

УДК 621.391

ТРУБЧАНИНОВА К. А., к.т.н., доцент (Український державний університет залізничного транспорту),

ЮР'ЄВА Ю. Д., магістрант (Український державний університет залізничного транспорту),

ПАНЧЕНКО А. С., студент (Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна)

## Розрахунок впливу нелінійних ефектів в системах DWDM на енергетичні характеристики сигналу

*Досліджується вплив нелінійних ефектів в оптичному волокні на процеси поширення оптичного сигналу в системах DWDM та їх вплив на якість передачі даних. У статті наведено формули і розраховано втрати потужності сигналу в оптичному каналі в результаті дії ефектів фазової самомодуляції, перехресної фазової модуляції, вимушеного розсіювання Рамана і вимушеного розсіювання Брілюена.*

**Ключові слова:** нелінійні ефекти, оптичне волокно, технології хвильового мультиплексування, DWDM.

### Вступ

В даний час активно ведеться впровадження технології щільного хвильового мультиплексування DWDM (Dense Wavelength - division Multiplexing), яка дозволяє багаторазово збільшити пропускну спроможність існуючих телекомунікаційних систем та об'єднати різні види телекомунікаційних технологій в єдину інформаційну інфраструктуру. Основним компонентом системи DWDM є оптичне волокно. В оптичному середовищі передачі сигналів в сукупності з іншими особливостями технології DWDM створюються різні нелінійні ефекти, що призводять до перехресних перешкод між оптичними каналами і зниження потужності сигналу, який передається. Це призводить до зниження якості передачі в телекомунікаційній системі DWDM [2,3].

В більшості робіт, присвячених дослідженню впливу нелінійних ефектів в оптичному волокні на процеси поширення оптичного сигналу, не розглядається їх вплив на якість передачі даних. Однак, вплив нелінійних ефектів, таких як фазова самомодуляція, перехресна фазова модуляція, вимушене розсіювання Рамана і вимушене розсіювання Брілюена - призводить до зменшення потужності оптичного сигналу і, як наслідок, до зменшення захищеності сигналу від перешкод.

Тому основною метою даної статті є дослідження впливу нелінійних ефектів на зниження потужності оптичних сигналів у волокні і оптичних шумів.

### Основна частина

Загальні втрати потужності оптичного сигналу, що викликаються нелінійними ефектами (SPM, CPM, SRS, SBS), розраховуються таким виразом:

$$\Delta P = \Delta P_{SPM} + \Delta P_{CPM} + \Delta P_{SRS} + \Delta P_{SBS}, \quad (1)$$

де  $\Delta P_{SPM}$  – ефект самомодуляції;

$\Delta P_{CPM}$  – ефект перехресної фазової модуляції;

$\Delta P_{SRS}$  – розсіювання Рамана;

$\Delta P_{SBS}$  – розсіювання Брілюена.

### Дослідження впливу ефекту самомодуляції SPM

Вплив ефекту фазової самомодуляції (SPM – Self - Phase Modulation) обумовлено нелінійним набігом фази, якого оптичний сигнал набуває при поширенні у світловоді. Самомодуляція – це явище, в результаті якого сигнал може модулювати свою власну фазу. Це призводить до часового розширення або звуження переданого імпульсу. В результаті відбувається зрушення фронтів імпульсу в бік довгих і коротких хвиль. Таким чином SPM призводить до зміни швидкості розширення імпульсу [1,3,4].

Втрати потужності сигналу в оптичному каналі в результаті дії ефекту самомодуляції визначаються за такою формулою:

$$\Delta P_{SPM} = 5 \log \left( 1 + \sqrt{2} \cdot \varphi_{SPM} \cdot \frac{L}{L_D} + \left( 1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \varphi_{SPM}^2 \right) \cdot \frac{L^2}{L_D^2} \right), \quad (2)$$

де  $\varphi_{SPM}$  - максимальний фазовий зсув при ефекті;

$L$  – довжина підсилювальної ділянки;

$L_D$  - дисперсійна довжина для урахування дисперсійних ефектів при поширенні імпульсу вздовж довжини світловода ( $L$ ).

Ефект впливу SPM проявляється зі збільшенням швидкості передачі інформації в оптичному каналі (рис. 1) і при збільшенні потужності оптичного сигналу (рис. 2).

