

УДК 621.391

Гасюк А.І., студент; Демидов І. В., д.т.н.; Климаш М.М., д.т.н.

## УЗАГАЛЬНЕНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ У DWDM-СИСТЕМАХ ПЕРЕДАВАННЯ

**Hasiuk A.I., Demydov I.V., Klymash M.M. The generalized approach to calculation of optical signal parameters in DWDM-based transmission systems.** This paper is devoted to consideration of the interdependencies of the parameters of the optical signal during its transmission by the linear paths' elements of the system with the spectral division of the channels, as well as the determination of the overall noise level in the such type of systems. The main nonlinear phenomena that may occur in optical fibers of linear paths of such transmission systems are considered. Separately, the issue of calculating the noise contribution of optical amplifiers is singled out. Brief practical guidelines for calculating and adjusting DWDM transmission systems that can be used in backbone transport information networks are provided.

**Keywords:** transport network systems, DWDM, optical noises, optical signal parameters, nonlinear effects, optical transmission systems

**Гасюк А.І., Демидов І.В., Климаш М.М. Узагальнений підхід до розрахунку параметрів оптичних сигналів у DWDM-системах передавання.** Статтю присвячено розгляду взаємозалежностей параметрів передавання оптичного сигналу елементами лінійних трактів системи зі спектральним ущільненням каналів, а також визначенню загального рівня шумів такої системи. Розглянуто основні нелінійні явища, які можуть мати місце у оптичних волокнах лінійних трактів таких систем передавання. Окремо виділено питання розрахунку вкладу шумів оптичних підсилювачів. Надано стислі практичні рекомендації щодо розрахунку та налаштування DWDM-систем передавання, що можуть бути використанні у магістральних транспортних інформаційних мережах.

**Ключові слова:** транспортні мережні системи, DWDM, оптичні шуми, параметри оптичних сигналів, нелінійні ефекти, оптичні системи передавання

**Гасюк А.И., Демидов И.В., Климаш М.Н. Обобщенный подход к расчету параметров оптических сигналов в DWDM-системах передачи.** Статья посвящена рассмотрению взаимозависимостей параметров передачи оптического сигнала через элементы линейных трактов системы со спектральным уплотнением каналов, а также определению общего уровня шумов такой системы. Рассмотрены основные нелинейные явления, которые могут иметь место в оптических волокнах линейных трактов таких систем передачи. Отдельно выделены вопросы расчета вклада шумов оптических усилителей. Представлены сжатые практические рекомендации по расчету и настройке DWDM-систем передачи, которые могут быть использованы в магистральных транспортных информационных сетях.

**Ключевые слова:** транспортные сетевые системы, DWDM, оптические шуми, параметры оптических сигналов, нелинейные эффекты, оптические системы передачи

### Вступ

У системах зі спектральним ущільненням каналів WDM, швидкість передавання є обмеженою, причиною цього є різного роду дисперсійні ефекти, які виникають у волокні, а внаслідок збільшення кількості каналів у середовищах передавання, наприклад – відрізках оптичного волокна, які мають нелінійності – можуть виникати міжканальні завади, які впливають на якість передавання у каналах групового оптичного тракту, а також провокують випадки, коли передавання інформації повністю переривається.

Також слід відмітити, що в ряді пристроїв спектрального розділення каналів використовується обладнання, яке з фізичної точки зору не є досконалим і може викликати появу паразитних перехресних завад між каналами, які мультиплекуються.

Усвідомлюючи загальну складність удосконалення параметрів апаратних засобів оптики, і, при цьому, враховуючи, що захисні смуги між каналами є доволі невеликими, вплив перехресних завад є одним із вирішальних факторів при проектуванні систем DWDM, а також забезпечення якісної роботи таких систем у цілому.

Тому, в першу чергу, потрібно визначити як співвідносяться значення параметрів корисного сигналу та перехресних завад у всьому оптичному тракті: тобто, на ділянках, де інформація в електронній формі введена в оптичний тракт, далі – на шляху її проходження у оптичній формі через набір ланок оптичної обробки шляхом транспортування і аж до виводу її із оптичного тракту, а саме – процесу детектування оптичного сигналу на приймальній стороні.

