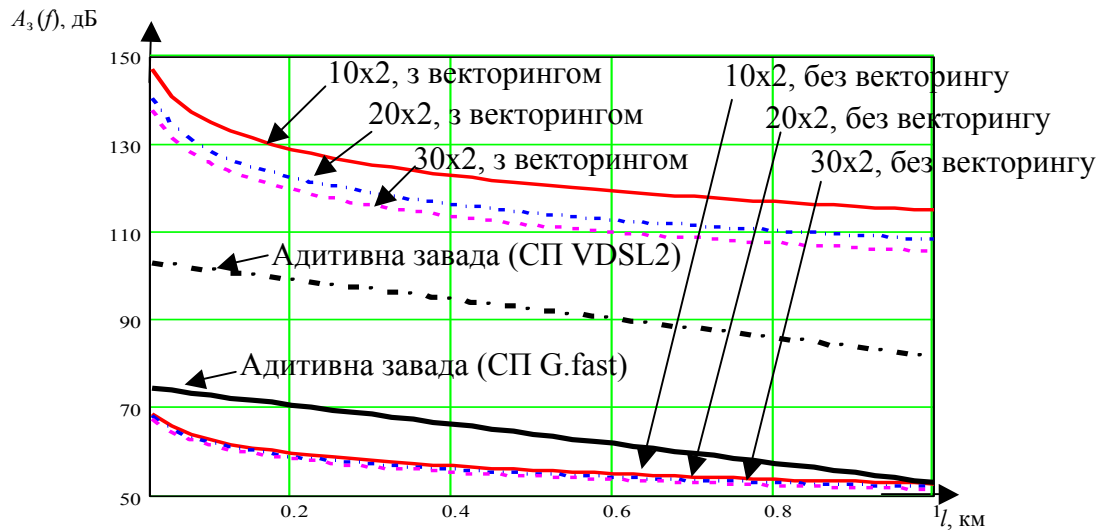


Рисунок 3 – Залежність захищеності від довжини кабелю на частоті:

а) 1 МГц; б) 35 МГц; в) 100 МГц

Захищеність, у кінцевому підсумку, визначатиме швидкість передавання досягну системою передачі, тому важливим є не тільки розрахунок захищеності від ПЗ ДК, а й визначення співвідношення між адитивними та перехідними завадами, яке визначатиме результуючу захищеність від сумарної завади. Тому на рис. 2, 3 додатково показані криві захищеності сигналу від адитивних завад. Враховувалися адитивні завади з рівномірною СПП на рівні мінус 140 дБп/Гц – це рівень теплового шуму за відсутності інших джерел зовнішніх завад (виключаючи перехідні завади, які враховуються окремо), відповідно за наявності джерел додаткових завад рівень адитивної завади буде збільшуватися, а захищеність буде зменшуватися.

Аналізуючи показані на рис. 2 і 3 результати можна дійти висновку, що застосування векторингу дозволяє суттєво збільшити захищеність сигналу від перехідних завад на дальньому кінці, це збільшення визначається величиною придушення перехідних завад, яке більш детально розглянемо нижче. Для варіанта без застосування системи «векторинг» перехідні завади значно перевищують адитивні, тому саме вони будуть визначати сумарну захищеність та досягну системами xDSL швидкість передавання.

Застосування системи «векторинг» дозволяє придушити перехідні завади, відповідно потужність цих завад стає меншою (СП VDSL2) або сумірною (СП G.fast) з потужністю адитивних завад, що дозволяє забезпечити швидкість передавання СП xDSL близьку до швидкості за відсутності перехідних завад. Ці висновки підтверджуються розрахунками швидкості передавання виконаними у [2, 3].

На рис. 4 показані частотні залежності придушення перехідних завад за рахунок застосування векторингу у відповідності з (10) при довжині 100 і 500 м, а на рис. 5 – залежності від довжини на частотах 1, 35 і 100 МГц та 100-відсотковому завантаженні кабелю системами передачі.

