

ЄЛІЗАРЕНКО А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

**Організація мереж поїзного радіозв'язку в умовах гірської місцевості та в тунелях залізниць**

*Розроблено пропозиції з організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку в гірських районах різної складності та в тунелях залізниць.*

*В умовах гірської місцевості суттєво ускладнені умови поширення радіохвиль УКХ діапазонів, що призводить до зростання згасання сигналів і підвищення глибини флуктуацій.*

*Канали УКХ діапазону в тунелях можна організувати тільки з використанням випромінюючих кабелів, які не тільки забезпечують передавання електромагнітної енергії вздовж тунелю, а і сприяють випромінюванню електромагнітної енергії в зоні прокладання. Запропоновано організацію дводіапазонних систем гектометрового та метрового діапазонів із використанням єдиної випромінюючої мережі.*

**Ключові слова:** залізничний технологічний радіозв'язок, організація каналів у гірській місцевості, використання каналів із випромінюючими кабелями в тунелях.

**Вступ**

Питання організації і проєктування мереж поїзного радіозв'язку в умовах гірської місцевості на ділянках із залізничними тунелями є актуальними. Значна частина ліній Львівської залізниці розташована в Карпатському регіоні, для якого характерні складні умови поширення радіохвиль і наявність залізничних тунелів значної протяжності. Найбільший із них, Бескидський, має довжину 1765 м. Значення європейських коридорів зростає через плани будівництва європейської колії 1435 см на ділянках Чоп-Ужгород, Львів-Мостиська та ін.

Поїзний радіозв'язок організовано вздовж ділянок залізниць для зв'язку машиністів поїзних локомотивів із черговими по станціях і поїзним диспетчером. За ПТЕ, на кожній ділянці залізниці мають бути організовані лінійні мережі в гектометровому та зонні мережі поїзного радіозв'язку в метровому діапазоні радіохвиль [1, 2], причому лінійний канал поїзного радіозв'язку організований уздовж всієї диспетчерської ділянки в гектометровому діапазоні радіохвиль.

На жаль, чинні рекомендації ІТУ-R не містять чітких рекомендацій з інженерних розрахунків каналів поїзного радіозв'язку в гірських умовах.

Одна з фундаментальних рекомендацій ІТУ-R Р.1546 є статистичною моделлю поширення радіохвиль, яка розроблена для умов середньопересіченої місцевості. У той же час розрахунок поправок на рельєф місцевості ускладнений і неоднозначний [3].

У рекомендації ІТУ-R Р.1406 наведено різні фактори поширення радіохвиль, які впливають на мережі рухомого радіозв'язку [4].

Ці рекомендації не містять конкретних методів з інженерних розрахунків каналів у гірській місцевості, а лише загальні рекомендації.

Водночас відомчі правила розрахунку опрацьовані глибше і допомагають розраховувати канали з урахуванням різних особливостей трас поширення радіохвиль [5].

У гектометровому діапазоні радіохвиль низька ефективність насамперед локомотивних антен, тому для передавання електромагнітної енергії використовують напрямні лінії, що дає змогу сконцентрувати напруженість поля корисного сигналу безпосередньо в зоні проходження колії.

У гірській місцевості суттєво скорочена дальність радіозв'язку в УКХ діапазоні порівняно з каналами на відкритій місцевості. Практично єдиним способом забезпечити організацію УКХ радіоканалів у тунелях залізниць є використання випромінюючих кабелів [6].

Перші наукові публікації з використання випромінюючих кабелів у підземних галереях значної протяжності: залізничних тунелях, рудниках, шахтах, з'явилися на початку 70-х років минулого століття [6, 7]. У подальшому продовжили теоретичні та експериментальні дослідження випромінюючих кабелів [8-10].

**Постановка проблеми**

Удосконалення методів організації і проєктування мереж поїзного радіозв'язку в складних умовах гірської місцевості та в залізничних тунелях.

**Основні результати**

На залізницях України основним каналом поїзного радіозв'язку в лінійних мережах залишається

## ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

канал, який організований у гектометровому діапазоні на частоті 2,13 МГц [2].

Рельєф місцевості мало впливає на умови передавання електромагнітної енергії у схемах із використанням напрямних ліній.

