

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

**Розрахунок електромагнітної сумісності в задачах частотно-територіального планування мереж технологічного радіозв'язку**

*У роботі розглянуто комплекс питань частотно-територіального планування мереж залізничного технологічного радіозв'язку. Для розрахунків запропонована модель поширення радіохвиль на залізницях, яка дає змогу виконувати розрахунки просторового і частотного рознесення радіозасобів за виконання умов забезпечення електромагнітної сумісності. Розроблено методичку, яка може бути покладена в основу відомчої нормативної бази.*

**Ключові слова:** залізничний технологічний радіозв'язок, електромагнітна сумісність, просторове і частотне рознесення радіозасобів, багатосигнальна вибірковість.

**Вступ**

Із частотно-територіальним плануванням необхідно забезпечити розрахунки зон обслуговування радіомереж та умови забезпечення електромагнітної сумісності радіозасобів.

Частотно-територіальний план вирішує основні питання проектування мереж у конкретних умовах організації радіозв'язку. Для планування визначають зони радіопокриття роботи мереж із заданою якістю і надійністю, частотні обмеження роботи на підходах залізничних ліній до вузлів або в прикордонних смугах, перевіряють зовнішню електромагнітну сумісність планованої системи з РЕЗ інших систем.

Планування мереж технологічного радіозв'язку істотно відрізняється від завдань частотно-територіального планування мереж стільникового радіозв'язку та регламентовано відомчими нормативними документами [1].

Розрахунок електромагнітної сумісності радіозасобів у системах рухомого радіозв'язку залишається актуальним завданням. Про це свідчать не тільки численні публікації в науково-технічній літературі, а і розроблення нових нормативних матеріалів Міжнародного союзу електрозв'язку з цих питань [2, 3]. У рекомендації ITU-R SM.337-6 запропоновано порядок розрахунку територіального і частотного рознесення для забезпечення прийнятного рівня взаємних завад. Метою рекомендації є надання методички, а не розрахунок конкретних значень.

У статті [4] розглянуто особливості визначення методу оцінювання електромагнітної сумісності на основі моделі приймача, передавача і антени з середовищем розповсюдження в локальних зонах.

Для близько розташованих джерел і рецепторів завад запропоновано використовувати коефіцієнт зв'язку між антенами як показник взаємних впливів.

У роботі [5] розглянуто методи забезпечення електромагнітної сумісності з проектуванням локальних мереж безпроводового доступу.

У роботах [6, 7] для розрахунку ЕМС запропоновано використовувати статистичну модель, яка розроблена на основі двопроменевої моделі поширення радіохвиль.

На сьогодні в матеріалах АТ «Укрзалізниця» унормовано методи розрахунку зон обслуговування радіомереж [1], у тому числі розроблені пропозиції щодо уніфікації методів розрахунку радіомереж різного призначення [8], але відсутні методички розрахунку електромагнітної сумісності радіозасобів, які є важливою складовою частотно-територіального планування.

**Постановка проблеми**

Розроблення методички розрахунку внутрішньосистемних завад у мережах залізничного технологічного радіозв'язку на етапах частотно-територіального планування мереж.

**Основні результати**

Розроблення частотно-територіального плану є завершальним етапом робочого проектування радіомереж. При цьому визначають дальність радіозв'язку, умови забезпечення електромагнітної сумісності радіозасобів і вибирають робочі частоти радіомереж.

Електромагнітна сумісність (ЕМС) радіозасобів – це здатність різних електронних пристроїв працювати без взаємних завад у єдиному електромагнітному просторі.

Проблема ЕМС виникає через небажані електромагнітні випромінювання, що створювані

радіозасобами, а також через сприйнятливості радіоприймачів до зовнішніх електромагнітних впливів.

Додатковими факторами, що впливають на проблему ЕМС, є широкий спектр використовуваних частот, висока щільність радіообладнання, недостатнє екранування, вплив індустріальних радіозавод. Це може призвести до погіршення якості та надійності зв'язку і навіть відмов критично важливих систем.

Для аналізу електромагнітної обстановки необхідно визначити вплив випромінювання заводських передавачів, закономірності поширення радіохвиль між випромінювачами та рецепторами радіозавод, характер радіозавод і умови сприйнятливості до радіозавод приймальних пристроїв.