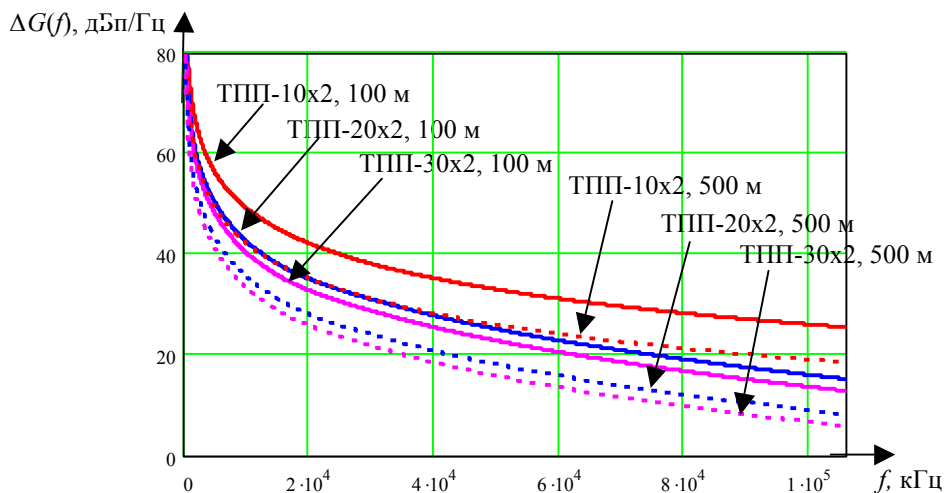


Рисунок 4 – Частотна залежність придушення перехідних завад при довжині лінії 100 і 500 м та 100-відсотковому завантаженні кабелю ТПП системами передачі

За результатами, наданими на рис. 4 і 5 бачимо, що система «векторинг» дозволяє забезпечити придушення перехідних завад при максимальному завантаженні кабелю (100 %) у межах від 5...25 дБ до 55...80 дБ в залежності від робочої частоти, довжини лінії та типу кабелю (10, 20 або 30-парний).

Різниця між величиною придушення для кабелів з різною кількістю пар складає 10...14 дБ в залежності від робочої частоти та довжини лінії. При цьому важливим результатом є те, що різниця між придушенням ПЗ ДК для кабелів ТПП-10 х 2 та 20 х 2

складає 6...10 дБ в залежності від робочої частоти і довжини лінії, а для кабелів ТПП-20 х 2 та 30 х 2 лише 2...2,5 дБ, тобто при збільшенні кількості пучків у кабелі різниця між придушенням ПЗ ДК зменшується за рахунок збільшення захищеності на ДК внаслідок просторового рознесення пучків. Отже, при моделюванні роботи СП xDSL із застосуванням системи «векторинг» по кабелях зі значною кількістю пучків (ТПП-50 х 2, ТПП-100 х 2), можна користуватися формулою (5) або (7) для оцінки «зверху» потужності перехідних завад, відповідно збільшивши кількість СП у суміжних пучках у та з.