Для необхідної дальності та якості поїзного радіозв'язку в діапазоні гектометрових хвиль використано напрямні лінії, що каналізують електромагнітну енергію від стаціонарних і локомотивних радіостанцій уздовж залізниці. Передавання електромагнітних сигналів у цьому випадку здійснюється електромагнітними полями індукції, що поширені вздовж напрямних ліній.

**На електрифікованих ділянках як напрямні лінії використовують високовольтні проводи повздожнього електропостачання, які підвишені на опорах контактної мережі або спеціально підвищений хвилеводний провід [2].**

**Передавання високочастотної енергії від стаціонарної радіостанції в напрямні проводи здійснюється підключенням передавача радіостанції до напрямних проводів через розділові конденсатори або за допомогою збуджувального проводу (індуктивний спосіб), що підвищений паралельно напрямним проводам.**

Дальність радіозв'язку визначають з урахуванням усіх втрат в елементах тракту передавання сигналів радіозв'язку та мінімально необхідного рівня корисного сигналу.

Для розрахунків ураховують мінімальний рівень корисного сигналу на вході локомотивної радіостанції від 72 дБ на ділянках змінного струму до 50 дБ за автономної тяги.

Згасання різних типів напрямних ліній відрізняється мало і складає в середньому 1,5 - 2 дБ/км, що забезпечує дальність радіозв'язку до 8 км за змінного струму з використанням хвилевідного проводу. Згасання в лінійному тракту з використанням інших типів напрямних проводів буде зростати за рахунок додаткових лінійних пристроїв.

Направні високовольтні лінії не можна прокладати в тунелях безпосередньо і для використання проводів ДПР, які з підходом до тунелю переходять на спеціальні високовольтні опори і обходять тунельну ділянку зверху, а проводи ВЛ в тунелях прокладають високовольтним кабелем.

За наявності тунелів на ділянці для передавання сигналів радіозв'язку підвищують окремий хвилевідний провід. За довжини тунелю до 300 м підвищують однопровідний хвилевід, за більшої довжини тунелів тип напрямної лінії визначають на основі розрахунків дальності радіозв'язку.

Для однопровідного хвилеводу в тунелі згасання зростає до 12 дБ/км, що скорочує можливу дальність у тунелі до 2 км. Згасання сигналів із використанням двопровідного хвилеводу суттєво менше і складає 1,7 дБ/км.

На перегонах, де є два і більше тунелів, для забезпечення впевненого радіозв'язку необхідно застосовувати двопровідний хвилевід, який проходив би через усі тунелі, щоб виключити багаторазові переходи від однієї напрямної лінії до іншої.

У гірській місцевості суттєво скорочена дальність радіозв'язку в УКХ діапазоні порівняно з каналами на відкритій місцевості. Погіршені умови поширення радіохвиль, збільшені втрати в каналі і зменшена напруженість поля сигналу. Окрім того, зростає глибина просторових флуктуацій. У методиці розрахунку каналів поїзного радіозв'язку ці особливості враховують із використанням відповідних поправкових коефіцієнтів  $B_{рел}$  і  $B_{міст}$ .

У типовій методиці для розрахунку дальності дії каналів поїзного радіозв'язку УКХ діапазону в умовах гірської місцевості необхідно додатково враховувати, окрім  $B_{парам}$ , виду електротяги, обладнання локомотивів, додаткові коефіцієнти, які враховують особливості гірських трас.

$$E_{2p} = U_{2min} + g_2 + \sum B_{трас} + \sum B_{парам} + \sum B_{імов}, \text{ дБ.} \quad (1)$$

Поправковий коефіцієнт  $\sum B_{трас}$  необхідно доповнити коефіцієнтом  $B_{рел}$ , що вибирають залежно від типу трас, який визначає зростання втрат від параметрів складності траси.

Коефіцієнт  $B_{імов}$  враховує глибину флуктуацій за швидких і повільних просторових завмирань сигналів і часові флуктуації. При цьому коефіцієнт  $B_{міст}$  дає змогу врахувати зростання флуктуацій внаслідок зміни рельєфу місцевості і залежить від складності траси.

Траси радіозв'язку залежно від рельєфу місцевості поділяють на п'ять типів. Для кожного типу траси визначені відповідні поправкові коефіцієнти, які враховують складність траси.

Усі зазначені в правилах [5] класифікаційні критерії трас радіозв'язку визначають за їхнім профілем, який необхідно будувати за даними топографічних карт у напрямку зв'язку.