Взагалі, при розгляді питання перехресних завад важливо враховувати те, що передавання інформації у ВОСПІ здійснюється в двійковій формі, тобто можна говорити про певний коефіцієнт якості передачі – коефіцієнт помилок на виході оптичного тракту, який безпосередньо залежить від двох факторів – шумів системи та перехресних завад, які в деякій мірі також можна вважати шумами, у випадках, коли вони впливають на оптичний частотний канал.

Тому, можна стверджувати, що аналіз перехресних завад оптичної системи передавання класу DWDM можна провести, як оцінку якісних показників її роботи, розраховавши належним чином необхідні фактори впливу. На практиці існує дві основні категорії обладнання, яким здійснюють оброблення оптичного сигналу: пасивне та активне.

До активного обладнання відноситься все, що пов'язане з генеруванням квантової енергії у оптичній системі: джерела випромінювання, модулятори Келдиша-Франца, різноманітні електрооптичні модулятори, оптичні підсилювачі класу EDFA, раманівські оптичні підсилювачі, приймальні оптичні фотодетектори [5, 7-8].

До пасивного обладнання – фільтри (наприклад, Фабрі-Перо, ґратки Брега), оптичні циркулятори, вентиля, оптичні комутатори різних типів і, власне, саме оптичне волокно [10].

Розгляд поняття перехресних завад необхідно починати із середовища поширення хвиль – оптичного волокна. Як відомо, волокно може виявляти певні нелінійні ефекти в тому випадку, якщо потужність випромінювання лазера є достатньою. Волокно при його використанні за технологією DWDM – це групове середовище поширення у якому існують нелінійності – хоча й незначні, але, тим не менше, істотні зміщення в частотній області, зокрема у ділянках, які безпосередньо пов'язані з оптичними випромінювачами [1]. При цьому електромагнітні хвилі, не зазнаючи відчутного системного загасання, мають відносно високу потужність.

Слід також звернути увагу на погіршення властивостей оптичних волокон із часом. З цього можна зробити справедливий висновок, що на ділянках активної обробки оптичного сигналу якість оптичного волокна має бути ідеальною.

Метою цієї статті є узагальнений розгляд взаємозалежностей параметрів передавання оптичного сигналу елементами лінійних трактів системи зі спектральним ущільненням каналів, а також визначення загального рівня шумів такої системи.

### 1. Залежність між Q-фактором каналу передавання та коефіцієнтом помилок.

Головним параметром системи із цифровим методом передачі, який пов'язаний з якісними характеристиками є достовірність передавання інформації. Тому, для цифрових систем передачі таким коефіцієнтом є коефіцієнт помилок –  $K_{ном}$  (BER) або ймовірність помилок –  $P_{ном}$ , що виникає шляхом передачі певної кількості біт інформації у каналі зв'язку. Цей коефіцієнт  $P_{ном}$  можна записати, як функцію від відношення с/ш у оптичному каналі передавання. Таким чином, можна зробити висновок, що коефіцієнт  $P_{ном}$  еквівалентний розрахунку с/ш, що, у свою чергу, зводиться до аналізу загальних шумів системи, до складу яких входять перехресні завади, шуми апаратури, шуми, які стали наслідком інших нелінійних ефектів у оптичних волокнах.

Тому, як було зазначено вище, пропонується розрахувати якісні показники роботи системи передавання інформації – а саме коефіцієнти помилок на виходах. Якщо розглядати коефіцієнт помилок  $P_{ном}$ , то для його запису існує формула [1]:

$$P_{\text{ном}} = \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}}. \quad (1)$$

У цій формулі  $Q$ -фактор виступає системним параметром, який визначається статистичними закономірностями на приймальному пункті системи, де приймається рішення щодо визначення рівня сигналу у кожний конкретний момент часу. Для того, щоб точно визначити якість передавання інформації каналом волоконно-оптичної системи передавання, ці закономірності повинні враховувати всі шуми, завади і нелінійні явища, які впливають на систему в цілому.