У передавачах створюють ненавмисні завади. Випромінювання через антену, характерні для радіопередавачів, поділяють на основні та неосновні. Основне випромінювання призначене для передавання корисного сигналу. Неосновні випромінювання передавача поділяють на позасмутові, побічні та шумові.

Побічними називають коливання, що виникають у передавачі внаслідок будь-яких нелінійних процесів, крім процесу модуляції. Розрізняють п'ять видів побічних випромінювань: випромінювання на гармоніках, субгармоніках, комбінаційні, інтермодуляційні та паразитні.

За ДСТУ, побічні випромінювання не мають перевищувати 2,5 мкВ. При цьому можливе безпосереднє проникнення завод на вихід приймача внаслідок сприйнятливості приймача до заводських сигналів через побічні канали приймання. Частоти побічних каналів не нормовані, але ці фактори не мають суттєвого впливу на умови забезпечення ЕМС. Тому з частотно-територіальним плануванням необхідно насамперед урахувати потужні сигнали основного випромінювання заводських передавачів і нелінійні ефекти, які виникають у приймачах: блокування сигналів та інтермодуляційні завади.

Розрахункові методи оцінювання ЕМС необхідні для вирішення таких завдань з електромагнітної сумісності, як прогнозування електромагнітної обстановки, підготовка матеріалів на виділення та присвоєння частот, розроблення вимог щодо частотно-територіального планування, оцінювання ступеня впливу ненавмисних завод на якість функціонування РЕЗ та оцінювання ефективності заходів щодо забезпечення ЕМС.

Важливими є розрахунки на основі енергетичних характеристик мереж, які визначають умови забезпечення ЕМС. У разі використання енергетичних критеріїв оцінювання ЕМС важливим моментом є розрахунок загасання на трасі поширення радіохвиль.

У загальному вигляді напруженість поля заводського сигналу, дБ, у місці розташування антени приймача радіостанції як функція частоти  $f$ , часу  $t$ , просторового рознесення  $r$  і поляризації сигналу  $P$  може бути подана як

$$E_{23}(f, t, r, p) = E_{1M}(f, t, p) + L(f, t, r, p), \quad (1)$$

де  $E_{1M}(f, t, p)$  – напруженість поля в місці розташування антени передавача, дБ;

$L(f, t, r, p)$  – функція, що визначає втрати електромагнітної енергії з її поширенням між передавачем і приймачем, дБ.

У системах залізничного технологічного радіозв'язку розрахунок внутрішньосистемної ЕМС дещо спрощений із використанням радіозасобів з орієнтацією на параметри, встановлені ДСТУ [9]. В умовах розрахунку внутрішньосистемних завод таким параметром може бути вибірковість приймача, яка визначена багатосигнальними методами відповідно до ДСТУ 4384:2003.

Для забезпечення ЕМС необхідно визначити просторове рознесення антен працюючих радіозасобів і частотне рознесення робочих каналів, координатні відстані для повторного використання робочих частот.

У роботах [6, 7] запропоновано використовувати експериментальні криві поширення радіохвиль для організації мереж залізничного радіозв'язку. На рисунку показано криві поширення радіохвиль, які відповідають двопробієвій моделі поширення та скореговані за результатами досліджень каналів залізничного радіозв'язку [10, 11].

У моделі розглядають напруженість поля як суму прямого та відбитого від землі променя, тоді результуюче поле подають як

$$E = E_{np} + E_{oid} = \frac{\sqrt{30PG}}{r} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r} \left[ 1 + |\Phi| e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r + j\beta\phi} \right]. \quad (2)$$

Увесь діапазон можливих відстаней під час розрахунку мереж радіозв'язку можна розглядати як три зони:

- зона взаємних завод, у межах якої знаходяться допустимі відстані зближення між радіостанціями, що працюють на різних частотах, – 0,1-1 км;
- робоча зона, у межах якої перебувають можливі відстані необхідної дальності зв'язку, – 1,0-20 км;
- координатна зона, у межах якої знаходяться необхідні відстані територіального рознесення

радіостанцій, що працюють на одній частоті, – 20-100 км.

На початкових ділянках кривих 0,1 – 1 км відбитий промінь не створює суттєвого впливу на загальну величину сигналу, і величина напруженості поля наближається до значень напруженості поля в умовах вільного простору [12].

