

УДК 621.395

ОЦІНКА ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ, ДОСЯЖНОЇ СИСТЕМАМИ ПЕРЕДАЧІ ОРТОГОНАЛЬНИМИ ГАРМОНІЧНИМИ СИГНАЛАМИ УЗАГАЛЬНЕНОГО КЛАСУ

Орешков В.І., Ляховецький Л.М., Барба І.Б.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1.
oreshkov_vi@mail.ru, irina_barba@mail.ru*

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ, ДОСТИЖИМОЙ СИСТЕМАМИ ПЕРЕДАЧИ ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ГАРМОНИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ ОБОБЩЕННОГО КЛАССА

Орешков В.И., Ляховецкий Л.М., Барба И.Б.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
oreshkov_vi@mail.ru, irina_barba@mail.ru*

EVALUATION OF THE TRANSMISSION RATE, WHICH IS ACHIEVED BY GENERALIZED CLASS ORTHOGONAL HARMONIC SIGNALS TRANSMISSION SYSTEMS

Oreshkov V.I., Lyakhovetskiy L.M., Barba I.B.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kovalska St., Odessa, Ukraine, 65029,
oreshkov_vi@mail.ru, irina_barba@mail.ru*

Анотація. Застосування ортогональних гармонічних сигналів (ОГС) узагальненого класу (УК) дозволяє зменшити інтерференційні завади порівняно з традиційними ОГС. Проведено порівняльний аналіз швидкості передавання, досяжної трьома варіантами систем передачі (СП) ОГС УК та традиційною СП ОГС, на прикладі СП за технологією ADSL2+. Порівняння проводилося по втраті швидкості передавання цих систем відносно варіанта без урахування інтерференційних завад. Визначено варіант побудови СП ОГС УК, який забезпечує максимально досяжну, з урахуванням інтерференційних завад, швидкість передавання. Для вибраного варіанта визначено досяжну швидкість передавання з урахуванням інтерференційних, зовнішніх адитивних та перехідних завад. Доведено можливість застосування ОГС УК для підвищення швидкості передавання СП ОГС.

Ключові слова: ортогональні гармонічні сигнали узагальненого класу, система передачі, швидкість передавання, інтерференційні завади, спектральна густина потужності, технологія ADSL2+.

Аннотация. Использование ортогональных гармонических сигналов (ОГС) обобщенного класса (ОК) позволяет уменьшить интерференционные помехи по сравнению с традиционными ОГС. Проведен сравнительный анализ скорости передачи, достижимой тремя вариантами систем передачи (СП) ОГС ОК и традиционной СП ОГС, на примере СП по технологии ADSL2+. Сравнение проводилось по потере скорости передачи этих систем относительно варианта без учета интерференционных помех. Определен вариант построения СП ОГС ОК, который обеспечивает максимально достижимую, с учетом интерференционных помех, скорость передачи. Для выбранного варианта определена достижимая скорость передачи с учетом интерференционных, внешних аддитивных и переходных помех. Доказана возможность применения ОГС ОК для повышения скорости передачи СП ОГС.

Орешков В.І., Ляховецький Л.М., Барба І.Б.

105

Ключевые слова: ортогональные гармонические сигналы обобщенного класса, система передачи, скорость передачи, интерференционные помехи, спектральная плотность мощности, технология ADSL2+.

Abstract. The using of generalized class (GC) orthogonal harmonic signals (OHS) allows to reduce interference noises in comparison with traditional OHS. Comparative analysis of achievable transmission rate of three variants of GC OHS TS and of traditional OHS TS is performed on the example of ADSL2+ technology. The comparison was done for the loss of the transmission rate of these systems with respect to variant without interference. GC OHS TS variant that provides the maximum achievable transmission rate considering interference noises is determined. Achievable transmission rate considering interference, external additive noise and crosstalk for the selected variant is defined. Possibility of GC OHS using for increasing OHS TS transmission rate is proved.

Key words: generalized class orthogonal harmonic signals, transmission system, transmission rate, interference, power spectral density, ADSL2+ technology.

На сьогодні одними з найпопулярніших технологій передавання інформації є системи передачі (СП) з OFDM-модуляцією (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [1]. Ортогональні гармонічні сигнали (ОГС), що використовуються у цих СП, є одним із видів широкого класу широкосмугових сигналів, запропонованих у [2, 3], які можуть бути використані для цілей передавання інформації.