Тип траси визначено з урахуванням таких характеристик трас: загальна характеристика місцевості; глибина і довжина закриття траси; відстані від передавача і приймача до перешкоди.

У табл. 1 наведені результати розрахунків для різних типів складності трас за однакових значень інших параметрів каналу, що входять до складу

## ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

формули (1). Ділянка електрифікована за системою змінного струму. Потужність передавача стаціонарної радіостанції  $P = 10 \text{ Вт}$ ; висота антени передавача

$h_1 = 20 \text{ м}$ ;  $G_1 = 4 \text{ дБ}$ ; погонне згасання фідера

$\alpha_{\phi 1} = 0,15 \text{ дБ/м}$ ;  $l_1 = 20 \text{ м}$ . Висота

приймальної антени  $h_2 = 5 \text{ м}$ ;  $G_2 = 0 \text{ дБ}$ ;

погонне згасання фідера

$\alpha_{\phi 2} = 0,15 \text{ дБ/м}$ ;  $l_2 = 5 \text{ м}$ .

Визначимо дальність радіозв'язку між стаціонарною радіостанцією і радіостанцією магістрального локомотива за різних типів складності трас.

mu-TRAC (Times Microwave Systems). Зовнішні екрани триаксіального складаються з алюмінієвих стрічок, розділені шаром діелектрика, що спрощує технологію виготовлення [12].

У табл. 2 наведені паспортні параметри випромінюючого кабелю RMC-7/8" EUPEN і триаксіального TRC-850 mu-TRAK. Виробники випромінюючих кабелів наводять характеристики кабелів, виміряних на діелектричних опорах, віддалених від поверхонь.

Т

а

б

л

и

ц

я

Основні параметри кабелів

1

Результати розрахунку дальності радіозв'язку для трас різної складності

Параметр каналу	Результат розрахунку залежно від типу складності траси				
	1	2	3	4	5
Складність траси	1	2	3	4	5
$B_{\text{рел}}$ , дБ	3,4	0	-3,4	-6,8	-10,2
$B_{\text{місц}}$ , дБ	2	3	4	5	6
для ймовірності 90 %					
Дальність радіозв'язку, км	12,2	10,4	7,2	5,4	3,8

Зі зростанням складності траси суттєво зменшується дальність радіозв'язку від 12,2 км для траси типу 1 до 3,8 км для траси типу 5.

Випромінюючі кабелі є найбільш ефективним засобом організації каналів УКХ діапазону в тунелях залізниць. Випромінюючий кабель забезпечує не тільки передавання електромагнітної енергії, а і її випромінювання в зоні проходження.

Уперше в Україні випромінюючі кабелі були застосовані для проєктування каналів радіозв'язку в метрополітені в м. Харкові. Зараз широко застосовують для організації стільникових систем рухомого радіозв'язку в тунелях метрополітенів.

Відомі випромінюючі кабелі з отворами в зовнішньому провіднику (виробники RFS Kabelmetal (Німеччина), корпорація Andrew (США), EUPEN (Бельгія)) [11]. Ще одним типом є триаксіальні кабелі

Використовувана смуга частоти, МГц	RMC-7/8"	TRC-850
Повздожне згасання, дБ/км		
160 МГц	17	18
460 МГц	31	33
900 МГц	44	58
1900 МГц	94	-
Згасання між кабелем і антеною, для надійності по полю 50/95 %		
160 МГц	81/89	74/94
460 МГц	79/87	80/96
900 МГц	69/74	80/96
1900 МГц	67/72	-

У паспортних даних кабелів наведені значення коефіцієнтів згасання та перехідного згасання для деяких дискретних значень частот, які найчастіше використовують у мережах мобільного радіозв'язку 160, 460, 900, 1900 МГц. У технічних характеристиках кабелів наведені середні значення перехідного згасання (50 %) і ті, які не будуть перевищені в 95 % випадків вимірювань, тобто з імовірністю 95 %, що

## ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

дає змогу врахувати інтерференційні процеси в каналах радіозв'язку.

Перехідне згасання характеризує взаємозв'язок кабелю з навколишнім середовищем і суттєво залежить від умов прокладання, характеристик тунелю, відстані від стінок тунелю. Загальні втрати складають суму цих параметрів, що визначає дальність радіозв'язку.