Основною особливістю поширення в межах робочої зони є наявність впливу інфраструктури залізниць, що призводить до зменшення результуючої

напруженості і формує складну інтерференційну структуру поля з глибокими просторовими флуктуаціями, які враховують відповідно до кривих інтегральної функції розподілу. Розраховуючи зони покриття, потрібно виходити з імовірності забезпечення зв'язку 90-95 % рівня корисних сигналів.

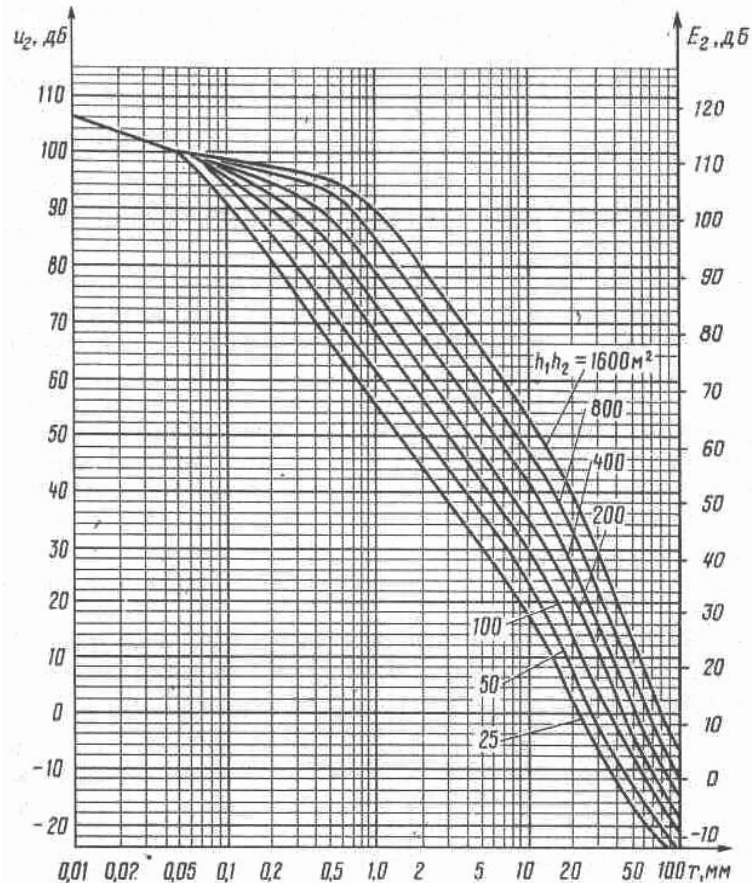


Рис. Криві поширення радіохвиль в умовах впливу інфраструктури залізниць

Для забезпечення умов ЕМС необхідно, щоб у точці приймання рівень завадового сигналу,  $U_{2зав}$  був менший за допустимий  $U_{2зав доп}$ , тобто  $U_{2зав} \leq U_{2зав доп}$ . Для розрахунків ЕМС імовірність перевищення завадового рівня становить  $p=5\div 10\%$ . Тобто надійність виконання умов ЕМС буде складати 90-95 %.

Значення  $U_{2зав доп}$  визначено параметрами захищеності приймача для конкретного виду впливів. Рівень завадового сигналу у приймачі залежить від частотно-залежного ослаблення, яке є мірою багатосигнальної вибіркості приймача. Її вимірюють двосигнальним методом на частоті сусіднього каналу.

Характеристики вибіркості приймача показують умови впливу зі взаємодією. Двосигнальну вибіркості можна розглядати як динамічний діапазон сигналу за умовами блокування.

Для забезпечення умов ЕМС необхідно виключити завади блокування сигналів та інтермодуляції. Із блокуванням погіршуються умови приймання до співвідношення сигнал/шум 12 дБ на виході приймача.

Максимально допустимий рівень завадового сигналу на вході приймача необхідно визначати виходячи з реального значення динамічного діапазону з блокування і прийнятого мінімально допустимого рівня корисного сигналу:

$$U_{2зав.дон} = S_2 + S_2(\Delta f) + U_{2\min}, \quad (3)$$

де  $S_2$  – двосигнальна вибірковість за умови недопустимості блокування, дБ;

$S_2(\Delta f)$  – частотно залежне послаблення завадового сигналу в реальних умовах роботи радіомереж, дБ;

$U_{2\min}$  – мінімальний рівень корисного сигналу.