## 2. Нелінійні явища в оптичних компонентах, які впливають на якість передавання.

Вплив Раманівського розсіювання (SRS - Stimulated Raman Scattering) значно менше позначається на якості передавання інформації, якщо порівнювати зі стимульованим Бріллюенівським розсіюванням (SBS). Реальні волоконно-оптичні лінії зв'язку можуть використовувати оптичний підсилювач (EDFA) з рівнем підсилення близьким до 25 дБп або кілька підсилювачів з дещо меншими рівнями підсилення вихідного сигналу. SRS за своєю природою близьке до SBS, але викликається іншими фізичними явищами [2].

Раманівське розсіювання є частотно-залежним і виникає у більш чітких формах на коротких хвилях, ніж на довгих хвилях - тобто на більш високих частотах. На рис. 1 а зображений типовий спектр 6-ти канальної DWDM-системи на довжині хвилі (1550 нм) на вході ВОЛЗ, а рис. 1 б ілюструє ефект Раманівського розсіювання SRS [4].

З цих рисунків можна побачити, що короткохвильові канали мають значно меншу амплітуду, у порівнянні з довгохвильовими каналами, як наслідок – спостерігається зміна амплітуд сигналів по кожному з каналів. І, як висновок, – більшому загасанню піддаються саме більш короткохвильові (високочастотні) канали.

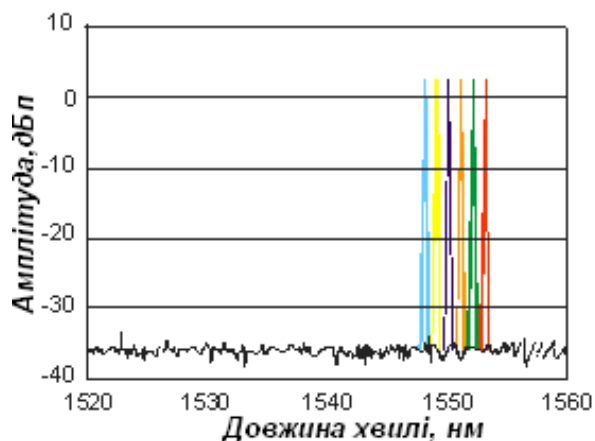


Рис.1 а. Спектр 6-ти канальної DWDM системи на довжині хвилі (1550 нм) на вході ВОЛЗ

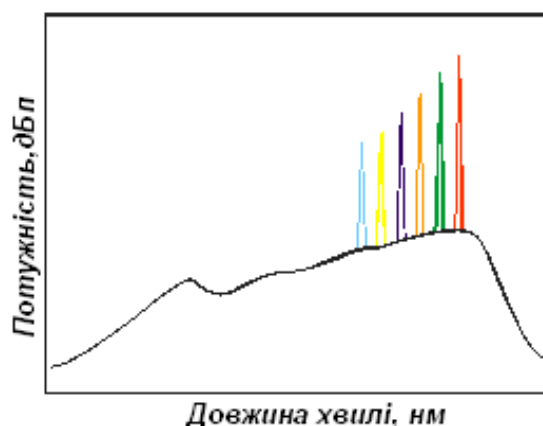


Рис.1 б. Ефект Раманівського розсіювання SRS

Явища спонтанного Бріллюенівського розсіювання (SBS) і Раманівського розсіювання (SRS) проявляються у тому, що оптичний сигнал розсіюється і зміщується у область більш довгих хвиль, див. рис. 2.

Якщо при SBS спектр стимульованого випромінювання вузький (не більше 60 МГц) і зміщений в сторону довго-хвильового випромінювання на 10...11 ТГц, то при SRS спектр стимульованого випромінювання є більш широким (~ 7 ТГц) та зміщений у сторону довго-хвильового випромінювання на величину порядку 10...13 ТГц.

