

УДК 656.254.16

ЄЛІЗАРЕНКО А.О., старший викладач (УкрДАЗТ)

## Впровадження дводіапазонних мереж технологічного радіозв'язку в тунелях залізниць

*Розглянуто основні параметри передачі та статистичні характеристики каналів радіозв'язку з випромінюючим кабелем в тунелі. Запропонована схема організації мереж поїзного радіозв'язку гектометрового і метрового діапазонів в залізничних тунелях з використанням випромінюючого кабелю у якості спільної направляючої системи.*

**Ключові слова:** випромінюючі кабелі, параметри передачі, статистичні характеристики радіоканалів в тунелях, схема організації дводіапазонних мереж.

### Вступ

Відповідно до вимог чинних правил усі ділянки залізниць повинні бути обладнані системами поїзного технологічного радіозв'язку (ПРЗ), які працюють у двох діапазонах радіохвиль. При цьому лінійні системи ПРЗ для зв'язку машиністів локомотивів з поїзним диспетчером працюють у гектометровому діапазоні (2,13 МГц), а для радіозв'язку машиністів з черговими по станціях створюються зонні мережі метрового діапазону на частотах 160 МГц. Для забезпечення необхідної дальності радіозв'язку у каналах гектометрового діапазону для передачі електромагнітної енергії використовують провідні направляючі лінії, які проходять безпосередньо вздовж залізничних ліній. В ультракороткохвильовому (УКХ) діапазоні радіозв'язок здійснюється за рахунок випромінювання радіохвиль [1].

Відомчі нормативні документи з організації і проектування мереж поїзного радіозв'язку, які діяли до недавнього часу, передбачали організацію в тунелях тільки лінійних мереж ПРЗ гектометрового діапазону з використанням двопровідних направляючих систем, які мають менше згасання. Це обмежує функціональні можливості радіомереж і надійність зв'язку та не відповідає вимогам Будівельних норм і правил з облаштування залізничних тунелів. Провідні направляючі системи в УКХ діапазоні не забезпечують ефективну передачу електромагнітної енергії, що і стало основною причиною відсутності УКХ радіозв'язку в тунелях.

В сучасних умовах застосування знаходять випромінюючі кабелі, які є ефективною направляючою системою для організації ультракороткохвильового радіозв'язку в тунелях і підземних спорудах [2]. Випромінюючий кабель – це різновид радіочастотних коаксіальних кабелів з отворами в зовнішньому провіднику.

Завдяки цьому, випромінюючий кабель одночасно виконує дві функції: передачі сигналів до заданого місця прийому і функції приймально-передавальної антени завдяки випромінюванню енергії. Останнім часом в зв'язку з організацією в тунелях метрополітенів стільникових мереж загального користування, зросла кількість публікацій [2, 3], але вони є фактично інформаційними джерелами і не містять матеріалів з проектування і розрахунку каналів з випромінюючим кабелем.

Певні досліди із застосування випромінюючих кабелів проводяться на залізницях Російської Федерації [4]. Але навіть в останній редакції Правил [1] від 2004 року відсутні рекомендації з організації мереж ультракороткохвильового діапазону у залізничних тунелях. Це пов'язано з недостатністю матеріалів досліджень характеристик випромінюючих кабелів і відсутністю досвіду організації і проектування таких мереж на залізницях.

### Постановка задачі

Для раціонального рішення питань проектування мереж радіозв'язку з випромінюючими кабелями в тунелях залізниць необхідно знати основні характеристики кабелів в реальних умовах прокладання при організації радіомереж і розробити необхідні методики розрахунку енергетичних характеристик радіоканалів. В статті наведені результати експериментальних досліджень параметрів випромінюючих кабелів та запропонована практична схема організації дводіапазонних мереж ПРЗ в тунелях залізниць.

### Основні результати роботи

Першим етапом оцінки можливостей застосування випромінюючих кабелів для організації ультракороткохвильового радіозв'язку в тунелях залізниць є аналіз конструктивно-технологічних і електричних характеристик кабелів різних типів.

