

ЄЛІЗАРЕНКО А. О., канд. техн. наук, доцент (УкрДУЗТ)

Уніфікована методика розрахунку зон обслуговування в мережах залізничного технологічного радіозв'язку

Проведено аналіз вимог до удосконаленої уніфікованої методики розрахунку зон обслуговування в мережах технологічного радіозв'язку.

Розроблено пропозиції щодо уніфікованої методики розрахунку, яка б задовольняла розглянуті вимоги. Перехід від графоаналітичних методів до єдиної аналітичної форми розрахунків підвищує точність і спрощує автоматизацію.

Ключові слова: залізничний технологічний радіозв'язок, енергетичні характеристики радіоканалів, зони обслуговування, розрахунок дальності радіозв'язку.

Вступ

Застосування сучасних радіотехнологій дозволяє суттєво підвищити надійність технічних засобів. У той же час канали рухомого радіозв'язку через складні умови поширення радіохвиль та умови експлуатації є найбільш вразливим елементом систем радіозв'язку. Важливо передбачити можливості підвищення надійності каналів радіозв'язку ще на етапі проєктування. Це можна забезпечити за рахунок використання адекватної моделі розрахунку зон обслуговування радіомереж.

Сектор радіозв'язку в складі Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU-R) очолює дослідження і розроблення рекомендацій з питань розрахунку каналів рухомого радіозв'язку. На сьогодні для вирішення практичних завдань прогнозування рівнів сигналів у каналах рухомого радіозв'язку базовими є модель Окамура-Хата і методика розрахунку за рекомендацією ITU-R P.1546 [1, 2].

У Рекомендації P.1546 [1] використовується методика розрахунку напруженості поля для сучасної рухомої служби на основі кривих поширення радіохвиль, отриманих у результаті численних експериментальних досліджень. Метод прогнозування напруженості поля за моделлю Окамура-Хата, запропонованою для умов великого міста, у рекомендації ITU-R P.529 розвинено також для умов приміської зони і сільської місцевості за рахунок введення відповідних поправок [2, 3]. Рекомендації Міжнародного союзу залізниць з впровадження мереж стільникового радіозв'язку GSM-R фактично базуються на основі моделі Окамура-Хата для умов міст [4].

Отже, відомі міжнародні методики розрахунку каналів рухомого радіозв'язку не враховують умов організації каналів технологічного радіозв'язку на ділянках залізниць.

Розроблено відомчі нормативні документи, що базуються на результатах експериментальних досліджень поширення радіохвиль на станціях і перегонах. Для мереж станційного, поїзного та ремонтно-оперативного радіозв'язку використовують окремі документи [5, 6]. У залізничних моделях використовуються підходи, аналогічні викладеним у рекомендаціях Міжнародного союзу електрозв'язку. Передбачено, що паспорти проєктованих радіомереж мають містити дані про розрахункову і фактичну встановлену дальність радіозв'язку [7].

Постановка проблеми

Залишається актуальною проблема розроблення уніфікованої, єдиної для всіх видів радіомереж, перспективної методики розрахунку зон обслуговування.

Основні результати

При проєктуванні систем рухомого радіозв'язку важливе значення має розрахунок зон обслуговування радіомереж або дальності радіозв'язку. Дальність радіозв'язку – це максимальна відстань, на якій забезпечується необхідна якість зв'язку.

Припускаючи, що на границі зони обслуговування (при максимальній дальності зв'язку) напруга на вході приймача радіостанції $U_{вх}$ дорівнює мінімально допустимому значенню $U_{2мін}$,

$$U_{вх} = U_{2мін}.$$

У загальному випадку дальність радіозв'язку визначають у напрямку від стаціонарної до возимої радіостанції рухомого об'єкта, оскільки умови приймання сигналів на рухомому об'єкті значно гірше, ніж на стаціонарному, внаслідок більш високого рівня

радіозавад у безпосередній близькості від пристроїв контактної мережі [5].

Розрахунки дальності радіозв'язку та зон обслуговування проводяться на основі використання трьох окремих відомчих нормативних документів з організації та розрахунку каналів станційного, поїзного і ремонтно-оперативного радіозв'язку на залізничному транспорті України [5, 6]. Мінімально допустимий рівень корисного сигналу $U_{2\text{мін}}$

визначають за табл. 1 залежно від виду тяги поїздів, швидкості руху і типів локомотивів [5].

