

УДК 656.254.16

ГОРОБЕЦЬ М. М., д.ф.-м.н., професор (Харківський національний університет ім. В. М. Каразіна),  
ЄЛІЗАРЕНКО А. О., к.т.н., доцент (Український державний університет залізничного транспорту)

## Канали технологічного радіозв'язку з випромінюючими кабелями в тунелях метрополітенів і залізниць

*Проведено порівняльний аналіз конструктивно-технологічних та електричних характеристик випромінюючих кабелів, виготовлених за традиційними технологіями та триаксіальних. Найбільш важливими характеристиками з точки зору організації радіоканалів є поздовжнє (погонне) згасання  $\alpha$  і втрати на зв'язок (перехідне) згасання  $A_{пер}$ .*

*В роботі побудовано криві залежності поздовжнього та перехідного згасання для кабелів різних типів від частоти. Визначено оцінки характеристик випадкових процесів флуктуації рівнів напруженості поля сигналів та перехідного згасання. Наведено інтегральні функції розподілу флуктуації напруженості поля, що дозволяє визначити глибину флуктуації та вести розрахунок каналів з випромінюючими кабелями з необхідною надійністю.*

**Ключові слова:** залізничний технологічний радіозв'язок, канали з випромінюючими кабелями, статистичні характеристики радіоканалів

### Вступ

Випромінюючий кабель можна розглядати, як антенну решітку з  $n$  щільових випромінювачів, які і формують багатопроменеву структуру напруженості поля, внаслідок якої і виникають просторові флуктуації перехідного згасання [1, 2]. Завдяки отворам поле існує не тільки всередині але і зовні кабелю. Властивості випромінюючого кабелю однакові на прийом і передачу. Це дозволяє створити ширококутову систему передачі електромагнітної енергії в усіх діапазонах радіохвиль, що використовуються для організації поїзного радіозв'язку на залізницях: гектометровому, метровому і дециметровому [3]. Випромінюючі кабелі широко застосовують для організації мереж стільникового радіозв'язку загального користування в тунелях метрополітенів [4, 5].

Останнім часом використовують відносно нову конструкцію триаксіальних кабелів. Саме на основі триаксіальних кабелів побудовано мережі радіозв'язку в метрополітенах Нью-Йорка, Лондона, Пекіна та інших мегаполісів [6].

В УкрДУЗТ проводились дослідження параметрів випромінюючих кабелів, які покладені в основу організації мереж технологічного радіозв'язку метрового діапазону в Харківському метрополітені [7]. В роботі [8] розроблено пропозиції з організації дводіапазонних мереж поїзного радіозв'язку в тунелях залізниць в гектометровому і метровому діапазонах радіохвиль.

Параметри кабелів суттєво залежать від умов прокладання в тунелях, але таких публікацій недостатньо. Одна з небагатьох робіт з цього питання [7].

Питання проєктування мереж технологічного радіозв'язку з необхідною надійністю в тунелях залізниць і метрополітенів залишається актуальною задачею.

### Постановка проблеми

В роботі необхідно провести аналіз конструктивно-технологічних та електричних параметрів кабелів різних типів з метою розроблення пропозицій щодо їх використання та визначення статистичних характеристик в умовах тунелів.

### Основні результати

Вперше в Україні для організації поїзного радіозв'язку випромінюючі кабелі було використано в Харківському метрополітені на початку 90-х років на основі розробок кафедри транспортного зв'язку УкрДУЗТ [7]. Багаторічний досвід експлуатації свідчить про доцільність їх використання і в тунелях залізниць.

У випромінюючих кабелях взаємозв'язок внутрішніх частин кабелю з довкіллям досягається шляхом використання зовнішнього провідника з щільинами певної конфігурації. При цьому частина електромагнітної енергії, що поширюється усередині кабелю, передається в довкілля, і кабель випромінює, отже, він виконує функції передавальної лінії і антени одночасно. Механізм електромагнітного взаємозв'язку кабелю з довкіллям, а також характеристики

випромінювання визначаються переважно конструктивним виконанням щілин, а саме їх розмірами, формою і взаємним розташуванням.