Значення вибірковості зі зростанням  $S_2(\Delta f)$  не нормоване, але може бути визначено за спеціальними дослідженнями для конкретних типів радіозасобів.

Для реального проєктування розрахунковий рівень завадового сигналу визначають з урахуванням необхідних поправочних коефіцієнтів за формулою

$$U_{2зав.p} = U_{2зав.дон} + \sum B_{\text{парам}} + \sum l$$

У реальних умовах збільшення частотного рознесення між корисними сигналами і завадовими сигналами  $\Delta f = |f_c - f_{зав}|$  призводить до збільшення захищеності приймача і зростання двосигнальної вибірковості.

Якщо корисний сигнал зростає, то завадовий сигнал теж може бути більшим. Тому допустимий рівень завадового сигналу в цьому випадку визначають як

$$U_{2зав.дон.(БЛ)} = S_2 + U_{2\min}, \quad (4)$$

де  $U_{2зав.дон.(БЛ)}$  – допустимий рівень завадового сигналу;

$S_2$  – двосигнальна вибірковість сигналу по сусідньому каналу.

Частотне рознесення призводить до збільшення захищеності і зменшення вимог щодо просторового рознесення джерела та рецептора завад.

У результаті впливу індустріальних радіозавод на електрифікованих ділянках залізниць зростають вимоги щодо рівня корисного сигналу, що дає змогу відповідно підвищувати допустимі рівні завадових сигналів  $U_{2зав.дон.(БЛ)} = 74\text{дБ}$ . А на ділянках постійного струму складає  $U_{2зав.дон.(БЛ)} = 68\text{дБ}$ .

Тоді просторове рознесення між антенами стаціонарних радіостанцій складає на ділянках

змінного струму  $\Delta r_{дон} = 550\text{м}$ , а на ділянках із постійним струмом необхідна відстань зростає до  $\Delta r_{дон} = 800\text{м}$ , за кривими поширення радіохвиль на рисунку. Із частотним рознесенням 150 кГц просторове рознесення може бути зменшене до 50 м, за рахунок зростання допустимого рівня завадового сигналу зі зростанням  $S_2(\Delta f)$ .

Інтермодуляційні завади виникають на виході приймача у випадку взаємодії двох або більше сигналів, частоти яких не співпадають із частотами основного і побічних каналів приймання.

Інтермодуляційно сумісними є сигнали, які не утворюють складових із робочими частотами приймачів.

Найбільш небезпечними є інтерференційні складові третього порядку, для виникнення яких достатньо двох завадових сигналів.

$$\begin{aligned} 2f_1 - f_2 &= f_{\text{роб}}; \\ f_1 + f_2 - f_3 &= f_{\text{роб}}. \end{aligned}$$

Інтермодуляційну вибірковість визначають за значеннями трисигнальної вибірковості. Інтермодуляція виникає в преселекторі, а далі підсилюється в тракці приймання корисного сигналу. Тому значення інтермодуляційної вибірковості не залежить від різниці частот корисного і завадового сигналів.

Найбільш ефективним засобом забезпечення інтермодуляційної вибірковості є вибір інтермодуляційно сумісних частот. Це важливо для вибору робочих частот мереж на сортувальних станціях, де розташована значна кількість радіозасобів станційного, поїзного та ремонтно-оперативного радіозв'язку.

Для розрахунку координатних відстаней із роботою радіозасобів на однакових частотах використано третину кривих на відстанях понад 30 км, в основу яких покладені криві поширення радіохвиль за рекомендацією ITU-R P.1546 [13].

У разі роботи радіозасобів на однакових частотах необхідно виключити помилкове приймання завадового сигналу зі спрацюванням шумоподавлювача, якщо  $U_{2зав.дон.коорд} = 0,3\text{мкВ}$ .

Для умов потужності передавача  $P = 12\text{Вт}$  і добутку висот установлення антен  $h_1 h_2 = 100\text{м}^2$  (де  $h_1 = 10\text{м}$ ,  $h_2 = 10\text{м}$ ) необхідне значення координатної відстані  $\Delta r_{\text{корд}}$  складає близько 50 км, а для добутку антен  $h_1 h_2 = 200\text{м}^2$  необхідна координатна відстань зростає до 60 км.