При розрахунках енергетичних характеристик радіоканалів технологічні відмінності радіомереж не мають принципового значення. Важливе значення мають використовувані смуги радіочастот, умови організації радіомереж – перегони або станції; інфраструктурні особливості – електрифіковані або неелектрифіковані ділянки та ін.

Таблиця 1

Мінімально допустимі рівні корисних сигналів на вході приймачів локомотивних радіостанцій у мережах технологічного радіозв'язку

Умови експлуатації радіозасобів	$U_{2\text{мін}}$ для приймачів радіостанцій, дБ	
	ЖР-У-ЛП	«Оріон» РВ
Ділянка з тепловозною тягою	4	2
Електровози на ділянках постійного струму при швидкості руху, км/год:		
до 120	10	8
понад 120	14	12
Електровози на ділянках змінного струму:		
у рівнинній частині	18	14
у гірських районах	15	12
Електровози на ділянках змішаної тяги:		
у рівнинній частині	23	16
у гірських районах	18	14
Тепловози на станціях з електротягою постійного струму	23	6
Тепловози на станціях з електротягою змінного струму	18	14

Необхідне розроблення єдиної уніфікованої методики, яка б забезпечувала розрахунки радіомереж різного призначення.

Проведений аналіз дозволив сформулювати основні вимоги до уніфікованої методики розрахунку каналів технологічного радіозв'язку.

1. Доцільно використовувати єдине сімейство кривих поширення радіохвиль у різних мережах, а відмінності умов організації врахувати відповідними поправковими коефіцієнтами, що визначають для умов перегонів і залізничних станцій, електрифікованих і неелектрифікованих ділянок.

2. У чинних методиках необхідно впорядкувати систему поправкових коефіцієнтів, що враховують особливості організації кожної з мереж.

3. Провести уніфікацію параметрів імовірнісних характеристик флуктуаційних процесів.

4. Розробити аналітичну модель розрахунків, що спрощує автоматизацію проектування.

У відомчих методиках відповідно до рекомендацій ITU-R при розрахунках дальності радіозв'язку використовуються криві поширення радіохвиль, що враховують залежність напруженості електричного

поля E_2 від відстані. В уніфікованій методиці використовується єдине сімейство кривих поширення радіохвиль і відповідні поправкові коефіцієнти, що враховують параметри та особливості організації кожної з мереж. У роботі запропоновано як базові використовувати криві поширення радіохвиль, наведені в методиці для перегонів залізниць [6].

Графіки побудовані на основі результатів експериментальних досліджень при певних параметрах радіомереж для умов перегонів на неелектрифікованих ділянках залізниць у середньопересіченій місцевості (тип траси 2), характерній для більшості регіонів України. Крива 1 на рис. 1 побудована для добутку висот установлення антен $h_1 h_2 = 100 \text{ м}^2$. Погіршення умов поширення

радіохвиль на залізничних станціях запропоновано врахувати додатковим параметром $V_{cm} = 5 \text{ дБ}$.