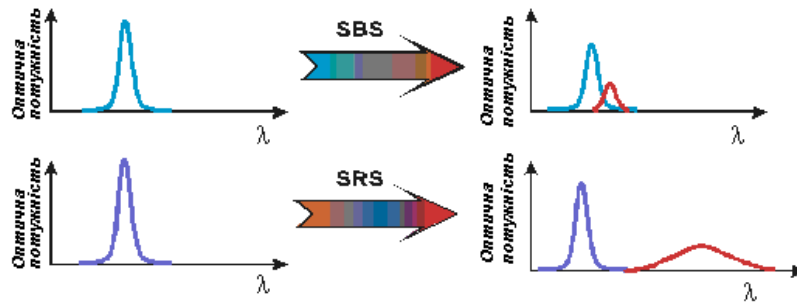


Рис. 2. Порівняння дії від ефектів SRS та SBS

Порівнюючи ефекти SBS і SRS, можна виділити декілька суттєвих відмінностей [3]:

- Явище SBS присутнє лише у випадку появи зустрічної хвилі (розсіювання відбувається тільки назад, у напрямку до джерела сигналу), в свою чергу SRS спостерігається як для зустрічних хвиль, так і для однонаправлених хвиль (виникає антистоксове випромінювання з рівнем порядку -70...-80 дБ відносно основної хвилі).
- При SRS спектр стимульованого випромінювання зміщений сильніше (різниця приблизно на три порядки), а ширина його набагато більша (приблизно на три порядки), ніж при SBS.
- Порогова потужність SRS набагато більша - приблизно на три порядки, ніж для явища SBS.

Таким чином, SRS, на відміну від SBS, не обмежує величину оптичної потужності, яка вводиться у волокно. Тому, навіть при використанні дуже потужного широкопasmового оптичного підсилювача з  $P_{вих} = 26$  дБп у системі DWDM (розріджене хвилеве мультиплексування) з 8-ма каналами, спектральна оптична потужність, яка приходить на канал, складає тільки 17 дБп:

$$P_{SRS,T} = P_{SRS} - 10 \lg N, \quad (2)$$

де  $N$  – число оптичних каналів. Проте, SRS відіграє велику роль у оптичних системах, адже завдяки ньому у широкій смузі частот забезпечується необхідне підсилення, і ця смуга частот зміщена в довгохвильову сторону відносно довжини хвилі накачки на величину  $\sim 12-15$  ТГц. Формула для розрахунку мінімального значення порогової потужності  $P_{SRS}$  для виникнення явища SRS записується у вигляді:

$$P_{SRS} \approx \frac{16K_{SRS}A_{ef}}{g_R L_{ef}}, \quad (3)$$

де:  $K_{SRS}$  – числове значення, яке залежить як від поляризаційного стану хвилі випромінювання, типове значення для більшості практичних застосувань  $K_{SRS} = 2$ .

$g_R \approx 4,2 \cdot 10^{-14}$  м/Вт – SRS підсилювальний коефіцієнт;

$A_{ef}$  - ефективна площа ядра оптичного волокна (ОВ) в м<sup>2</sup>;

$L_{ef}$  – ефективна довжина ОВ, що отримується з виразу:

$$L_{ef[км]} = \frac{4,343}{\alpha} [1 - e^{-0,23\alpha L[км]}], \quad (4)$$

де:  $L$  - довжина відрізка ОВ,  $\alpha$  - коефіцієнт загасання ОВ (дБ/км).

### 3. Розрахунок загального рівня шумів системи передавання з DWDM

В загальному пропонується рівень шумів розрахувати за допомогою наступного виразу[1]:

$$P_{ш} = N \cdot (k_1(N)K_{ш.ДВ} + 2k_2K_{ш.ОМ} + M \cdot k_3K_{ш.ОП} + k_4(N)K_{ш.ФП}) + K_{ш.ОБ}, \quad (5)$$

де  $N$  – кількість частотних каналів,

$k_1 \dots k_4$  – коефіцієнти співвідношень,

$K_{ш.ДВ}$  – значення коефіцієнта шумо-завад для джерел випромінювання,

$K_{ш.ОМ}$  – коефіцієнт шумо-завад оптичного мультиплексора,

$K_{ш.ОП}$  – коефіцієнт шумо-завад для оптичного підсилювача,

$M$  – кількість підсилювачів,

$K_{ш.ФП}$  – коефіцієнт шумо-завад для фотоприймачів ВОСП,

$K_{ш.ОБ}$  – коефіцієнт шумо-завад для волокна оптичних трактів.