Експериментальні статистичні результати досліджень повздожнього згасання та перехідного згасання отримані в умовах реального прокладання в Харківському метрополітені в діапазоні 160 МГц і вперше наведені в роботі [13]. Загалом рекомендовано установлювати випромінюючі кабелі на діелектричних кронштейнах на значній відстані від зводів тунелю. Але в умовах дослідження параметрів у Харківському метрополітені випромінюючий кабель діаметром 7/8 дюйма встановлювали поблизу від стінки тунелю. У роботі показано, що розподіл значень просторових флуктуацій перехідного згасання в реальних умовах прокладання відповідає логарифмічно-нормальному закону флуктуацій напруженості поля для каналів із випромінюючими кабелями в тунелях.

За результатами досліджень, середнє значення  $A_{пер}$  в каналі складає 51,4 дБ за середньоквадратичного відхилення  $\sigma = 5,96$  дБ на відстані від кабелю 2 м. Саме ці параметри включені в Правила розрахунку і проектування мереж поїзного радіозв'язку в тунелях залізниць.

Випромінюючі кабелі не використовують у гектометровому діапазоні, і паспортні дані для цих частот відсутні. Але дослідження параметрів у цьому діапазоні необхідні для організації лінійних мереж ПРЗ. За цими параметрами можна визначити дальність радіозв'язку в гектометровому діапазоні та УКХ діапазоні на частотах, відведених для залізничного транспорту. Параметри виміряні в реальних умовах експлуатації мереж технологічного радіозв'язку для кабелів із діаметром 7/8 можна використати для реального проектування мереж [8].

Із розташуванням радіостанції в середині тунелю можна забезпечити необхідну дальність радіозв'язку за рахунок використання двоплевої схеми.

На базі наведених паспортних характеристик у табл. 2 визначають середньоквадратичне відхилення перехідного згасання для різних частот. Виходячи з наведених параметрів, можна зазначити, що розрахункові значення середньоквадратичного відхилення просторових флуктуацій для частот 160 МГц складають для кабелю RMC 7/8'' 6,2 дБ. Це підтверджує відповідність структури випромінюваних полів у кабелях обох типів. У триаксимальних кабелях більше згасання, глибина флуктуацій більше та складає 9,7 дБ.

Визначимо дальність радіозв'язку, яка забезпечена в каналах із перспективними системами дециметрового діапазону на частотах 460 і 900 МГц, виходячи з паспортних характеристик кабелів. На більш високих частотах суттєво збільшуються втрати з поширенням сигналів у кабелі.

Тоді результати розрахунків дальності за методикою [8] складуть для частоти 160 МГц 1,7 км.

На більш високих частотах 460 МГц, 900 МГц суттєво зростає згасання в кабелі, хоча середньоквадратичне відхилення коливань флуктуацій випромінюваних полів майже не відрізняється.

Для частоти 460 МГц за аналогічних умов передавання дальність радіозв'язку в тунелі складе 1,1 км, а на частоті 900 МГц – 0,95 км.

На рисунку наведені залежності сумарних втрат зв'язку для різних частот для випромінюючого кабелю RMC 7/8 EUPEN від відстані. Крива  $L_{доп}$  визначає максимально допустимі втрати в каналі за однакових енергетичних характеристик мереж. Точка перетину кривих визначає дальність радіозв'язку для надійності радіозв'язку по полю 95 %.