Зменшення частотної відстані між каналами або збільшення числа каналів зв'язку не впливає на ефект SPM. Вплив фазової самомодуляції зменшується, якщо хроматична дисперсія нульова або незначна за величиною (до 6 пс/(нм·км)), а також при збільшенні ефективної площі серцевини оптичного волокна.

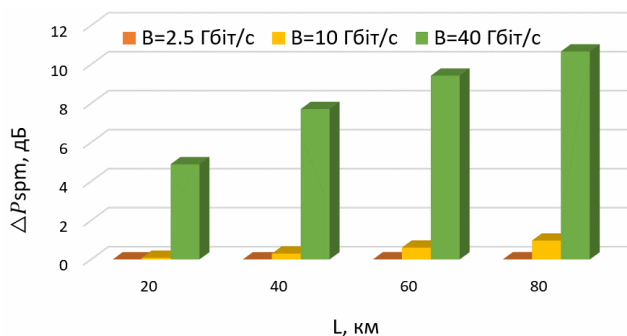


Рис. 1. Залежність втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки для різних значень швидкості передачі інформації

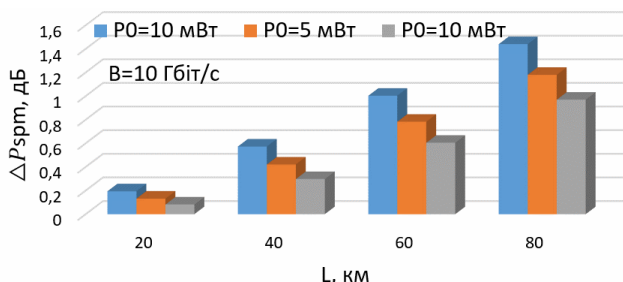


Рис. 2. Залежність втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки для різних значень вхідної потужності оптичного сигналу

Реально вплив SPM значний (втрати становлять кілька децибел (дБ)) тільки в системах DWDM з високим значенням швидкості передачі ( $B \geq 10$  Гбіт/с), високим значенням питомої дисперсії або в системах великої протяжності.

*Дослідження впливу ефекту перехресної фазової модуляції СРМ*

Зміна показника заломлення волокна виникає не тільки через фазову самомодуляцію хвиль (SPM), а й через СРМ (Cross Phase Modulation) ефект - перехресну фазову модуляцію хвиль, що виникає при взаємодії з хвилями, які поширюються в інших каналах DWDM системи. СРМ обумовлений набігом фази сигналу, наведеного електромагнітним нулем, з іншою

довжиною хвилі. СРМ викликає розширення спектра переданого сигналу, зміну потужності оптичного сигналу в каналах системи DWDM, взаємні впливи між сусідніми оптичними каналами. Величина розширення спектра сигналу, що вноситься СРМ, залежить від частотної відстані між каналами.

Залежності втрат потужності сигналу від СРМ для різних значень вхідної потужності системи DWDM з 40 каналами подано на рис. 3.

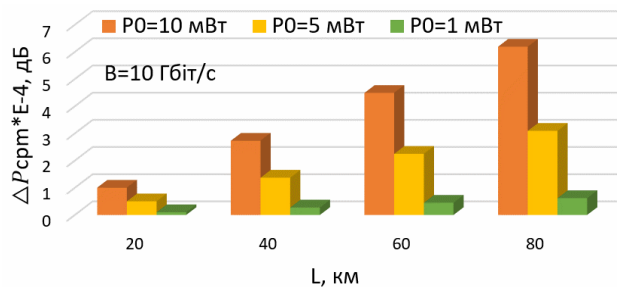


Рис. 3. Залежність втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки для різних значень вхідної потужності системи DWDM з 40 каналами

Так як потужність оптичного сигналу в кожному каналі системи DWDM повинна бути приблизно однаковою, то ефект СРМ збільшує нелінійний фазовий зсув, що виникає через СРМ ефект, приблизно в  $2\sqrt{N}$  раз, де  $N$  - число оптичних каналів в системі DWDM.

Перехресна фазова модуляція призводить також і до появи амплітудних спотворень і часового джиттера. Ці спотворення проявляються тим сильніше, чим вище швидкість передачі сигналу і менше інтервал частот між каналами (рис. 4).