Всі коефіцієнти мають бути подані для абсолютних потужностей. Значення  $K_{ш.ОБ}$  формується завдяки двом основним нелінійним явищам у одномодових оптичних волокнах, які були розглянуті раніше:

$$K_{ш.ОБ} = K_{SRS} + K_{SBS}, \quad (6)$$

де  $K_{SRS}$  – вплив розсіювання Рамана-Мандельштама,  $K_{SBS}$  – вплив розсіювання Мандельштама-Бріллюена.

Якщо визначені специфікації щодо DWDM G.692, G.957 вимагають дотримання малої ширини смуги випромінювання (0.01...0.5 нм), то далеко не всі випромінювачі забезпечують її [4-7].

Спектр сигналу, модульованого за інтенсивністю нагадує спектр АМ-сигналу. Він містить бічні складові, причому спектр вихідного сигналу має бути практично обмеженим першою гармонікою тактової частоти. Вихід за межі вказаних частотних смуг призведе до появи недопустимих перехресних завад [1].

Оптичний підсилювач підіймає рівень не тільки корисного оптичного сигналу, а й паразитних гармонік, які, власне, й складають основу для перехресних завад оптичних систем. Крім цього, оптичні підсилювачі (як EDFA, так і на основі SRS) мають власні шуми.

Наявність коефіцієнта шуму (NF) підсилювача викликана підсиленням спонтанним випромінюванням (ASE). Коефіцієнт шуму волоконно-оптичного підсилювача визначається з наступного виразу:

$$NF_{[дБ]} = \frac{2P_{ASE}}{h\nu_c \Delta\nu (G_A - 1)}. \quad (7)$$

Тут  $P_{ASE}$  – потужність підсиленого спонтанного випромінювання,  $h$  – постійна Планка,  $\nu_c$  – частота сигналу. Причому:

$$P_{ASE} = 2n_s h\nu \Delta\nu_A (G_A - 1). \quad (8)$$

Де  $n_s$  – коефіцієнт спонтанної емісії. Коефіцієнт спонтанної емісії може приймати значення від 1 до 10 для оптичних підсилювачів з  $G_A > 1$ . Для типових ербієвих підсилювачів сучасних ВОСП з  $G_A \gg 10$  дБ типове значення NF лежить у межах 3дБ < NF < 6дБ [9]. Якщо

підсилювачі вмикаються послідовно каскадами, то можна показати, що шум фактор першого каскаду визначає шум-фактор всього підсилювача [2]. Коефіцієнт шуму  $NF_R$  раманівського розподіленого підсилювача визначається із виразу:

$$NF_R = 2 / \ln G_R, \quad (9)$$

де  $G_R$  – коефіцієнт підсилення раманівського підсилювача, який визначається з виразу:

$$G_R = e^{\frac{g_R P_n L}{A_{ef}}}. \quad (10)$$

У (10)  $g_R$  – раманівський коефіцієнт,  $P_n$  – потужність накачки,  $A_{ef}$  – ефективна площа перерізу,  $L$  – довжина волокна. Можна прийняти, що  $g_R = 7 \cdot 10^{-17}$  км/Вт. Потужність накачки у дійсності лежить у межах від 0,5...0,8 Вт до декількох ват.

Отже, отримуємо загальний коефіцієнт шуму каскадованого оптичного підсилювача:

$$K_{ш.оп} = \frac{1}{M} \sum_M K_{ш.кан} \cdot (NF_{A_M} - K_{A_M}), \quad (11)$$

де  $NF_{A_M}$  – шуми конкретного підсилювача,  $K_{A_M}$  – коефіцієнт підсилення підсилювача,  $K_{ш.кан}$  – коефіцієнт шумо-завад каналу передавання, отриманий перед кожним оптичним підсилювачем,  $M$  – кількість оптичних підсилювачів.

Шуми фотодетектора, відповідний їм коефіцієнт  $K_{ш.ФП}$ , а також відповідний коефіцієнт для передавача  $K_{ш.ДВ}$  задаються, виходячи із даних виробників, які ними надаються.  $K_{ш.ОМ}$  – також розраховується, виходячи з даних виробників обладнання.

На практиці враховується 3 дБ запас за відношенням сигнал/шум завдяки кодуванню (FEC), яке застосовується на магістральних ВОСПІ. Цей запас вводиться як покращення с/ш на фотодетекторі і є далеко не максимальним можливим [1].