Усі типи випромінюючих кабелів, що випускаються промисловістю, характеризують певною групою параметрів, що описують їх загальні конструктивно-технологічні і електричні параметри [3, 6].

У загальному випадку конструкція випромінюючого кабелю складається з елементів:

- внутрішній провідник;
- зовнішній провідник;
- діелектрик;
- захисна оболонка.

Розрізняють два типи випромінюючих кабелів за конструктивно-технологічними ознаками. Кабелі першого типу побудовані за традиційними технологіями з періодичними отворами в зовнішньому провіднику [3]. Конструкція традиційного випромінюючого кабелю наведена на рис. 1.

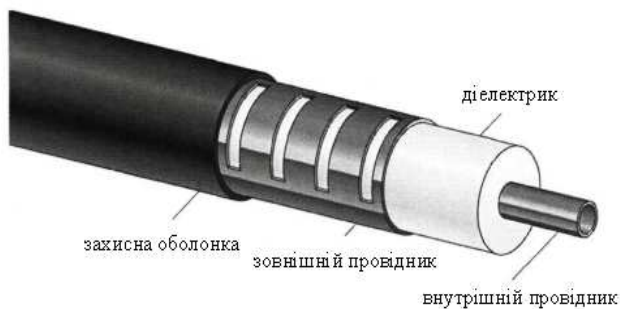


Рис. 1. Конструкція випромінюючого кабелю з отворами в зовнішньому провіднику

Зазвичай як внутрішній провідник у кабелях невеликих розмірів використовують дрід з обпаленої міді, або дрід з алюмінію, покритий тонким шаром міді. У кабелях великих розмірів з метою зменшення вагових і вартісних показників внутрішній провідник виконується у вигляді трубки з обпаленої міді, а в кабелях великих розмірів для збільшення гнучкості ця трубка гофрується [3].

Малі значення діелектричної проникності і коефіцієнта розсіювання досягаються шляхом використання поліетилену з високим ступенем пористості, який використовується у більшості сучасних випромінюючих кабелів, забезпечуючи 80-відсоткову міру пористості. У підсумку досягається однакова і однорідна структура діелектрика по усій довжині кабелю, що забезпечує постійність характеристичного опору, зменшення втрат, обумовлених відбиттям сигналу у випромінюючому кабелі, а також зменшенням значення погонного загасання. У сучасних випромінюючих кабелях як матеріал зовнішнього провідника використовують трубку з міді з отворами.

Відносно новим типом є триаксіальні кабелі. Фірма Times Microwave Systems (США) запатентувала триаксіальний кабель nu-TRAC. Такі кабелі використовуються в системах стільникового зв'язку загального користування в метрополітенах багатьох мегаполісів [6].

Конструкція випромінюючого триаксіального кабелю nu-TRAC наведена на рис. 2. Nu-TRAC кабелі мають легку і гнучку конструкцію, яка дає змогу огинати практично будь-які кути. Малий радіус вигину є основою для легкої та ефективної установки кабелю.

Як діелектрик використовується спінений поліетилен малої щільності, який забезпечує середовище з малими втратами для передачі радіочастотної енергії між центральною жилою і зовнішніми провідниками. Зовнішні екрани складаються з напівкруглої алюмінієвої стрічки, розділеної шаром спіненого поліетилену з малими втратами. Провід витoku використовується для забезпечення контакту між двома зовнішніми екранами при приєднанні роз'ємів.

Двома основними параметрами випромінюючих кабелів є поздовжнє загасання сигналу і втрати на випромінювання. Значення поздовжнього згасання приводять як сталу величину для фіксованих частот в дБ/км.