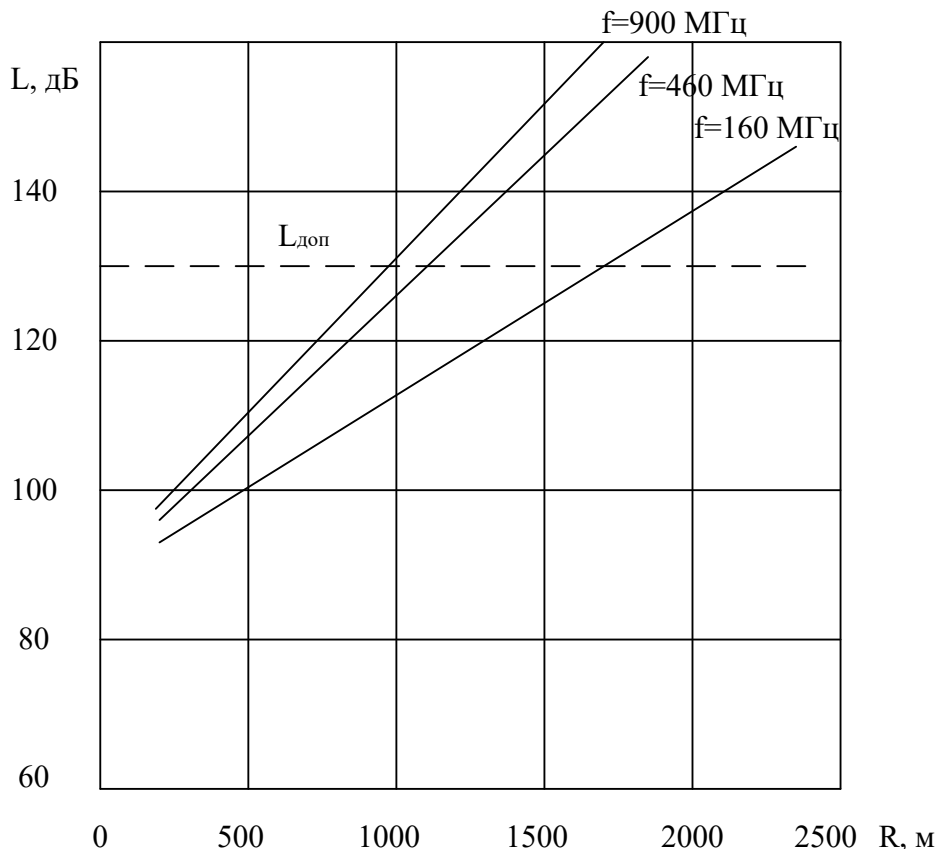


Рис. Визначення дальності радіозв'язку для кабелю RMC 7/8 EUPEN для різних частот

На більш високих частотах сумарні втрати зростають, а реалізована дальність радіозв'язку зменшується. Але навіть на частоті 900 МГц результати становлять прийнятні значення з урахуванням того, що в двоплечій схемі підключення радіостанцій до випромінюючого кабелю дальність радіозв'язку складає подвійну величину.

#### Висновки

1. Розглянуто методи організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку в умовах гірської місцевості та в тунелях залізниць.

2. У гірських умовах зростає згасання сигналів і глибина флуктуацій на трасах, що пов'язано зі складним рельєфом місцевості.

3. Отримані в роботі результати можуть бути орієнтиром для організації радіомереж в умовах гірської місцевості.

4. Розраховано дальність радіозв'язку каналів УКХ діапазонів у тунелях залізниць із необхідною надійністю для використання випромінюючого кабелю, що є прийнятною для більшості випадків, навіть у випадках значної довжини тунелів.

#### Список використаних джерел

1. ЦРБ 0004. Правила технічної експлуатації залізниць України: офіц. вид. Київ: Транспорт України, 2007.
2. Правила експлуатації поїзного радіозв'язку: затв. Наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 24.09.2007 р. № 452-Ц. Київ, 2007. 45 с.
3. Recommendation ITU-R P.1546-6. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. 2020. 57 p.
4. Recommendation ITU-R P.1406-3. Propagation effects relating to terrestrial land mobile and broadcasting services in the VHF and UHF bands. 2015. 17 p.
5. Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку ЦШ-0058 / Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця. Київ, 2009. 123 с.
6. Радіотехнічні системи залізничного транспорту: навч. посіб. / С. В. Панченко, С. І. Приходько, А. О. Єлизаренко, Н. А. Корольова. Харків: УкрДУЗТ, 2024. 145 с.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