Системи сигналів ОГС узагальненого класу (ОГС УК), які синтезовані у відповідності з запропонованим у [2] методом, описуються виразом:

$$\left\{ \sqrt{u(t)} e^{il\omega_0 t} \right\}_{l=0}^{n-1}, \quad -\frac{T}{2} \leq t < \frac{T}{2}, \quad \omega_0 = 2\pi f_0, \quad \tau_0 = \frac{1}{f_0}, \quad (1)$$

ортогональні на інтервалі T :

$$\int_{-T/2}^{T/2} \sqrt{u(t)} e^{il\omega_0 t} \sqrt{u(t)} e^{-ik\omega_0 t} dt = \begin{cases} 1, & l = k \\ 0, & l \neq k \end{cases}, \quad (2)$$

де f_0 – рознос між частотами сусідніх гармонічних функцій, що входять до складу функцій (1); n – число функцій; T – тривалість тактового інтервалу (функцій) та інтервалу ортогональності; $u(t)$ – обвідна.

У статті [2] доведено, що оптимальним варіантом, який дозволяє отримати найменші інтерференційні завади, викликані лінійними спотвореннями в каналі зв'язку, є застосування косинусквадратичної функції як обвідної $u(t)$. А у [3] проведено дослідження інтерференційних завод у традиційних СП ОГС на прикладі СП за технологією ADSL2+, для яких обвідна являє собою константу $u(t) = 1$, та СП ОГС УК з косинусквадратичною $u(t)$, в якому відзначається суттєве зменшення інтерференційних завод та зниження вимог до точності тактової синхронізації при застосуванні ОГС УК. Але в цих роботах не досліджено, яким чином застосування ОГС УК впливає на досягну швидкість передавання СП ОГС.

Метою статті є дослідження можливості застосування ОГС УК для підвищення швидкості передавання СП ОГС.

У роботі [4] проводилися дослідження швидкості передавання СП ADSL2+ з використанням удосконаленого методу оцінки швидкості передавання СП ОГС, який дозволяє враховувати інтерференційні завади. Тому доцільним є порівняти досяжні швидкості передавання традиційної СП ОГС на прикладі СП ADSL2+, що були розраховані у [4], та СП ОГС УК, запропонованих у [3], з характеристиками аналогічними СП ADSL2+ (кількість несучих, частота інформаційних кадрів, маска СПП сигналу тощо) [5].

Дослідження проводилося за наступних вихідних даних:

- номери несучих частот – 33...511 (визначалися досяжні швидкості передавання у низхідному напрямку);

- СПП сигналу на виході передавача визначалася згідно з [5];
- ймовірність помилки p приймалася рівною 10^{-7} (відповідає нормі припустимої ймовірності помилки на абонентській ділянці мереж доступу);
- адитивна завада з рівномірною спектральною густиною потужності (АЗРСГП) приймалася рівною в межах мінус 140...мінус 120 дБп/Гц;
- вплив перехідних завад враховувався при 100-відсотковому завантаженні багатопарного кабелю системами передачі, також враховувалося погіршення перехідного загасання на $\Delta A_l=10$ дБ для кабелів, що тривалий час знаходилися в експлуатації;
- розрахунки проводилися для кабелю типу ТП-10х2 пучкового скручення з діаметром жил 0,5 мм;
- варіанти побудови СП ОГС, які досліджувалися, надані у табл. 1 та рис. 1.

Таблиця 1 – Варіанти побудови СП ОГС

Варіанти СП	Множення на обвідну $u_1(t)$ у передавачі	Множення на обвідну $u_2(t)$ у приймачі
1	1	1
2	$\sqrt{u(t-pT)}$	$\sqrt{u(t-pT)}$
3	1	$u(t-pT)$
4	$u(t-pT)$	1