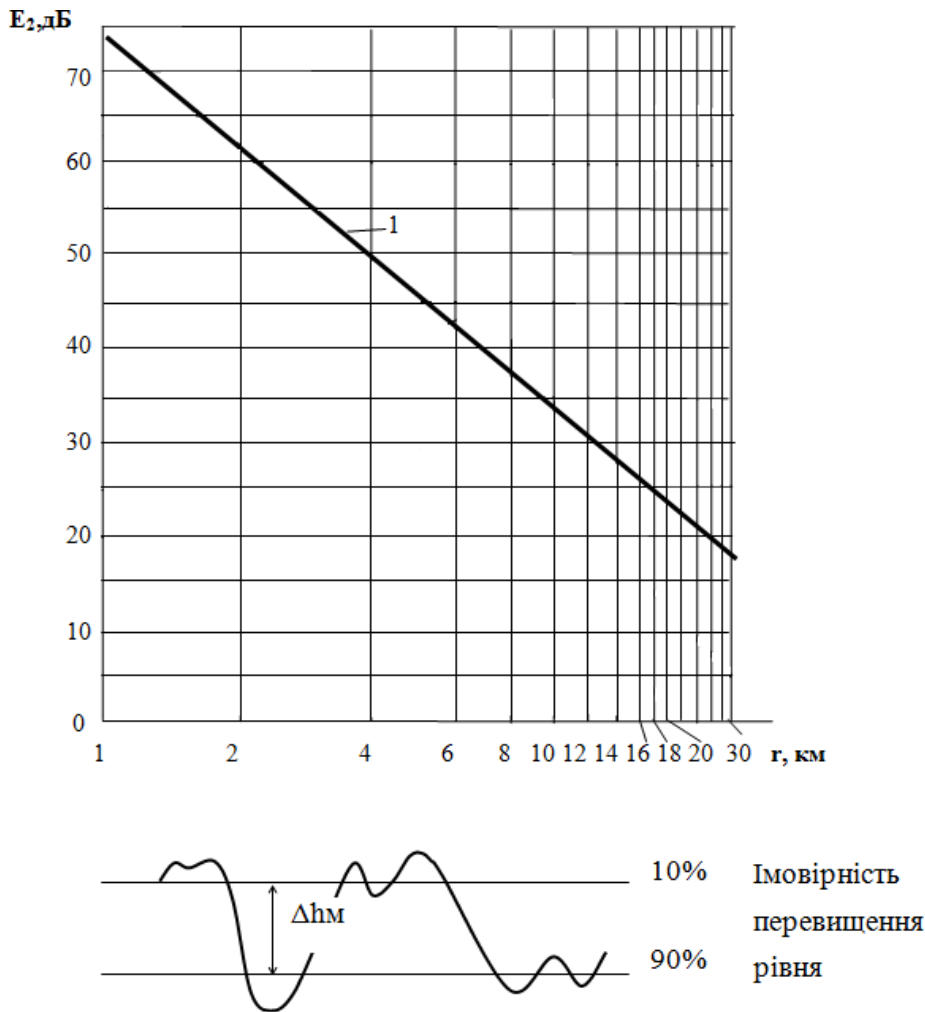


Рис. 1. Базові криві поширення радіохвиль метрового діапазону 160 МГц

Потужність передавача прийнята $P_1=1$ Вт. Коефіцієнт підсилення передавальної антени $G_1 = 0$ дБ стосовно напівхвильового вібратора, загасання у фідері, що з'єднує передавач із антенною, дорівнює нулю $\alpha_1 l_1 = 0$ дБ ($l_1 = 0$ м). Значення напруженості поля сигналу на графіках зазначені в децибелах відповідно до 1 мкВ/м і мають місце протягом 50 % часу в 50 % точок приймання, тобто надійність каналу радіозв'язку по полю становить 50 % внаслідок просторових і часових флуктуацій.

Для запровадження аналітичної форми розрахунків зон обслуговування необхідно подати в аналітичному вигляді всі графічні залежності, використані в методиках розрахунку. Запропоновано аналітичну апроксимацію базової кривої залежності напруженості поля від відстані R за формулою, дБ,

$$E_{2a} = 74,11 - 36,38 \cdot \lg R^{1,1} \quad (1)$$

Пропонується використовувати апроксимацію (1) для розрахунку напруженості поля в каналах на станціях і перегонах. При використанні апроксимації (1) можна визначити напругу на вході приймача радіостанції $U_{вх}$ в умовах, для яких побудовано базову криву. Напруга на вході приймача радіостанції в умовах організації конкретних радіомереж визначається за формулою

$$U_{вх} = E_{2a} - g_2 - \sum V_{\text{парам}} - \sum V_{\text{трас}} - \sum V_{\text{імов}}, \text{ дБ}, \quad (2)$$

де E_{2a} – напруженість поля сигналу, визначена за апроксимацією кривих поширення радіохвиль (1), дБ;
 g_2 – коефіцієнт, що враховує перетворення напруженості поля в просторі E_2 до напруги на вході приймача радіостанції $U_{вх}$, дБ,

$$g_2 = 20 \lg \left(\frac{\lambda}{2} \cdot \sqrt{\frac{Z_{x6}}{120}} \right),$$

де Z_{x6} – хвильовий опір фідера, Ом. Значення коефіцієнта g_2 для частоти 160 МГц і $Z_{x6}=50$ Ом складає 12 дБ;

$\sum V_{\text{парам}}$ – сума поправкових коефіцієнтів, що залежать від параметрів передавача і антенно-фідерних пристроїв передавальної і приймальної радіостанцій, дБ;

$\sum V_{\text{трас}}$ – сума поправкових коефіцієнтів, що залежать від особливостей траси поширення радіохвиль для умов заданої мережі, дБ;

$\sum V_{\text{імов}}$ – сума поправкових коефіцієнтів, що враховують просторові і часові флуктуації напруженості поля сигналів, дБ.

Складові поправкових коефіцієнтів $\sum V_{\text{парам}}$ визначаються за технічними характеристиками використаних радіозасобів [6]. В усіх методиках розрахунку зберігається однаковий набір коефіцієнтів $\sum V_{\text{парам}}$, що враховують потужність передавача і параметри антенно-фідерних трактів передачі і приймання.