Найбільш відомими виробниками випромінюючих кабелів є фірми RFS Kabelmetal (Німеччина), корпорація Andrew (США), EUPEN (Бельгія), Sumitomo and Fujukura (Японія), NK (Фінляндія), ОКБКП (Росія).

Відомо понад 20 варіантів конструктивного виконання випромінюючих кабелів з розмірами від 1/2'' до 1<sup>5/8</sup>'' дюйма.

Найбільш важливими характеристиками випромінюючих кабелів з точки зору організації радіоканалів є характеристики поздовжнього (погонного) згасання  $\alpha$  і втрати на зв'язок (перехідне згасання)  $A$ .

Фірми виробники випромінюючих кабелів наводять паспортні характеристики передачі і випромінювання, для певних типових умов вимірювання при підвісці кабелю на діелектричних опорах на висоті 2 м від землі і будь-яких провідних поверхонь відповідно до рекомендації Міжнародного електротехнічного комітету ІЕС 1196-4. Приймальна антена розташовується на відстані 2 м від кабелю.

В роботі проведено порівняльний аналіз параметрів передачі і випромінювання кабелів різних модифікацій за їх паспортними даними. На рисунку 1 представлені деякі результати, як приклад. На графіках порівнюються параметри коефіцієнта згасання  $\alpha$ , дБ/км і перехідного згасання  $A$ , дБ кабелів пов'язаного режиму СМС 7/8'' і режиму випромінювання RMC 7/8'' фірми EUPEN (Бельгія) в залежності від частоти [5]. Коефіцієнт згасання  $\alpha$  дБ/км зростає при збільшенні частоти.

Звичайні коаксіальні кабелі має менше згасання за рахунок відсутності втрат на випромінювання [5].

Залежність перехідного згасання від частоти незначна. Параметри різних типів кабелів відрізняються не суттєво.

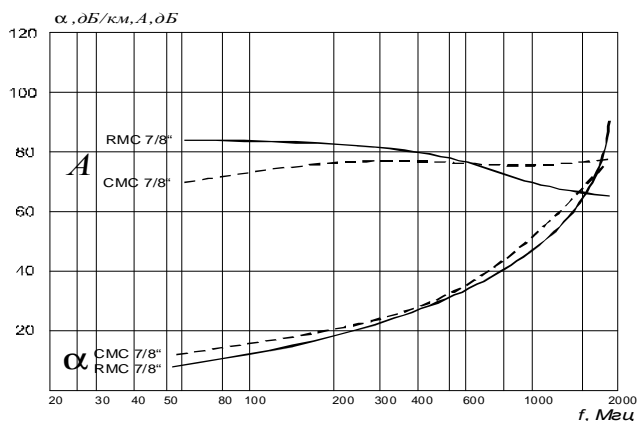


Рис. 1. Характеристики згасання кабелів різних типів

Перехідне згасання має значну величину з метою дозування випромінювання, тому що за рахунок зростання випромінювання буде зростати повздовжній

коефіцієнт згасання кабелю, що в свою чергу приведе до зменшення дальності зв'язку. Тому розробники кабелів намагаються оптимізувати параметри передачі і випромінювання з метою мінімізувати сумарні системні втрати.

Аналіз технічних характеристик кабелів показує що можлива розробка і виготовлення випромінюючих кабелів з будь-якими необхідними параметрами передачі і випромінювання в залежності від конструктивно-технологічних особливостей їх виготовлення.

В залежності від використовуємих матеріалів і розмірів, можна забезпечити необхідну величину коефіцієнта згасання виходячи з потрібної дальності зв'язку. При цьому обмежуючим фактором є вартість кабелю.

При збільшенні діаметру зменшується поздовжнє згасання, але зростає середня вартість 1 м кабелю в умовних одиницях (див. рис. 2).