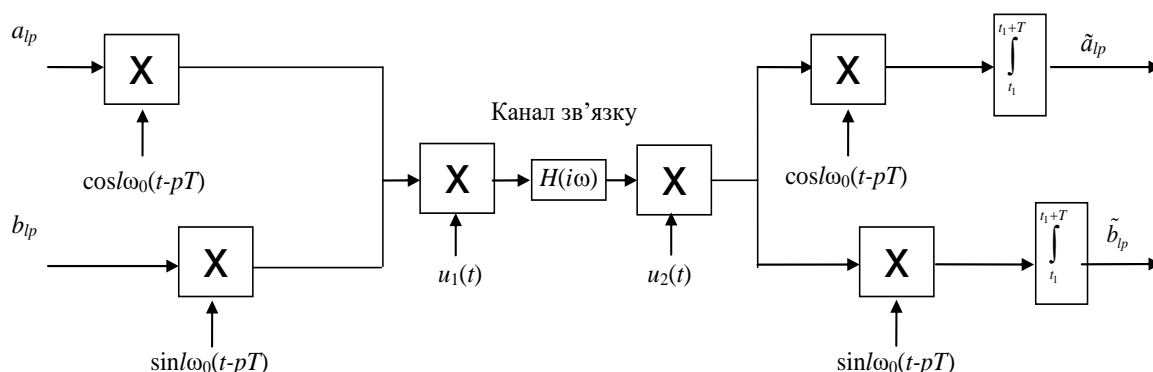


Рисунок 1 – Узагальнена структурна схема l -го каналу СП ОГС

У відповідності з результатами, отриманими у [4], інтерференційні завади чинять вплив на швидкість передавання традиційної СП ОГС (СП ADSL2+) при довжині кабелю ТП-10х2х0,5, більшій за 1,5 км. Тому, враховуючи результати розрахунків інтерференційних завад у [3], дослідження швидкості передавання СП ОГС УК проводилися при довжині 2...4 км.

У табл. 2 та на рис. 2 надані результати розрахунків швидкості передавання за відсутності зовнішніх завад (це відповідає АЗРСГП на рівні -140 дБп/Гц та одній СП у багатопарному кабелі $n_{сп} = 1$), що дає змогу порівняти варіанти СП ОГС між собою за впливом інтерференційних завад на швидкість передавання.

Таблиця 2 – Швидкість передавання СП ОГС (АЗРСГП = -140 дБп/Гц, ТП-10x2x0,5, $n_{СП} = 1$), Мбіт/с

Довжина лінії, км	СП-0	СП-1	СП-2	СП-3	СП-4
2	23,26	22,792	23,232	22,992	22,892
3	14,196	13,436	14,184	14,032	13,928
4	8,096	7,224	7,592	6,888	7,488

Примітка. На рисунках та у таблицях використовуються наступні позначення: СП-0 – СП ОГС, при розрахунку швидкості передавання якої інтерференційні завади не враховуються; СП-1 – це традиційна СП ОГС, в якій для боротьби з інтерференційними завадами застосовується захисний інтервал, а СП-2, СП-3 та СП-4 – СП ОГС загального виду, в яких замість захисного інтервалу застосовується обвідна $u(t)$ і відрізняються між собою місцем множення ОГС на $u(t)$ (див. табл. 1 та рис. 1).