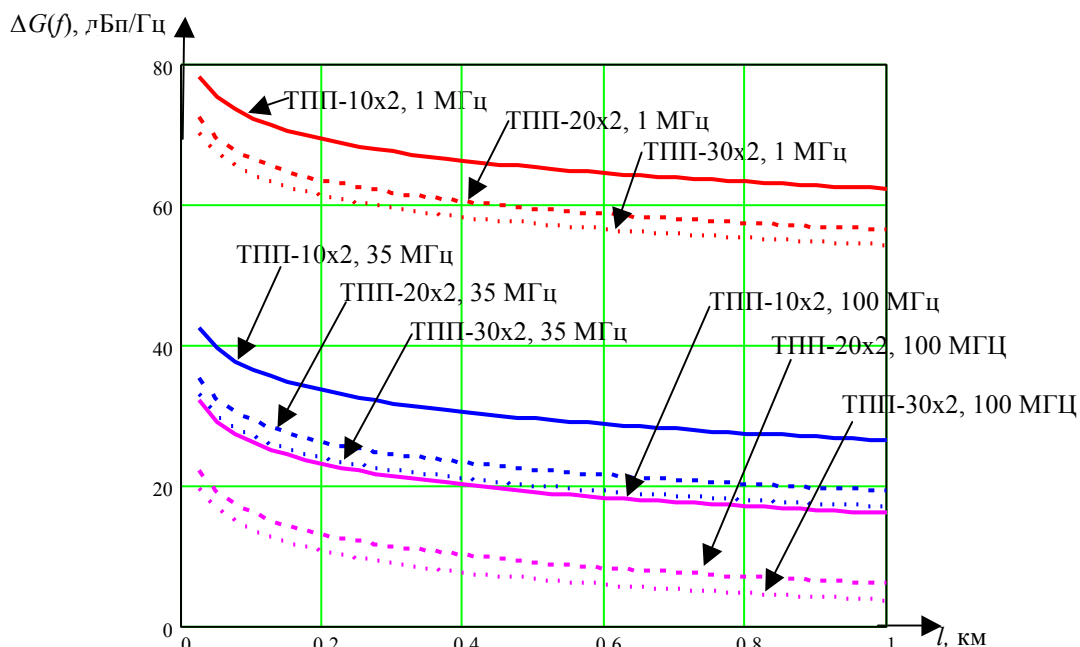


Рисунок 5 – Залежність придушення перехідних завад від довжини лінії на частотах 1, 35 і 100 МГц та 100-відсотковому завантаженні кабелю ТПП системами передачі

**На завершення підсумуємо, що у даній статті:**

- визначено спрощені формули розрахунку сумарної потужності перехідних завад на дальньому кінці, захищеності від сумарної ПЗ ДК та придушення системою «векторинг» ПЗ ДК при роботі СП xDSL по кабелях пучкового скручення з кількістю пучків до трьох;
- виконано оцінку ефективності застосування системи «векторинг» при роботі СП xDSL по вітчизняних багатопарних телефонних кабелях ТПП-10 х 2, ТПП-20 х 2 і ТПП-30 х 2.

Проведені дослідження показують, що застосування системи «векторинг» у СП xDSL при їх роботі по багатопарних телефонних кабелях дозволяє ефективно протидіяти перехідним завадам, придушуючи їх до рівня теплових шумів.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. ITU-T. Recommendation G.993.5 : Self-FEXT cancellation (vectoring) for use with VDSL2 transceivers. [Text]. – Apr. 2010, April. – Geneva, 2010. – 80 p.
2. Балашов В.О. Характеристики широкопasmового доступу за технологією VDSL2 із застосуванням системи компенсації перехідних завад «векторинг» [Текст] / В.О. Балашов, Л.М. Ляховецький, В.І. Орешков // Научные труды SWorld.– Иваново: Научный мир, 2015. – № 3 (40). – Том 3. – С. 4 – 11.



3. Балашов В.О. Оцінка швидкості передавання цифрових абонентських ліній за технологією g.fast [Текст] / В.О. Балашов, В.І. Орешков, В.М. Молога // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2015. – № 2. – С. 52 – 60.
4. Балашов В.А. Технологии широкополосного доступа xDSL. Инженерно-технический справочник [Текст]; под общей ред. В.А. Балашова. – М.: ЭкоТрендз, 2008. – 262 с.
5. 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.
6. Балашов В.А. Скорость доступа по многопарным телефонным кабелям на базе технологии передачи G.fast [Текст] / [В.А. Балашов, А.М. Зеленый, А.Г. Лашко, Л.М. Ляховецкий, В.И. Орешков, В.Н. Молога] // Зв'язок. – 2015. – № 6. – С. 46 – 48.

REFERENCES:

1. ITU-T. Recommendation G.993.5 : Self-FEXT cancellation (vectoring) for use with VDSL2 transceivers. [Text]. – Appr. 2010, April. – Geneva, 2010. – 80 p.
2. Balashov V.O., Lyakhovetskiy L.M., Oreshkov V.I. “Broadband access features by VDSL2 technology using crosstalk compensation system «vectoring».” SWorld Scientific Issue №3 (2015). Volume 3: 186-193.
3. Balashov V.O., Oreshkov V.I., Mologa V.N. “Evaluation of digital subscriber line transmission rate using G.fast technology.” Proc. of the O.S. Popov ONAT №2 (2015): 52-60.
4. Balashov V.A. Broadband access technology xDSL. Engineering Handbook; Ed. V.A. Balashov. – М.: Eco-Trends, 2008. Print.
5. 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.
6. Balashov V.A., Zeleniy A.M., Lashko A.G., Lyakhovetskiy L.M., Oreshkov V.I., Mologa V.N. “The rate along multipair exchange cable according to G.fast technology.” Zvyazok №6 (2015): 46-48.