## Висновки

У цій роботі стисло розглянуто основні нелінійні явища, які виникають під час поширення сигналу у DWDM системах, що в свою чергу негативно впливає на якість передавання сигналу. З аналізу, отриманого на рис. 2 можна зробити висновок, що явища Бріллюенівського розсіювання (SBS) і Раманівського розсіювання (SRS) проявляються у тому, що енергія оптичного сигналу розсіюється і зміщується у область більш довгих хвиль. Також слід відмітити, що якщо при SBS спектр стимульованого випромінювання вузький і зміщений у сторону більш довгих хвиль на 10-11 ТГц, то при SRS спектр стимульованого випромінювання є більш широким та зміщеним у сторону більш довгих хвиль на величину порядку 10-13 ТГц. Також було розглянуто параметри, які безпосередньо впливають на загальний рівень шумів DWDM системи передавання; слід відзначити що вплив перехресних завад є одним із вирішальних факторів при проектуванні такого типу систем, а також забезпечення їх якісного проектування, налаштування і експлуатації в цілому. Таким чином, у цій роботі розглянуто взаємозалежності параметрів передавання оптичного сигналу елементами лінійних трактів системи зі спектральним ущільненням каналів, а також виконано розрахунок загального рівня шумів у оптичному каналі такої системи із урахуванням впливу основних нелінійних явищ, які мають місце у оптичних волокнах.

**Список використаної літератури**

1. Методи та засоби підвищення ефективності оптичних транспортних систем [Текст] : [монографія] / М. В. Захарченко, М. М. Климаш. - Л. : [б.в.], 2007. - 186 с. : рис. - Бібліогр.: с. 177-182.
2. Климаш М.М. Аналіз якості функціонування транспортних оптичних DWDM систем / М.М. Климаш, І.В. Демидов, М.І. Олексін // Зв'язок. – 2006. – №7. – С. 9-13.
3. Климаш М.М. Аналіз конфігурації та параметрів DWDM систем оптичних магістральних трактів / М.М. Климаш, І.В. Демидов, І.Б. Чайковський // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Львів, 2006. – №557. – С. 85-94.
4. Roger L. Freeman, Fiber-Optic Systems for Telecommunications, 2nd ed., John Wiley&Sons, New York, 2002 5. Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004.– С. 176-187.
5. G.692: Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers // Series G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks. – Geneva: ITU-T, 1998. – 41 p.
6. G.957: Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy // Series G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks. – Geneva: ITU-T, 2006. – 38 p.
7. Фокин В.Г. Автоматически коммутируемые оптические транспортные сети ASTN/ASON: учеб. пособие. - Новосибирск, 2006. - 105с.
8. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети: Учеб. пособие. М.: Эко-Трендз, 2008. - 284с.
9. Sun Y., Srivastava A.K., Zhou J., Sulhoff J.W. Optical Fiber Amplifiers for WDM Optical Networks // Bell Labs Technical Journal. - 1999. - vol.4. - №1. - pp. 187-206.
10. Kaminow LP. and Koch T.L. Optical Fiber Telecommunications III. - San Diego, California: Academic Press, 1997. - 515p.

**Автори статті**

**Гасюк Андрій Іванович** – магістрант кафедри телекомунікацій, Національний університет «Львівська політехніка».

**Демидов Іван Васильович** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри телекомунікацій, Національний університет «Львівська політехніка».

**Климаш Михайло Миколайович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри телекомунікацій, Національний університет «Львівська політехніка».

**Authors of the article**

**Hasiuk Andrii Ivanovych** – Master's Degree Student at Telecommunications department, Lviv Polytechnic National University, Lviv.

**Demydov Ivan Vasylovych** – Doctor of science (engineering), assoc. prof., associate professor at Telecommunications department, Lviv Polytechnic National University, Lviv.

**Klymash Mykhailo Mykolaiovych**– Doctor of science (engineering), professor, Head of Telecommunications department, Lviv Polytechnic National University, Lviv.

Дата надходження в редакцію: 09.01.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В.П. Тарасенко