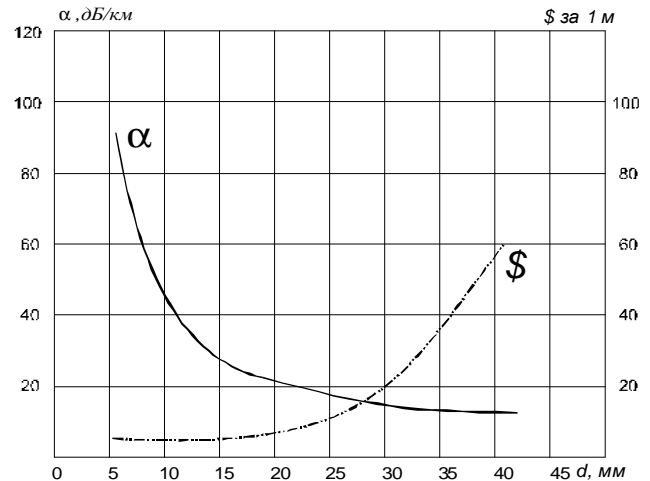


Рис. 2. Порівняння згасання і ціни кабелів різних діаметрів

Очевидне оптимальне співвідношення загасання/ціна для кабелів з діаметром зовнішнього провідника 7/8''. Близькі до 7/8'' конструктивних розмірів мають кабелі марок РИ-50-17-31 і РИ-50-17-32 виробництва Російської федерації, які використані в Харківському метрополітені [6]. А вибір необхідного випромінюючого кабелю для конкретних умов організації каналів радіозв'язку є оптимізаційною задачею за техніком-економічними показниками.

Розглянуті вище паспортні значення параметрів випромінюючих кабелів отримані за методикою вимірювання в умовах наближених до вільного простору. В реальних умовах прокладання випромінюючих кабелів в тунелях, їх параметри істотно залежать від багатьох чинників:

- методів установки і монтажу;
- відстані від стінок тунелів;

- матеріалів стінок та розмірів тунелів;
- впливу оточуючого середовища.

Вимірювання в реальних умовах експлуатації параметрів випромінюючого кабелю складна організаційна - технічна задача. В роботі представлені матеріали, що узагальнюють результати досліджень частотних характеристик згасання кабелів типу РИ-50-17-31 ТУ 16.К76-137-97, виконаних за участю автора на різних етапах впровадження випромінюючих кабелів в Харківському метрополітені. Вимірювання

проводились при укладанні випромінюючого кабелю в тунелі на типових металевих кабельних кронштейнах з використанням дистанційних поліетиленових шайб діаметром 60 мм.

На рис. 3 приведена частотна характеристика коефіцієнта згасання випромінюючого кабелю РИ-50-17-31 (крива 1), побудована за паспортними даними для умов наближених до вільного простору в полосах частот 50-200 МГц.