7. ДБН В.2.3 – 19:2018. Споруди транспорту. Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування: Наказ Міністерства регіонального розвитку України від 28.09.2018 р. № 261. Київ, 2018. 129 с.
8. Єлизаренко А. О. Впровадження дводіапазонних мереж технологічного радіозв'язку в тунелях залізниць. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. № 4. С. 42-47.
9. Gorobets N. N., Lebedev A. S., Yelizarenko A. A. Proceedings of 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (Kyiv, Ukraine). *IEEE Catalog Number CFP*. 2017. 17540. P. 180-182. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7972615/>.
10. Katrich V. A., Lyashchenko V. A., Medvedev N. V. The frequency – energy and spatial characteristics of the coaxial – slot array. *International conference on antenna theory and techniques, 2013, Odessa, Ukraine*. 2013. P. 157-159.
11. Radiating Cables. URL: <http://www.eupen.com>.
12. Компания Times Microwave Systems. URL: <http://www.timesmicrowave.com>.
13. Єлизаренко А. О. Дослідження статистичних характеристик каналу з випромінюючим кабелем в тунелі метрополітену. Збірник наукових праць. Харків: УкрДАЗТ, 2006. Вип. 78. С. 157-165.
6. Panchenko, S. V., Prykhodko, S. I., Yelizarenko, A. O., & Korolova, N. A. (2024). *Radiotekhnichni systemy zaliznychnoho transportu* [Radio engineering systems of railway transport]. UkrDUZT [in Ukrainian].
7. **Ministerstvo rehionalnoho rozvytku Ukrainy. (2018).** *DBN V.2.3-19:2018. Sporudy transportu. Zaliznytsi kolii 1520 mm. Normy proektuvannia* [SBN V.2.3-19:2018. Transport structures. Railways of 1520 mm gauge. Design standards] (Nakaz No. 261). [in Ukrainian].
8. Yelizarenko, A. O. (2014). Vprovadzhennia dvodiapazonnykh merezh tekhnolohichnoho radiozviazku v tuneliakh zaliznyts [Implementation of dual-band networks of technological radio communication in railway tunnels]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (4), 42-47 [in Ukrainian].
9. Gorobets, N. N., Lebedev, A. S., & Yelizarenko, A. A. (2017). [Paper presentation]. *2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques*, Kyiv, Ukraine. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7972615/>
10. Katrich, V. A., Lyashchenko, V. A., & Medvedev, N. V. (2013). The frequency-energy and spatial characteristics of the coaxial-slot array. In *Proceedings of the International Conference on Antenna Theory and Techniques* (pp. 157-159). Odessa, Ukraine.
11. **Radiating cables.** (n.d.). <http://www.eupen.com>
12. **Times Microwave Systems.** (n.d.). <http://www.timesmicrowave.com>
13. Yelizarenko, A. O. (2006). Doslidzhennia statystychnykh kharakterystyk kanalu z vyprominiuiuchym kabelem v tuneli metropolitenu [Investigation of the statistical characteristics of a channel with a radiating cable in a subway tunnel]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT*, (78), 157-165 [in Ukrainian].

## References

**Yelizarenko Andrii. Organization of train radio communication networks in mountainous terrain and in railway tunnels.**

Proposals have been developed for the organization and calculation of train radio communication networks in mountainous areas of varying complexity and in railway tunnels.

In mountainous terrain, the conditions for the propagation of radio waves in the VHF bands are

significantly complicated, which leads to increased signal attenuation and an increase in the depth of fluctuations.

Channels in the VHF band in tunnels can be organized only using radiating cables. The organization of dual-band systems in the hectometer and meter bands using a single radiating network has been proposed.

In the hectometer range, when using guide lines in train radio communication, the terrain has little effect on the conditions for the transmission of electromagnetic energy in the circuits.

In the KH range, when organizing radio communication in railway tunnels, it is necessary to suspend a single-wire or two-wire waveguide wire, which provides less attenuation.

Radiating cables are the most effective means of organizing channels in the VHF band in railway tunnels. The radiating cable provides not only the transmission of electromagnetic energy but also its radiation in the passage zone.

It can be noted that the calculated values of the root mean square deviation of spatial fluctuations at frequencies of 160 MHz for the RMC 7/8'' cable from EUPEN are 6.2 dB. This indicates the similarity of the structure of the radiated fields in the cables in both cases. In triaxial cables, the attenuation is greater, the depth of fluctuations is greater and is 9.7.

At higher frequencies of 460 MHz, 900 MHz, the attenuation in the cable increases significantly, although the root mean square deviation of the fluctuations of the radiated fields is almost the same.

These data can be used to calculate channels in promising railway radio communication systems in

tunnels, as a guideline in the actual design of train radio communication networks.

**Єлизаренко А. О.**, к.т.н., доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [elizarenko1@ukr.net](mailto:elizarenko1@ukr.net). <https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>.

**Yelizarenko Andrii**, Associate Professor of «Transport connection» department, Candidate of Techn. Sciences, PhD, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [elizarenko1@ukr.net](mailto:elizarenko1@ukr.net). <https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>.

Стаття надійшла 25.02.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 10.03.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.