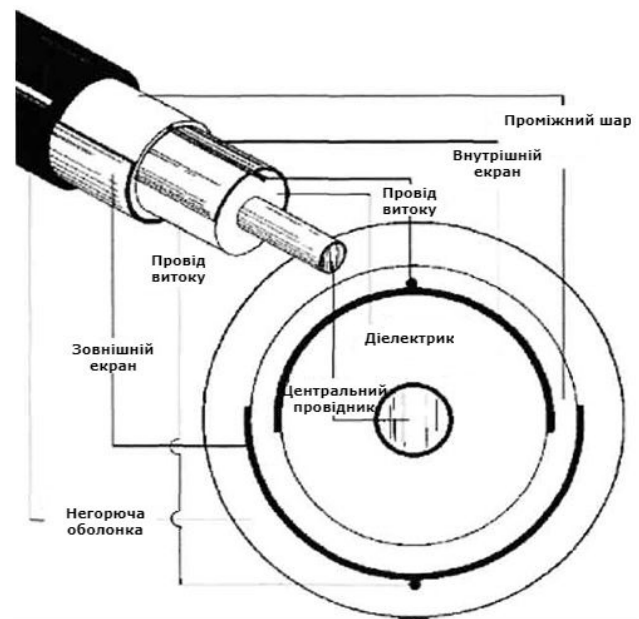


Рис. 2. Конструкція триаксіального випромінюючого кабелю

На рис. 3 порівнюються параметри передачі для випромінюючого кабелю RMC 7/8'' фірми EUPEN та триаксіального випромінюючого кабелю nu-TRAC TRC-850, які близькі за геометричними розмірами.

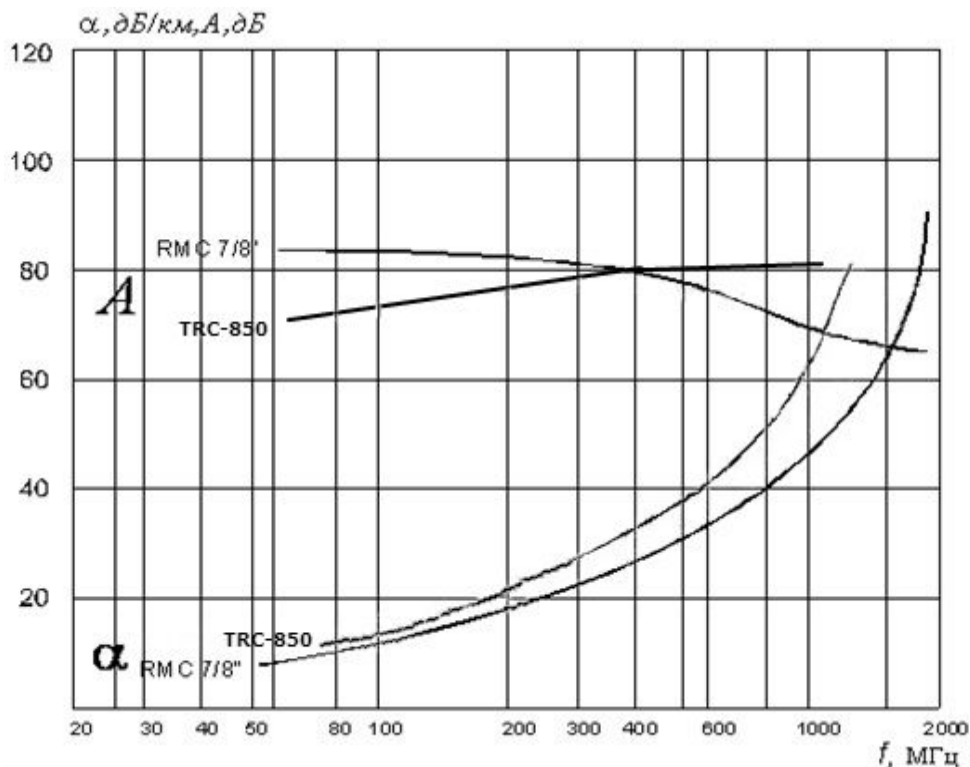


Рис. 3. Характеристики коефіцієнту згасання та перехідного згасання випромінюючих кабелів залежно від частоти