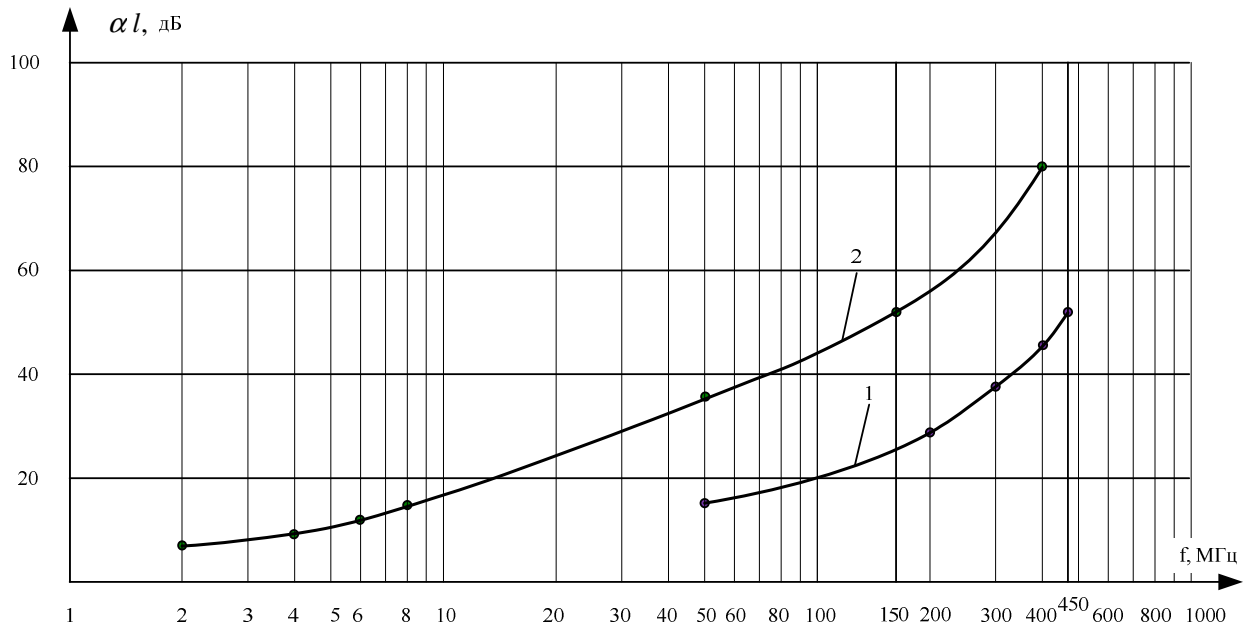


Рис. 3. Частотні характеристики коефіцієнта згасання випромінюючого кабелю

Взагалі випромінюючі кабелі не розраховані на використання в області частот нижче 30 МГц. Але в зв'язку з використанням гектометрових радіохвиль на частотах 2,13 МГц для організації технологічного радіозв'язку на залізницях, дослідження параметрів випромінюючих кабелів на цих частотах має практичне значення. Оскільки доцільно використовувати випромінюючі кабелі в якості спільної направляючої системи в каналах гектометрового і ультракороткохвильового діапазонів.

Крива 2 представляє частотну залежність коефіцієнта згасання в прийнятих реальних умовах прокладання на типових кабельних кронштейнах з поліетиленовими шайбами.

За результатами досліджень коефіцієнт згасання випромінюючого кабелю в тунелі складає величину не більше  $\alpha=5,2$  дБ/км в гектометровому діапазоні на частоті 2,13 МГц і  $\alpha=50$  дБ/км в метровому діапазоні радіохвиль на частоті 151 МГц.

При аналізі перехідного згасання в каналах з випромінюючими кабелями необхідно врахувати складні умови формування структури сигналу в точці

прийому в результаті численних перевипромінювань. Як наслідок багатопроміневості створюється інтерференційна структура і виникають глибокі просторові флуктуації напруженості поля. Тому електромагнітне поле в точці прийому є випадковим і може бути охарактеризоване тільки статистично.

Але навіть в останніх опублікованих роботах [2,4] не досліджувались саме статистичні характеристики та закони розподілу рівнів сигналів у каналах радіозв'язку з випромінюючим кабелем у тунелях залізниць і метрополітенів. Такі дослідження вкрай необхідні для розрахунку технічних параметрів проєктованих систем радіозв'язку із заданою надійністю.

Вивчення структури поля сигналів і завад звичайно зводиться до експериментального визначення статистичних характеристик і встановлення законів їх розподілу. При цьому виконуються вимірювання значної кількості значень напруженості поля, що являють собою дискретну вибірку з реалізації відповідних випадкових процесів.

В роботі [6] на основі результатів експериментальних досліджень визначені оцінки

характеристик випадкових процесів флуктуацій рівнів напруженості поля сигналів та перехідного згасання.

Параметри передачі і випромінювання кабелів визначені в практично важливих діапазонах радіохвиль які використовуються зараз для організації мереж технологічного радіозв'язку в тунелях метрополітенів і на залізницях.

Оцінки середнього значення перехідного згасання кабелю РИ-50-17-31 складають  $A_{пер}=51,45$  дБ при  $\sigma=5,96$  дБ на частоті 151 МГц та  $A_{пер}=60,2$  дБ при середньоквадратичному відхиленні  $\sigma=7,1$  дБ на частоті 2,13 МГц.

Для вимірів напруженості поля використовувались комплекти обладнання з типовими антенами типу FSM-8 і FSM-3 фірми RFT. Антени встановлювались на висоті 3 м від поверхні полу тунелю на відстані 3 м від випромінюючого кабелю. При збільшенні відстані від кабелю напруженість поля в метровому діапазоні

знижується на 1,2 дБ на метр. В гектометровому діапазоні згасання напруженості поля досягає 4 дБ на метр.