Необхідно враховувати фактичні параметри антенно-фідерних трактів і ввести поправку $V_{\text{п}}$, що враховує відмінність фактичної потужності передавача P від потужності $P_1=1$ Вт, прийнятої при побудові графіків кривих поширення радіохвиль, дБ,

$$V_{\text{п}} = 10 \lg \frac{P}{P_1}. \quad (3)$$

Висотний коефіцієнт V_{h} враховує відмінність добутку висот установлення антен $h_1 h_2$ від значення 100 м^2 , прийнятого при побудові кривих поширення радіохвиль [6], дБ,

$$V_{\text{h}} = 20 \lg \frac{h_1 h_2}{100}. \quad (4)$$

Складові поправкових коефіцієнтів $\sum V_{\text{трас}}$ враховують вплив рельєфу місцевості, якою проходить траса радіозв'язку, і зменшення напруженості поля в результаті впливу контактної мережі і корпусу рухомого об'єкта.

Залізничні станції розташовуються на рівнинних ділянках місцевості, але необхідно враховувати наявність забудови міського типу і значний вплив пристроїв контактної мережі та рухомого складу. Ці особливості враховуються поправкою $V_{\text{ст}} = 5$ дБ.

Для умов станцій у формулі (2) при розрахунку поправок $\sum V_{\text{трас}}$ приймають $V_{\text{рел}}=0$ дБ як для трас другого типу за наявності впливу технічних споруд і рухомого складу. На перегонах залізниць необхідно враховувати більший вплив особливостей рельєфу місцевості $V_{\text{рел}}$ на трасах різної складності (табл. 2) [5].

На станціях електрифікованих ділянок залізниць наявний значний вплив пристроїв контактної мережі та додаткових споруд, тому $V_{\text{км}} = 8$ дБ. На перегонах вплив пристроїв контактної мережі істотно менше, що знаходить відображення в менших значеннях коефіцієнтів $V_{\text{км}}=1$ дБ для одноколієних або 2 дБ для двоколієних ділянок [6].

Залежно від місця розташування локомотивної антени на даху електровоза коефіцієнт зменшення рівня сигналу $V_{\text{л}}$ має різні значення [5]. У найгірших умовах маневрового радіозв'язку для мереж на станціях $V_{\text{л}} = 9$ дБ.

Значна кількість абонентів мереж радіозв'язку на станціях користуються носимими радіозасобами. Поправку $V_{\text{рн}}$, що враховує погіршення умов зв'язку в каналах з носимими радіостанціями, приймають рівною $V_{\text{рн}} = 4$ дБ на неелектрифікованих ділянках і $V_{\text{рн}} = 2$ дБ на ділянках з електротягою [6].

Напруженість поля сигналу в мережах рухомого радіозв'язку є випадковою величиною за місцем і часом і враховується поправковим коефіцієнтом $\sum V_{\text{імов}}$. При аналізі просторових флуктуацій напруженості поля в каналах рухомого радіозв'язку розрізняють швидкі і повільні завмирання сигналу. Усі різновиди флуктуаційних процесів є незалежними і їхній спільний вплив визначають за сумою окремих показників [8].

Набір коефіцієнтів, що визначають імовірнісні характеристики сигналів (надійність каналів радіозв'язку по полю) $\sum V_{\text{імов}}$, у каналах ПРЗ враховує особливості трас різної складності, а для каналів, організованих на території залізничних станцій, його подано як один еквівалентний коефіцієнт $V_{\text{і}}$.

Щоб позбутися графоаналітичних підходів у методиках [5, 6] при визначенні показників надійності радіоканалів по полю, запропоновано єдиний підхід у всіх випадках.

Значення сигналу з необхідною надійністю визначають з урахуванням параметра $V(p)$

$$B(p) = \sigma \cdot K, \quad (5)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення значення напруженості поля;

K – коефіцієнт логарифмічно нормального розподілу, що відповідає необхідній надійності зв'язку (табл. 3) [8].

Використання формули (5) виключає необхідність кожного разу звертатись до графіків інтегральних функцій розподілу рівнів сигналів залежно від надійності радіоканалу по полю.

Розрахункове значення середньоквадратичного відхилення для різних умов наведено в табл. 4.