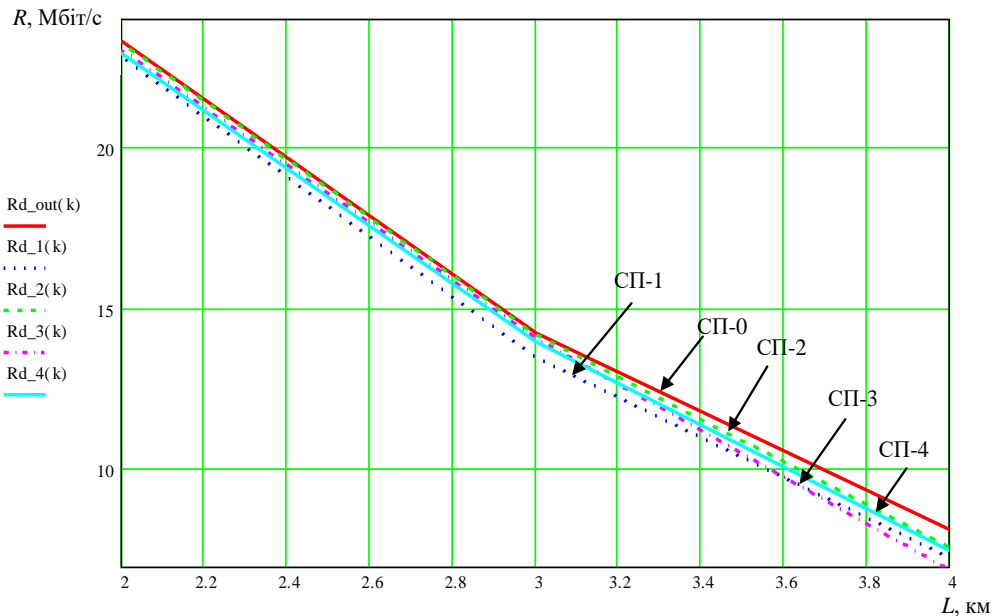


Рисунок 2 – Залежність швидкості передавання СП ОГС від довжини лінії (АЗРСГП = -140 дБп/Гц, ТП-10x2x0,5, $n_{СП} = 1$)

Для порівняння варіантів СП ОГС між собою, крім безпосередньої оцінки швидкості передавання, доцільним є також порівняння втрат швидкості передавання цих СП відносно варіанта, коли у розрахунку не враховується потужність інтерференційних завад, це дає змогу оцінити ефект застосування запропонованих у [3] ОГС УК.

Визначалися абсолютна (у кбіт/с) та відносна (у %) втрата швидкості передавання відповідно за формулами:

$$\Delta R = R_0 - R_i; \tag{3}$$

$$\Delta R_{\%} = \frac{(R_0 - R_i)}{R_0} \cdot 100\%, \tag{4}$$

де R_0 – швидкість передавання СП-0, без урахування інтерференційних завад;
 R_i – швидкість передавання СП- i ($i = 1 \dots 4$), з урахуванням інтерференційних завад.

Результати розрахунків втрати швидкості передавання подані на рис. 3 та у табл. 3.

Таблиця 3 – Абсолютна та відносна втрата швидкості передавання СП ОГС
 (АЗРСГП == -140 дБп/Гц, ТП-10х2х0,5, $n_{СП} = 1$)

Довжина лінії, км	СП-1		СП-2		СП-3		СП-4	
	ΔR , кбіт/с	$\Delta R\%$, %	ΔR , кбіт/с	$\Delta R\%$, %	ΔR , кбіт/с	$\Delta R\%$, %	ΔR , кбіт/с	$\Delta R\%$, %
2	468	2	28	0,12	268	1,15	368	1,58
3	760	5,35	12	0,08	164	1,56	268	1,89
4	872	10,77	504	6,23	1208	14,92	608	7,51