В роботі пропонується ефективне технічне рішення з організації дводіапазонних мереж поїзного радіозв'язку з випромінюючим кабелем у тунелях залізниць.

На рис. 4 приведена схема організації радіомереж ГМ і УКХ діапазонів у тунелі з використанням випромінюючого кабелю у якості спільної направляючої системи для каналів обох діапазонів. Технічні засоби для забезпечення надійного поїзного радіозв'язку на гірських ділянках залізниці з тунелями повинні вибиратися в кожному випадку відповідно до місцевих умов, з урахуванням довжини тунелів та видів направляючих ліній, які використовуються на прилягаючих до тунелю перегонах.

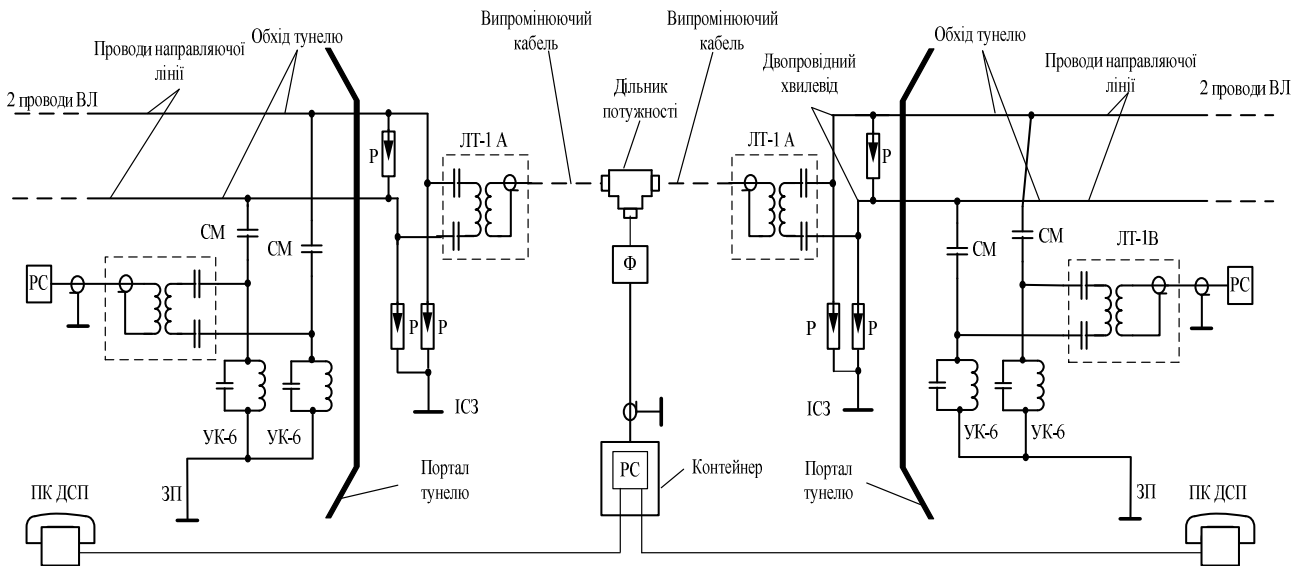


Рис. 4. Схема організації радіомереж ГМ і УКХ діапазонів у тунелі з використанням випромінюючого кабелю

На залізничних станціях встановлені стаціонарні радіостанції гектометрового і метрового діапазонів. На відкритих ділянках залізниці у якості направляючих ліній використовують два проводи високовольтної лінії автоблокування (ВЛ). Підключення стаціонарних радіостанцій ГМ діапазону до проводів направляючої лінії здійснюється через роздільні конденсатори. Для спряження двопровідної направляючої лінії з випромінюючим кабелем використовуються типові узгоджуючі лінійні трансформатори. Таким чином створюється суцільна направляюча система для сигналів гектометрового діапазона на протязі всього перегону між станціями, але з різними видами направляючих ліній.