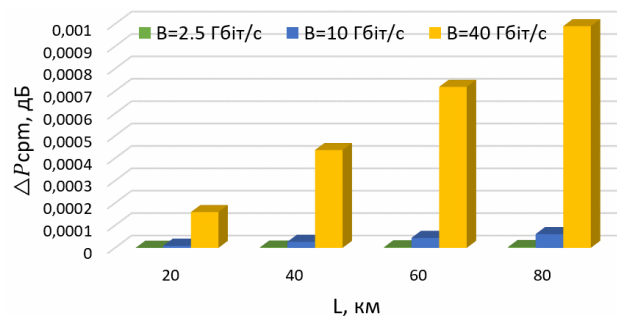


Рис. 4. Залежність втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки для різних значень швидкості передачі інформації

Втрати потужності сигналу в оптичному каналі в результаті впливу СРМ визначаються за такою формулою:

$$\Delta P_{CPM} = 5 \log \left( 1 + \sqrt{2} \cdot \varphi_{CPM} \cdot \frac{L}{L_D} + \left( 1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \varphi_{CPM}^2 \right) \cdot \frac{L^2}{L_D^2} \right), \quad (3)$$

де  $\varphi_{CPM}$  - фазовий зсув через ефект CPM.

У системах DWDM спотворення сигналів, викликані впливом ефекту CPM, вносять в основному сусідні за частотою канали. Вплив CPM може бути знижено раціональним вибором кроку частот між каналами, а також зменшенням потужності сигналу в оптичному каналі.

*Ефект вимушеного розсіювання Рамана і Брілюена*

Явища вимушеного розсіювання Рамана (SRS) і Брілюена (SBS) проявляються в тому, що потужність оптичного сигналу, який вводиться у волокно, розсіюється, відповідно, на звукових хвилях, що поширюються у волокні (акустичних фононах) і на молекулярних коливаннях волокна (оптичних фононах). При цьому спектр сигналу зміщується в область більш довгих хвиль. При вимушеному розсіюванні Рамана (SRS) спектр спонтанного випромінювання широкий (близько 7 ТГц або 55 нм) і зміщений в довгохвильову сторону на величину порядку 13 ТГц. При вимушеному розсіюванні Брілюена (SBS) спектр спонтанного випромінювання вузький (3.0 + 60 МГц) і зміщений в довгохвильову сторону на 11 ТГц.

*Вплив ефекту вимушеного розсіювання Рамана*

Фізична причина явища вимушеного розсіювання Рамана (SRS - Stimulated Raman Scattering) полягає в поглинанні фотона молекулою і використанні частини енергії фотона на збудження коливань цієї молекули. Частина енергії використовується на випускання фотона з більш низькою частотою. Цей ефект використовується для посилення сигналів в спектральних каналах DWDM систем.

Негативний прояв ефекту вимушеного розсіювання Рамана полягає в тому, що сигнали в оптичних каналах системи DWDM зазнають погіршення відношення сигнал/шум, так як частина потужності сигналів перекачується в довгохвильові канали [1,3,4].

Розрахунок втрат потужності сигналу в оптичному каналі зв'язку проводиться за такою формулою:

$$\Delta P_{SRS} = 10 \log \left( \frac{1}{D_P} \right), \quad (4)$$

де  $D_P$  - фактор виснаження сигналу.

Наведений метод розрахунку впливу SRS не враховує кількості каналів N в системі DWDM. Для визначення впливу ефекту раманівського розсіювання в

багатоканальних системах необхідно розглядати коефіцієнт раманівського посилення  $g(\Delta\lambda)$  в залежності від інтервалу довжини хвилі  $\Delta\lambda$ :

$$g(\Delta\lambda) = g_R \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_c}, \quad (5)$$

де  $\Delta\lambda_c$  - ширина смуги пропускання комбінаційного (раманівського) розсіювання.

Частина потужності сигналу, що надійшла з i-го каналу в усі канали:

$$\delta_{SRSi} = g_R \frac{\Delta\lambda P_0 L_{ef}}{2\Delta\lambda_c A_{ef}} \cdot \frac{N(N-1)}{2}, \quad (6)$$

де  $g_R$  - коефіцієнт раманівського посилення;

$P_0$  - потужність оптичного сигналу на вході каналу;

$L_{ef}$  - ефективна довжина взаємодії

електромагнітних хвиль;

$A_{ef}$  - ефективна площа серцевини оптичного волокна.