Таблиця 2

Значення поправкових коефіцієнтів залежно від типу траси

Тип траси	1	2	3	4	5
$V_{\text{рел, дБ}}$	3,4	0	- 3,4	- 6,8	- 10,2
	1,8	2,6	3,3	3,9	4,9

Таблиця 3

Значення ймовірнісних коефіцієнтів надійності зв'язку

S(p)	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,92	0,95	0,98	0,99
K	0	0,253	0,524	0,842	1,282	1,4	1,65	2,05	2,326

Таблиця 4

Розрахункове значення середньоквадратичного відхилення флуктуацій

Ділянка залізниці	Організація мереж	Середньоквадратичне відхилення інтерференційних флуктуацій	Середньоквадратичне відхилення часових флуктуацій
Неелектрифікована	Перегони	1,3	1,8
	Станції	3,1	–
Електрифікована	Перегони	4,4	1,8
	Станції	5,2	–

Дальність радіозв'язку можна визначити шляхом безпосереднього розрахунку за умови $U_{\text{вх}} = U_{2\text{мін}}$.

Значення дальностей радіозв'язку, визначених за розробленою уніфікованою методикою та графоаналітичними методами відомчих методик, практично збігаються.

Висновки

На сьогодні розрахунок зон обслуговування в мережах поїзного, станційного і ремонтно-оперативного радіозв'язку здійснюється за різними нормативно-технічними документами, хоча при розрахунках технологічні відмінності радіомереж не мають принципового значення.

Розроблено уніфіковану модель, що базується на матеріалах чинних відомчих методик, але використовує єдине сімейство кривих поширення радіохвиль.

Особливості умов організації кожної з мереж ураховані системою відповідних поправкових

коефіцієнтів, що дозволяють забезпечити ідентичність результатів розрахунків дальності радіозв'язку.

Запропоновано аналітичну апроксимацію базової кривої та визначено аналітичну форму для ймовірнісних показників флуктуацій.

Список використаних джерел

1. Recommendation ITU-R P.1546-6. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. 2019. 57 p.
2. Recommendation ITU-R P.529-3. Prediction methods for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands. 1999. 25 p.
3. Investigation of Modified Hata Propagation Models. Spectrum Planning Report. Radiofrequency Planning Group Australian Communications Authority. SP 2/01. April 2001. 15 p.
4. GSM-R. Procurement & Implementation Guide / International Union of Railways-Paris, 2009. 246 p.
5. Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку ЦШ-0058. Державна адміністрація

- залізничного транспорту України Укрзалізниця. Київ, 2009. 123 с.
6. Методичні вказівки з розрахунку систем станційного радіозв'язку: нормативно-виробниче видання. 1991. 46 с.
 7. Інструкція з утримання технічної документації на пристрої проводового зв'язку, радіозв'язку та пасажирської автоматики: затв. наказом ПАТ «Укрзалізниця» від 20.11.2018 р. № 728. Київ: ПАТ «Укрзалізниця», 2018. 57 с.
 8. Gorobets N. N., Yelizarenko A. A. Analysis of power characteristics of mobile radio communication channels. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77, is. 4. P. 283-295.

Yelizarenko A. O. Unified method of calculating service areas in railway technological radio communication networks.

Abstract. When organizing mobile radio communication systems, the definition of service areas of radio networks is of great importance. The radio communication sector within the International Telecommunication Union (ITU-R) coordinates research and development of recommendations on the calculation of mobile radio communication channels.

Currently, the Okamura-Hata model and the calculation method according to the recommendation of ITU-R P.1546 are the basic ones for solving practical problems of forecasting signal levels in mobile radio communication channels. Known methods of calculating public mobile radio communication channels do not take into account the specifics of the impact of railway infrastructure on technological radio communication channels.

Departmental normative documents on the calculation of train, station and repair and operational radio communication channels have been developed for railway transport. Railway methods are built on the basis of

statistical models of the propagation of radio waves in railway conditions and take into account the recommendations of the International Telecommunication Union.

When calculating the energy characteristics of radio channels, the technological differences of radio networks are not of fundamental importance. The radio frequency bands used, the conditions of radio network organization, and infrastructural features are important. The work solves the problem of developing a unified methodology. An ordered system of correction coefficients, which allows taking into account the conditions of the organization of each of the networks. In order to avoid grapho-analytical methods, analytical expressions for all components of the methodology are proposed. The analytical form simplifies the automation of calculations and allows to increase their accuracy.

Keywords: railway technological radio communication, energy characteristics of radio channels, service areas, calculation of radio communication range.

Надійшла 10.01.2023 р.

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 <https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>.

Єлизаренко А. О., кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: elizarenko1@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>.