Зв'язок в УКХ діапазоні на відкритих ділянках залізниць забезпечується через стаціонарні радіостанції, які встановлені у чергових по станціям. Зв'язок в тунелі в ультракороткохвильовому діапазоні забезпечується через додаткову стаціонарну радіостанцію, яка встановлюється в спеціальному контейнері і використовується двоплечева Т-образна схема приєднання до випромінюючого кабелю. Керування додатковою радіостанцією в тунелі здійснюється за допомогою виносних пультів, які встановлюються у чергових прилеглих до тунелю станцій на відстанях до 15 кілометрів, що відповідає вимогам до роботи зонних мереж ПРЗ. Перехідні пристрої на кінцях випромінюючого кабелю виконують роль узгодженого навантаження.

Розрахунок дальності дії каналів у гектометровому і метровому діапазонах з випромінюючим кабелем у тунелях залізниць здійснюється на основі загальних підходів і рекомендацій, які прийняті у чинних правилах організації і розрахунку мереж поїзного радіозв'язку. Відмінність полягає у використанні параметрів згасання сигналів у випромінюючих кабелях та перехідного згасання (втрат на зв'язок) між кабелем та локомотивними антенами, які встановлені на основі результатів експериментальних досліджень.

Розрахунки виконаємо з урахуванням рекомендацій, прийнятих в [7], для каналів ультракороткохвильового діапазону для умов радіозв'язку між стаціонарною і локомотивною радіостанцією.

При розрахунках приймаємо  $A_{прд} = 148$  дБ, мінімальний рівень корисного сигналу на вході приймача локомотивної радіостанції  $U_{2min} = 8$  дБ для ділянок постійного струму.

Суму поправочних коефіцієнтів, що залежать від параметрів передавача, приймача і антенно-фідерних пристроїв

$$\sum B_{нар} = \alpha_1 \cdot l_1 - G_2 + \alpha_2 \cdot l_2, \text{ дБ}$$

де  $G_2$  - коефіцієнти підсилення локомотивної антени, дБ;

$\alpha_1 \cdot l_1$  і  $\alpha_2 \cdot l_2$  - згасання, внесені фідерами передавальної і приймальної радіостанцій, дБ;  $\alpha$  - коефіцієнт згасання фідера, дБ/м;  $l$  - довжина фідера, м.

$$\sum B_{нар} = 0 + 5 \cdot 0,15 + 0 + 5 \cdot 0,15 = 1,5 \text{ дБ}$$

Крім того необхідно врахувати додаткове згасання, яке вносять інші елементи в тракті передачі сигналів.

$$\sum B_{\delta} = a_{\delta} + a_{\phi} + n \cdot a_3,$$

де  $a_{\delta}$  - згасання, яке вносить дільник,  $a_{\delta} = 3,5$  дБ;

$a_3$  - згасання, яке вносять з'єднувачі,  $a_3 = 0,5$  дБ;

$n$  - кількість з'єднувачів в схемі,  $n = 3$ ;

$a_{\phi}$  - втрати, які вносить дводіапазонний фільтр,

$a_{\phi} = 1$  дБ.

Медіанне значення перехідного згасання складає  $A_{пер} = 51,45$  дБ.

$B_i$  - коефіцієнт, який враховує інтерференційні флуктуації напруженості поля і відповідно перехідне згасання для надійності зв'язку по полю 95%.

$$B_i = \sigma \cdot A,$$

де  $A$  - коефіцієнт для надійності зв'язку 95 %,  $A=1,65$ ;

$\sigma$  - визначене середньоквадратичне відхилення,  $\sigma = 6,4$  дБ.

$$B_i = 6,4 \cdot 1,65 = 10,56 \text{ дБ.}$$

Коефіцієнт згасання направляючої системи з випромінюючим кабелем складає  $\alpha_{вк} = 50$  дБ для частоти 151 МГц.

Необхідна дальність радіозв'язку в УКХ діапазоні на відкритих ділянках залізниці перед відкритим порталом тунелю і на виході із тунелю може бути забезпечена через стаціонарні радіостанції які встановлюються у чергових по станціям прилеглих до тунелю (дивись рис. 4).