Втрати потужності сигналу для i-го каналу складуть

$$\Delta P_{SRSi} = -10 \log(1 - \delta_{SRSi}). \quad (7)$$

Ступінь впливу ефекту вимушеного раманівського розсіювання SRS збільшується зі збільшенням потужності сигналу в оптичному каналі; зі збільшенням кількості каналів; зі збільшенням міжканального інтервалу; зі зменшенням ефективної площі волокна; зі збільшенням довжини підсилювальної ділянки. Ефект SRS практично не вносить погіршення в роботу одноканальних систем зв'язку, однак він може створити серйозні проблеми в системах DWDM з великим числом каналів (рис. 5, 6).

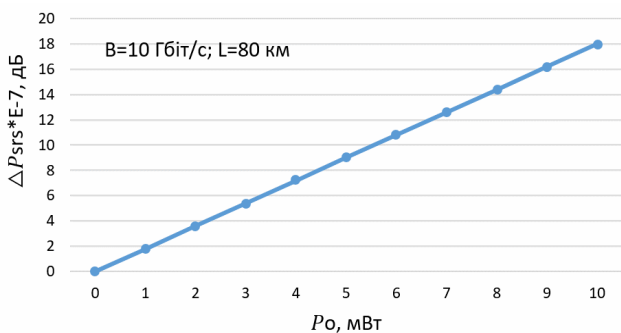


Рис. 5. Залежності втрат потужності сигналу у результаті дії SRS від введеної в оптичне волокно потужності сигналу

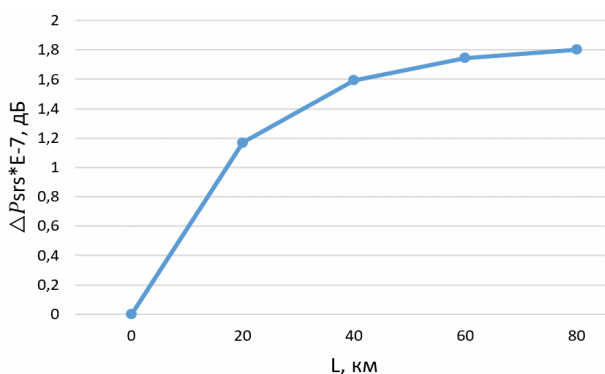


Рис. 6. Залежності втрат потужності сигналу у результаті дії SRS від довжини

Для ослаблення впливу SRS вимагається зменшення введеної потужності сигналу. При цьому, як результат, зменшиться довжина підсилювальної ділянки. Зменшення міжканального інтервалу дозволить знизити вплив SRS, але при цьому зросте вплив інших нелінійних ефектів.

*Вплив ефекту вимушеного розсіювання Брілюєна*

Фізична причина появи вимушеного розсіювання Брілюєна (SBS - Stimulated Brillouin Scattering) полягає в тому, що відбувається взаємодія хвилі світла, яка поширюється в прямому напрямку і хвилі світла, розсіяної в зворотному напрямку, а також теплової пружної хвилі. В результаті такої взаємодії виникають періодичні області волокна зі змінним показником заломлення. Відображення оптичного сигналу проявляються у вигляді назад розсіяного світла з доплерівським зниженням частоти (зрушенням в область довгих хвиль). Це призводить як до ослаблення потужності сигналу, що передається в оптичному волокні в прямому напрямку, так і до появи відбитого випромінювання.

Ефект впливу SBS повинен бути врахований і при малих канальних потужностях сигналу, особливо при

використанні лазерів з малою шириною спектра.

Вплив ефекту вимушеного розсіювання Брілюєна не залежить від кількості оптичних каналів в системі DWDM, але залежить від швидкості передачі даних в оптичному каналі.

Формула розрахунку втрат потужності оптичного сигналу в результаті впливу ефекту SBS набуде вигляду

$$\Delta P_{SBS} = 10 \log \left( \frac{1 + G_A}{2} \right), \tag{8}$$

де  $G_A$  - коефіцієнт ненасиченого посилення брілюєнівського розсіювання.