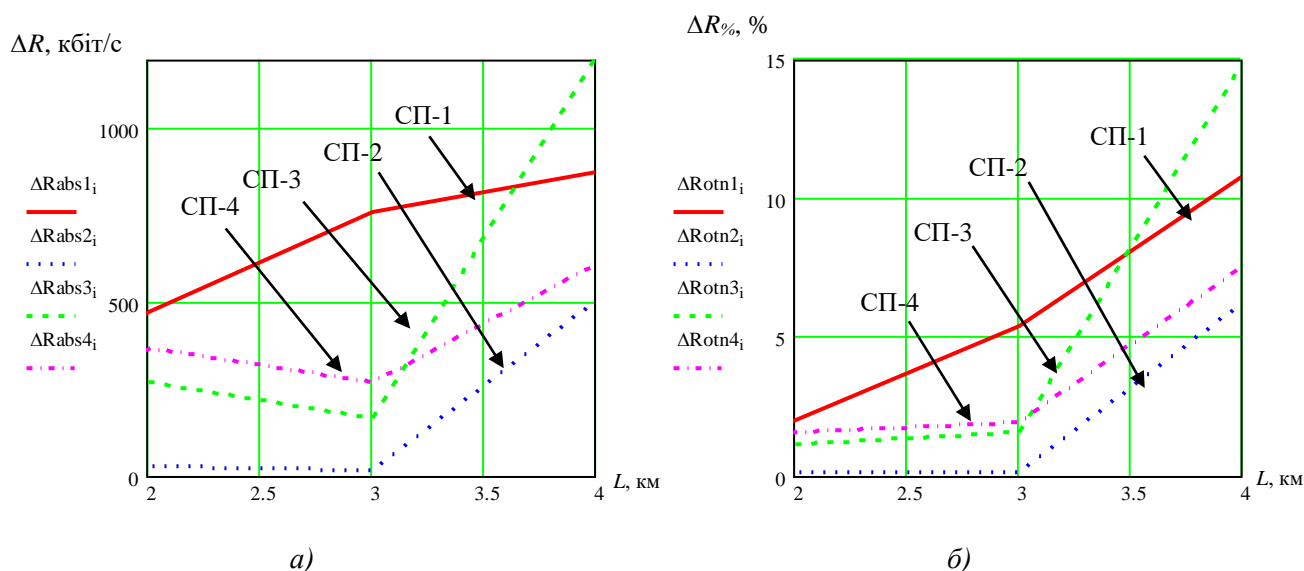


Рисунок 3 – Залежність абсолютної (а) та відносної (б) втрати швидкості передавання СП ОГС від довжини лінії (АЗРСГП = -140 дБп/Гц; ТП-10х2х0,5; $n_{СП} = 1$; $\Delta A_l = 0$ дБ)

Проаналізуємо отримані результати.

Різні варіанти СП ОГС володіють різними характеристиками завадозахищеності від інтерференційних завад [3], тому зі збільшенням довжини лінії (зі збільшенням лінійних спотворень у каналі зв'язку) швидкість передавання зменшується нерівномірно для різних варіантів.

Цікавим є той факт, що для СП ОГС УК, на відміну від традиційної СП ОГС, абсолютна втрата швидкості передавання при довжині лінії 3 км менша, ніж при довжині 2 км. Це пояснюється тим, що зменшення швидкості передавання (при довжині лінії 3 км швидкість передавання приблизно на 40 % менша, ніж при довжині 2 км), в основному, обумовлено збільшенням власного загасання лінії, у той час як співвідношення інтерференційна завада/сигнал збільшується незначно [3]. Тобто втрата швидкості передавання для СП ОГС УК обумовлена, в першу чергу, адитивними завадами.

При подальшому збільшенні довжини лінії (до 4 км) лінійні спотворення в каналі зв'язку суттєво збільшуються, що призводить до різкого збільшення співвідношення інтерференційна завада/сигнал та до суттєвої втрати швидкості передавання для всіх варіантів СП.

Порівняння СП-3 та СП-4 дає змогу підтвердити припущення, що множення ОГС на обвідну $u(t)$, яке дозволяє отримати звуження спектра, є ефективнішим на передавальному боці каналу зв'язку за великих лінійних спотворень, а у протилежному випадку, коли домінуючими є адитивні завади, – на приймальному боці.

За будь-яких умов найкращі результати по досяжній швидкості передавання показує СП-2. При цьому, на відміну від традиційної СП ОГС та інших варіантів СП ОГС УК, застосування СП-2 на лініях довжиною до 3 км (для телефонних ліній, побудованих з використанням кабелю ТП-0,5) не потребує корекції частотних характеристик каналу (втрата швидкості передавання значно менша за 1 %), що є важливим при роботі каналами зв'язку з нестабільними у часі частотними характеристиками, на яких коректор не спроможний «встигнути» здійснити процедуру налаштування.

Надалі доцільно порівнювати два варіанти СП ОГС. Це СП-1 – традиційна СП ОГС (СП ADSL2+), яка стандартизована Рекомендаціями МСЕ-Т, та СП-2 – найперспективніша СП ОГС УК з точки зору боротьби з інтерференційними завадами.

Демо оцінку та виконаємо порівняння досяжних швидкостей передавання вибраних варіантів СП ОГС при урахуванні разом з інтерференційними також перехідних завад та АЗРСГП.

У табл. 4, 5 та 6 надано результати розрахунку швидкості передавання СП-0, 1, 2 та втрат швидкості передавання СП-1, 2 з урахуванням інтерференційних завад, АЗРСГП при рівні СГП мінус 120 дБп/Гц та перехідних завад при 100 % завантаженні кабелю, який тривалий термін знаходиться в експлуатації (зменшення перехідного загасання приймалося рівним $\Delta A_l = 10$ дБ).