Криві на графіках характеризують особливості позовжнього та перехідного згасання кабелів, що розглядаються. Перехідне згасання характеризує взаємозв'язок випромінюючого кабелю з довкіллям. Перехідне згасання мало залежить від частоти і розмірів кабелю. Значення перехідного згасання наводяться для різних ймовірностей. Криві залежності перехідного згасання від частоти на рис. 3 наведені для ймовірності 50 %.

З ростом частоти погонне згасання зростає. При зростанні діаметру кабелю від 1/2" до 1<sup>5/8</sup>" згасання зменшується, а оптимальним є співвідношення згасання/ціна для кабелів з діаметром зовнішнього провідника 7/8" [7].

Паспортні значення параметрів випромінюючих кабелів різних марок відрізняються не суттєво, що пояснюється намаганням розробників зменшити сумарні втрати при передачі радіосигналів. При цьому позовжнє згасання намагаються мінімізувати, а перехідне згасання дозвано збільшують для зменшення втрат при випромінюванні.

Внаслідок глибоких просторових флуктуацій перехідного згасання напруженість поля в конкретній точці не може характеризувати умови передачі енергії. Напруженість поля характеризують статистично, як ймовірність перевищення певного рівня сигналів.

Значення перехідного згасання в кожній конкретній точці має випадковий характер і в паспортних даних нормується ймовірнісною величиною на рівні 50 і 95 % –  $A_{пер0,5}$  і  $A_{пер0,95}$ .

Традиційний випромінюючий кабель з отворами в зовнішньому провіднику можна розглядати, як антенну решітку з  $n$  щільових випромінювачів, які і формують багатопроменеву структуру напруженості поля, внаслідок якої і виникають глибокі просторові флуктуації перехідного згасання.

В роботі [7] наведено результати експериментальних досліджень статистичних характеристик перехідного згасання для кабеля РІ-50-17-31 діаметром 7/8", який виготовлено за традиційною технологією з отворами у зовнішньому провіднику.

Найбільш повно характеризують статистичний процес інтегральні функції розподілу. В роботі [7] показано, що розподіл значень напруженості поля в радіоканалах з випромінюючими кабелями визначається логарифмічно нормальним законом, тому доцільно побудувати інтегральну функцію в гаусовому масштабі. В цьому випадку інтегральна функція розподілу має вигляд прямої лінії, яка проходить через середнє значення, а нахил її визначається стандартним відхиленням [9].

За технічними характеристиками кабелів побудовані розрахункові інтегральні функції розподілу (крива 1) на рис. 4 для кабелю RMC 7/8'' фірми EUPEN, виконаного по традиційній технології та інтегральна функція триаксіального кабелю pi-TRAC TRC-850 (крива 2). Криві проходять через точки, які відповідають 50 % ймовірності та 95 % ймовірності.

Інтегральна функція розподілу дозволяє визначити ймовірність перевищення певних рівнів сигналів і у такий спосіб проводити розрахунки каналів з необхідною ймовірністю.