Тоді дальність стійкого радіозв'язку в одному плечі схеми складе

$$l_{вкх} = \frac{148 - 8 - 51,45 - 10,56 - 1,5 - 3,5 - 3 \cdot 0,5 - 1}{50} = 1,4 \text{ км.}$$

Загальна дальність радіозв'язку при використанні випромінюючого кабелю в УКХ діапазоні складе 2,8 км. Така мережа дозволяє забезпечити необхідну дальність зв'язку навіть в умовах найдовшого на залізницях України Бескидського тунелю довжиною 1822 м без використання проміжних підсилювачів.

В гектометровому діапазоні важливе значення має загальна дальність радіозв'язку у каналі з різними типами направляючих ліній на відкритій місцевості і в тунелі. За результатами розрахунків на перегонах з тунелями 2 км загальна дальність складе не менш 11 км, при можливості зв'язку в будь якій точці перегону.

## Висновки

Проведено аналіз конструктивно-технологічних та електричних характеристик випромінюючих кабелів різних типів. Рациональний вибір здійснюється шляхом порівняння варіантів за техніко – економічними показниками.

На основі експериментальних досліджень визначені параметри передачі і випромінювання кабелів в реальних умовах їх прокладання в тунелях, на основі яких можливо виконання розрахунків дальності дії каналів радіозв'язку із заданою надійністю.

Запропоновані схеми організації дводіапазонних мереж поїзного радіозв'язку в тунелях залізниць на

основі спільної направляючої лінії з випромінюючим кабелем.

Рекомендації з організації мереж радіозв'язку ультракороткохвильового діапазону в тунелях залізниць внесені в розроблені «Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку» затверджених Наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 09.06.2009 № 340-Ц.

#### Література

- 1 Правила организации и расчета сетей поездной радиосвязи: Нормативно-производственное издание. – М.: Транспорт, 1991. – 93 с.
- 2 Воробьев С.В. Построение распределённых антенных систем на основе излучающего радиокабеля // Мобильные системы. . – 2004, №4.С.56-61.
- 3 Павлов А.А., Дорезюк Н.И., Серегин И.А., Без «порочащих связей». Излучающий кабель: параметры, виды, конструкция, особенности//Мир связи и информации, Connect. 1997 г., №5. - С. 76-83;
- 4 Вериго А.М., Черников А.А., Ваванов Ю.В., Васильев О.К., Устойчивая радиосвязь в диапазоне 160 МГц в тунелях, «Автоматика, связь информатика» №6 2011 г. - С;
- 5 Radiating Cables. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу [http:// www.eupen.com](http://www.eupen.com).
- 6 Елизаренко А.А. Дослідження статистичних характеристик каналу з випромінюючим кабелем в тунелі метрополітену Збірник наукових праць.- Харків: УкрДАЗТ, 2006.- вип.78. – С.157-165.
- 7 Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку. Затверджені наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 09.06.2009 №340-Ц. – 123 с.

**Елизаренко А.А. Внедрение двухдиапазонных сетей технологической радиосвязи в тунелях железных дорог.** Рассмотрены основные параметры передачи и статистические характеристики каналов радиосвязи с излучающим кабелем в туннеле. Предложена схема организации сетей поездной радиосвязи гектометрового и метрового диапазонов в железнодорожных туннелях с использованием излучающего кабеля в качестве общей направляющей системы.

**Ключевые слова:** излучающие кабели, параметры передачи, статистические характеристики радиоканалов в туннелях, схема организации двухдиапазонных сетей.

**Yelizarenko Andrii. Introduction of dual-band networks of technological radio communication in railway tunnels.** Main parameters of transmission and statistical characteristics of radio communication channels with leaky feeder in a tunnel have been considered. The scheme of train radio communication networking of hectometer and VHF bands in railway tunnels with the use of leaky feeder as a common guide system has been proposed.

**Key words:** leaky feeders, transmission parameters, statistical characteristics of radio channels in tunnels, dual-band networking scheme.

Рецензент д.т.н., професор Бойнік А.Б. (УкрДАЗТ)

*Поступила 25.04.2014г.*