## Висновки

1. У роботі розглянуто комплекс питань частотно-територіального планування мереж залізничного технологічного радіозв'язку.

2. Для частотно-територіального планування радіомереж необхідно розв'язувати два типи задач: визначити зони обслуговування радіомереж із заданою якістю і надійністю зв'язку та розрахувати просторове та частотне рознесення за умови забезпечення електромагнітної сумісності радіозасобів.

3. Створена нормативна база вирішує ряд питань організації та розрахунку зон обслуговування радіомереж. Зараз відсутні нормативні документи, які б регламентували методи розрахунку електромагнітної сумісності та вибір номіналів частот для використання в мережах залізничного радіозв'язку.

4. В основу розрахунку EMC покладені енергетичні критерії та розглянуті особливості поширення радіохвиль в умовах впливу інфраструктури залізниць.

5. Розроблено методику розрахунку електромагнітної сумісності, яка може бути покладена в основу відомчої нормативної бази.

#### Список використаних джерел

1. ЦШ-0058. Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку / Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця. Київ, 2009. 123 с.
2. Recommendation ITU-R SM.337. Frequency and distance separations. 2019. 12 p.
3. Recommendation ITU-R SM.1134. Intermodulation interference calculations in the land-mobile service. 2010. 36 p.
4. Кузавков В. В., Зарубенко А. О. Аналіз методів оцінки електромагнітної сумісності засобів радіозв'язку розташованих на локальному об'єкті. *Збірник наукових праць ВІПІ*. 2018. № 2. С. 57-66.
5. Лемешко А. В., Афонін С. В., Заребенко А. О. Аналіз проблем EMC з метою розроблення ефективної методики проектування БІМ на базі інформаційних систем з урахуванням електромагнітних завад зв'язку. *Збірник наукових праць ВІПІ*.
6. Транкінгові мережі залізничного технологічного радіозв'язку / О. В. Єлізаренко, А. О. Єлізаренко, В. П. Поляков, К. А. Трубочанінова. Харків: УкрДАЗТ, 2007. 114 с.
7. Радіотехнічні системи залізничного транспорту: навч. посіб. / С. В. Панченко, С. І. Приходько, А. О. Єлізаренко, Н. А. Корольова. Харків: УкрДУЗТ, 2024. 145 с.
8. Єлізаренко А. О. Удосконалена статистична модель для розрахунку енергетичних

характеристик каналів залізничного технологічного радіозв'язку. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2015. № 2. С. 37-42.

9. ДСТУ 4184:2003. Радіостанції з кутовою модуляцією суходільної рухомої служби. Класифікація. Загальні технічні вимоги. Методи вимірювання. Київ, 2003. 50 с.
10. Пілінський В. В. Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль. Київ: НТУ «КПІ», 2014. 336 с.
11. ITU-R Recommendation P.530. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. 2001. 36 p.
12. ITU-R Recommendation P.525. Calculation of free-space attenuation. International Telecommunication Union. 2010. 4 p.
13. Recommendation ITU-R P.1546-3. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. 2007. 57 с.

#### Yelizarenko Andriy. Calculation of electromagnetic compatibility in frequency-territorial planning problems of technological radio communication networks

The paper considers a set of issues of frequency-territorial planning of railway technological radio communication networks. In frequency-territorial planning of radio networks, it is necessary to solve two types of problems: to determine the service areas of radio networks with a given quality and reliability of communication and to perform calculations of spatial and frequency separation provided that the electromagnetic compatibility of radio equipment is ensured.

At present, the regulatory framework that has been created solves a number of issues of organization and calculation of service areas of radio networks. Currently, there are no regulatory documents that would regulate the methods of calculating electromagnetic compatibility and the selection of operating frequencies for use in technological radio communication networks.

To analyze the electromagnetic environment, it is necessary to determine the influence of radiation from interfering transmitters, the patterns of radio wave propagation between emitters and receptors of radio interference, the nature of radio interference, and the conditions of susceptibility to radio interference of receiving devices. In the calculations, a model of radio wave propagation under the influence of railway infrastructure was proposed, which allows calculations of spatial and frequency separation of radio equipment while meeting the conditions for ensuring electromagnetic compatibility. A methodology has been

developed that can be used as the basis for departmental regulatory framework.

**Єлізаренко 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 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>.