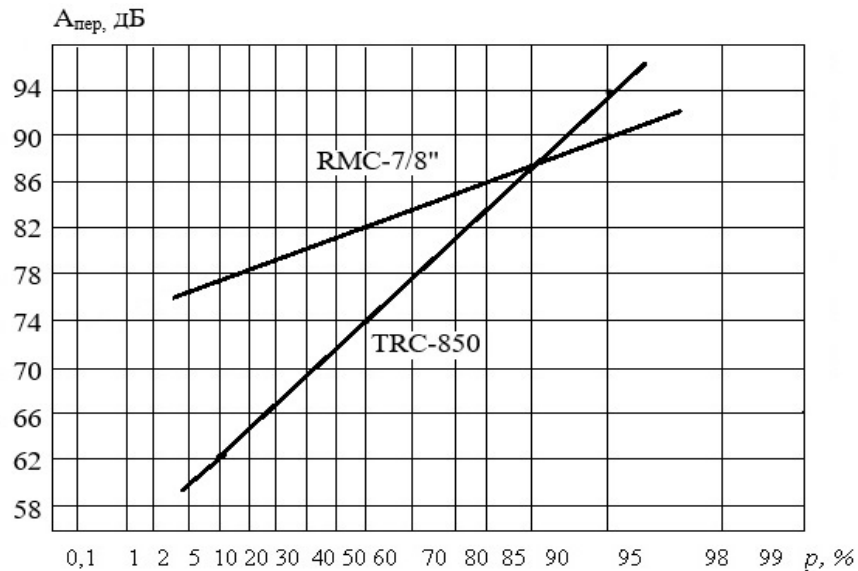


Рис. 4. Інтегральна функція розподілу флуктуацій перехідного згасання

Значення перехідного згасання для різної ймовірності  $A_{пер}(p)$  можна розрахувати за формулою

$$A_{пер}(p) = A_{пер0,5} + K \cdot \sigma, \quad (1)$$

де  $A_{пер0,5}$  – медіанне значення перехідного згасання;

$\sigma$  – визначене середньоквадратичне відхилення напруженості поля;

$K$  – коефіцієнт логорифмічно нормального розподілу, який відповідає необхідній надійності радіозв'язку.

Розрахункове значення середньоквадратичного відхилення для кабелю RMC 7/8'' фірми EUPEN складає 6,2 дБ, а для кабелю PI-50-17-31 дорівнює 5,96 дБ на цій же частоті. Близькі значення свідчать про схожість структури випромінюваних полів в обох випадках. При використанні триаксіального кабелю розрахункове значення  $\sigma = 9,7$  дБ, що вказує на значно більшу глибину флуктуацій. Це можна пояснити відмінностями формування структури випромінених полів.

При цьому глибина флуктуацій для традиційних випромінюючих кабелів складає в діапазоні ймовірностей 5 – 95 % 18 дБ. Для триаксіальних кабелів глибина флуктуацій досягає 42 дБ.

Параметри кабелів в тунелях істотно залежать від багатьох чинників і потребують додаткових досліджень. При установці в тунелях зростає погонне згасання, що обмежує дальність радіозв'язку.

#### Висновки

Проведено порівняльний аналіз конструктивно-технологічних та електричних характеристик випромінюючих кабелів, виконаних за традиційними технологіями з отворами у зовнішньому провіднику та триаксіальних.

Значення погонного згасання залежить від частоти сигналу і діаметру зовнішнього провідника і розглядаються як стала величина, яка мало відрізняється у кабелів різних типів однакових розмірів.

Перехідне згасання у випромінюючих кабелях відображає взаємозв'язок з навколишнім середовищем і має ймовірнісний характер, внаслідок формування багатопроменевої структури поля. Перехідне згасання випромінюючих кабелів мало залежить від типу кабелів та частоти сигналів.

У роботі визначено оцінки характеристик випадкових процесів флуктуацій рівнів напруженості поля сигналів та перехідного згасання. Наведено інтегральні функції розподілу флуктуацій напруженості поля, що дає змогу визначити глибину

флуктуацій та вести розрахунок каналів з випромінюючими кабелями з необхідною надійністю.

У каналах з випромінюючими кабелями виникають глибокі просторові флуктуації перехідного згасання. У триаксальних кабелів глибина флуктуацій більша і досягає 42 дБ, на відміну від кабелів з отворами, у яких вона складає 18 дБ. При більший глибини флуктуацій суттєво зменшується надійність впевненого радіозв'язку в тунелі. Наведені інтегральні функції розподілу флуктуацій напруженості поля дають змогу визначити глибину флуктуацій та вести розрахунок каналів з випромінюючими кабелями з необхідною надійністю.