Втрати потужності сигналу в результаті прояви вимушеного розсіювання Брілюєна (SBS) збільшуються при збільшенні потужності сигналу в оптичному каналі; зменшенні швидкості передачі інформації в каналі; зменшенні ширини смуги джерела випромінювання (зміна ширини смуги джерела випромінювання пропорційна зміні швидкості передачі); зменшенні ефективної площі серцевини волокна; збільшенні ширини смуги брілюєнівського розсіювання; збільшенні довжини підсилювальної ділянки [1,3,4].

На відміну від ефекту SRS брілюєнівське розсіювання не залежить від числа каналів в системі і від міжканального інтервалу. Ефект SBS може спостерігатися і в одноканальних системах. Значною мірою на прояв ефекту SBS впливає швидкість передачі (рис. 7) і, відповідно, ширина смуги джерела випромінювання.

Причому при збільшенні швидкості передачі втрати потужності сигналу через ефект SBS стають менше (рис. 8).

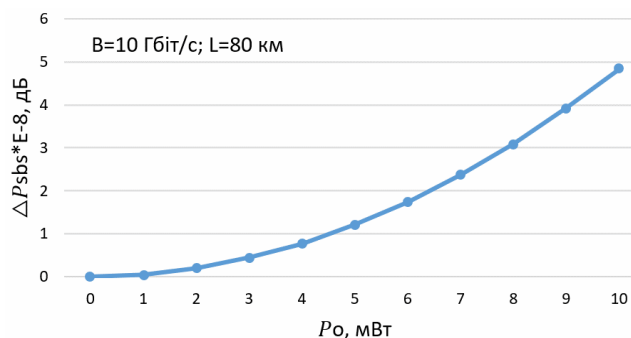


Рис. 7. Залежності втрат потужності сигналу в результаті дії ефекту SBS від введеної потужності сигналу

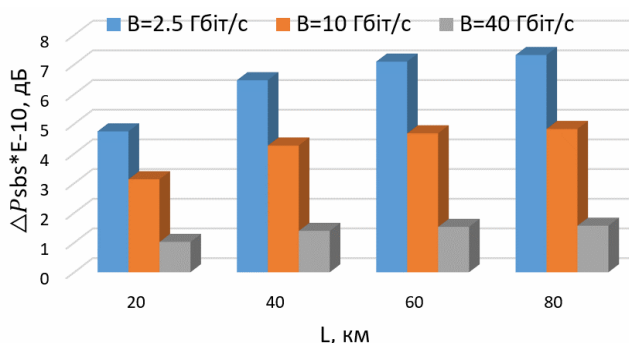


Рис. 8. Залежності втрат потужності сигналу в результаті дії ефекту SBS від довжини підсилювальної ділянки

З урахуванням всіх попередніх розрахунків загальні втрати потужності оптичного сигналу (рис. 9), що викликаються нелінійними ефектами (SPM, CPM, SRS, SBS), розраховуються за формулою (1) і проявляються зі збільшенням швидкості передачі інформації в оптичному каналі.

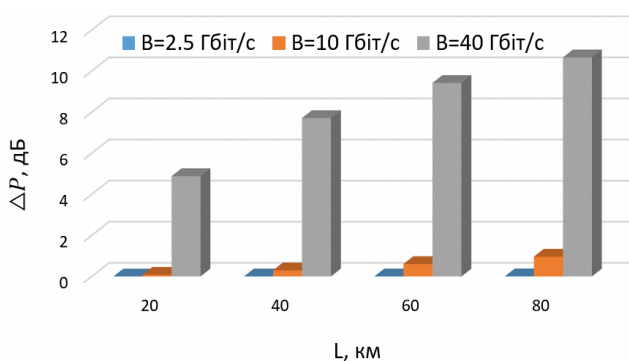


Рис. 9. Залежності загальних втрат потужності сигналу в результаті дії нелінійних ефектів від довжини підсилювальної ділянки

### Висновки

Проведені в роботі дослідження показали, що нелінійні явища: вимушене (стимульоване) розсіювання Рамана, вимушене розсіювання Брілюєна, фазова само модуляція хвиль та перехресна фазова модуляція можуть призводити до значних змін ширини і форми імпульсів, а також до появи перехресних перешкод, що залежать від числа каналів в системі DWDM. Тому подальше дослідження буде направлено на розрахунок рівня потужності сигналу, а також величини відношення сигнал/шум з урахуванням втрат через вплив нелінійних ефектів.