Таблиця 4 – Швидкість передавання та втрата швидкості передавання СП ОГС з урахуванням АЗРСГП та інтерференційних завад (АЗРСГП = -120 дБп/Гц; ТП-10x2x0,5)

Довжина лінії, км	СП-0	СП-1			СП-2		
	R, Мбіт/с	R, Мбіт/с	ΔR , кбіт/с	$\Delta R\%$, %	R, Мбіт/с	ΔR , кбіт/с	$\Delta R\%$, %
2	13,684	13,564	120	0,88	13,668	16	0,12
3	6,38	6,288	92	1,44	6,376	4	0,06
4	2,788	2,768	20	0,72	2,78	8	0,29

Таблиця 5 – Швидкість передавання та втрата швидкості передавання СП ОГС з урахуванням перехідних та інтерференційних завад (АЗРСГП = -140 дБп/Гц; ТП-10x2x0,5; $n_{СП} = 10$; $\Delta A_l = 10$ дБ)

Довжина лінії, км	СП-0	СП-1			СП-2		
	R, Мбіт/с	R, Мбіт/с	ΔR , кбіт/с	$\Delta R\%$, %	R, Мбіт/с	ΔR , кбіт/с	$\Delta R\%$, %
2	12,584	12,564	20	0,16	12,58	4	0,03
3	9,052	8,992	60	0,66	9,04	12	0,13
4	6,028	5,856	172	2,85	5,956	72	1,19

Таблиця 6 – Швидкість передавання та втрата швидкості передавання СП ОГС з урахуванням АЗРСГП, перехідних та інтерференційних завад (АЗРСГП = -120 дБп/Гц; ТП-10х2х0,5; $n_{СП} = 10$; $\Delta A = 10$ дБ)

Довжина лінії, км	СП-0	СП-1			СП-2		
	R, Мбіт/с	R, Мбіт/с	ΔR , кбіт/с	$\Delta R\%$, %	R, Мбіт/с	ΔR , кбіт/с	$\Delta R\%$, %
2	10,16	10,144	16	0,16	10,156	4	0,04
3	5,652	5,624	28	0,5	5,644	8	0,14
4	2,688	2,664	24	0,89	2,676	12	0,45

Аналіз отриманих результатів розрахунку швидкості передавання дає можливість стверджувати, що висновки про вплив інтерференційних завад на досяжну швидкість передавання СП ОГС, надані у [4], якісно справедливі не тільки для традиційних СП ОГС, а й для СП ОГС УК. Кількісно слід відзначити, що за будь-яких умов СП ОГС УК (СП-2) дає вигоду щодо втрати швидкості передавання не менш ніж у 2 рази порівняно з традиційною СП ОГС (СП-1), що доводить можливість застосування ОГС УК для підвищення швидкості передавання СП ОГС в каналах зв'язку з лінійними спотвореннями.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Балашов В. А. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами / Балашов В. А, Воробийченко П.П, Ляховецкий Л.М. – М.:Эко – Трендз, 2012. – 228 с.: ил.
2. Балашов В.А. Ортогональные гармонические сигналы для широкополосных систем передачи / В.А. Балашов, Л.М. Ляховецкий, И.Б. Барба // Загальногалузевий науково – виробничий журнал «Зв'язок». – 2012. – № 3. – С. 17 – 20.
3. Барба И.Б. Анализ систем передачи гармоническими сигналами обобщенного класса / И.Б. Барба // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2014. – № 1. – С. 135 – 142.
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. – Частина 2. – № 2. – С. 186 – 193.
5. ITU-T Recommendation G.992.5: Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (ADSL2) – Extended bandwidth (ADSL2plus). – Appr. 2009, January. – Geneva, 2009. – 110 p.

REFERENCES:

1. Balashov, V.A., Lyakhovetskiy L.M. Orthogonal harmonic signals transmission system.– M.: Eco-Trends, 2012. Print.
2. Balashov V.A., Lyakhovetskiy L.M., Barba I.B. "Orthogonal harmonic signals for broadband transmission systems." Industrywide scientific - production journal "Communications" №3 (2012): 17-20.
3. Barba I.B. "Analysis of transmission systems that are using generalized class harmonic signals." Proc. of the O.S. Popov ONAT №1 (2014): 135-142.
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). Part 2: 186-193.
5. ITU-T Recommendation G.992.5: Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (ADSL2) – Extended bandwidth (ADSL2plus). – Appr. 2009, January. – Geneva, 2009. – 110 p.