#### Список використаних джерел

1. 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, pp. 157-159.
2. Lebedev A. S., Gorobets N. N., Yelizarenko A. A. Spatial Distribution of the Amplitude of Electromagnetic Waves in the Near Zone of Linear and Flat Antenna Arrays. *Proceedings of the IEEE XI International Conference on Antenna Theory and Techniques*. 2017. Vol. 11. P. 180-182.
3. Radiating Cables. URL: [http:// www.eupen.com](http://www.eupen.com).
4. Молоковський І. О., Турупалов В. В., Шибанова П. О. Застосування випромінюючого кабелю у технологічних мережах промислових підприємств. *Зб. наук. праць ДонІЗТ*. 2011, № 27, С. 50-56.
5. Sayadi F., Ismail M., Misran N. and Jumari K. Radio Coverage inside Tunnel Utilizing Leaky Coaxial Cable Base Station. *Journal of Applied Sciences*. 2009. Vol. 9: 2887-2896.
6. Компания Times Microwave Systems URL: <http://www.timesmicrowave.com>.
7. Єлізаренко А. О. Дослідження статистичних характеристик каналу з випромінюючим кабелем в тунелі метрополітену. *Зб. наук. праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2006. Вип. 78. С. 157-165.
8. Єлізаренко А. О. Впровадження дводіапазонних мереж технологічного радіозв'язку в тунелях залізниць. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014, № 4, С. 42-47.
9. Теорія ймовірностей та математична статистика / О. І. Кушлик-Дивульська, Н. В. Поліщук, Б. П. Орел, П. І. Штабалюк. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 212 с.

**Horobets M. M., Yelizarenko A. O. Technological radio communication channels with radiating cables in subway and railway tunnels.**

**Abstract.** Radiating cables are widely used for the organization of radio communication channels in underground structures. The radiating cable performs two

functions at the same time: transmission of signals to a given reception location and the function of a receiving and transmitting antenna.

There are two main types of radiating cables based on structural and technological characteristics. Radiating cables are built according to traditional technologies with periodic holes in the outer conductor. In triaxial cables, the outer shields consist of a semicircular aluminum strip separated by a layer of low-loss foamed polyethylene. The two main parameters of VC are longitudinal attenuation of the signal and radiation loss.

A comparative analysis of structural, technological and electrical characteristics of longitudinal and transient attenuation of radiating cables was made by traditional technologies and triaxial cables was carried out. Longitudinal attenuation of signals in cables is considered as a constant value, which differs little in cables of different types of the same size. As the frequency increases, the linear attenuation increases. As the cable diameter increases, the attenuation decreases, and the optimal attenuation/price ratio is for cables with an outer conductor diameter of 7/8".

Transient attenuation in radiating cables is a probabilistic value that is formed by the multi-beam structure of radiated fields. Transient attenuation depends little on the type of cables and signal frequency.

In the work, estimates of the characteristics of random processes of fluctuations in signal field intensity levels and transient fading are determined. Integral functions of the distribution of field strength fluctuations are presented, which allows determining the depth of fluctuations and calculating channels with radiating cables with the required reliability.

**Keywords:** railway technological radio communication, channels with radiating cables, statistical characteristics of radio channels.

Надійшла 04.10.2022 р.

**Горобець Микола Миколайович**, доктор фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри прикладної електродинаміки, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна. E-mail: [Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua](mailto:Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua) <https://orcid.org/0000-0003-3022-9044>

**Єлізаренко Андрій Олександрович**, 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>

**Gorobets M. M.**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Electrodynamics, V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine. E-mail: [Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua](mailto:Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua) <https://orcid.org/0000-0003-3022-9044>

**Yelizarenko Andriy**, 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>