### Список використаних джерел

1. Shestakov, I. I. Inter-channel encoding in DWDM systems, as a new way to improve the spectral efficiency [Text] / I.I. Shestakov, I.I. Salifov, E.I. Gnilomyodov // T-Comm. - 2016. - Vol. 10. - No.5. - P. 27-31.
2. Кись, О. М. Проектування волоконно-оптичної транспортної мережі. [Текст]: навч. посібник / О. М. Кись, В. І. Корнійчук. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014. – 92 с.
3. Слепов, Н. Фотонно-кристаллическое волокно – уже реальность. Новые типы оптических волокон и их применение [Текст] / Н. Слепов. // Электроника. – Наука, Технология, Бизнес. – 2004. – № 5. – С. 80-84.
4. Трубочанинова, К. А. Анализ основных принципов компенсации модовой дисперсии в оптическом волокне при використанні технології WDM [Текст] / К. А. Трубочанинова, В. В. Макарова // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 118. – С. 40-46.

### Трубочанинова К. А., Юрьева Ю. Д., Панченко А. С. Расчет влияния нелинейных эффектов в системах DWDM на энергетические характеристики сигнала.

Исследуется влияние нелинейных эффектов в оптическом волокне на процессы распространения оптического сигнала в системах DWDM и их влияние на качество передачи данных. В статье приведены формулы и рассчитаны потери мощности сигнала в оптическом канале в результате действия эффектов фазовой само модуляции, перекрестной фазовой модуляции, вынужденного рассеяния Рамана и вынужденного рассеяния Бриллюэна.

**Ключевые слова:** нелинейные эффекты, оптическое волокно, технологии волнового мультиплексирования, DWDM.

### Trubchaninova K., Yurieva Y., Panchenko A. Calculation of the effect of nonlinear effects in DWDM systems on the energy characteristics of a signal.

Nowadays DWDM (Dense Wavelength - Division Multiplexing) technology that allows increasing manifold bandwidth capability of existing telecommunication systems and combining different types of telecommunication technologies into a single information infrastructure is being implemented actively. The main component of the DWDM system is an optical fibre. Various nonlinear effects that result in cross-interference between the optical channels and in the power reduction of the transmitted signal are created in the optical medium of signal transmissions in combination with other features of the DWDM technology. This results in lower transmission quality in the DWDM telecommunication system. Most

works devoted to the research of the influence of nonlinear effects in optical fibre on the processes of propagation of the optical signal do not consider their influence on the quality of data transmission. However, the influence of nonlinear effects such as: self-phase modulation, cross-phase modulation, stimulated Raman scattering and stimulated Brillouin scattering - leads to the decrease in the power of the optical signal and, as a result, to the reduction of a signal immunity from interferences. Therefore, the main purpose of this article is to study the influence of nonlinear effects on the reduction of optical signal power in the fibre and optical noises.

**Keywords:** nonlinear effects, optical fiber, wave multiplexing technologies, DWDM.

*Надійшла 10.05.2018 р.*

*Трубчанінова Карина Артурівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [tka2@ukr.net](mailto:tka2@ukr.net), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2078-2647>.*

*Юр'єва Юлія Дмитрівна, магістрант Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [yuliiayurieva3@gmail.com](mailto:yuliiayurieva3@gmail.com).*

*Панченко Артем Сергійович, студент Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, м. Харків, Україна. E-mail: [panchenko074@ukr.net](mailto:panchenko074@ukr.net).*

*Trubchaninova Karyna, PhD. Sc., associate professor, Department of transport communication of Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: [tka2@ukr.net](mailto:tka2@ukr.net), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2078-2647>.*

*Yurieva Yuliia, gs of Department of transport communication of Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: [yuliiayurieva3@gmail.com](mailto:yuliiayurieva3@gmail.com).*

*Panchenko Artem, student of the V. N. Karazin Kharkiv National University. E-mail: [panchenko074@ukr.net](mailto:panchenko074@ukr.net).*