

УДК 004.942

Березкін А.Л.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ В ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України

abis1999@ukr.net

Вступ

Гірничі виробки (ГВ) характеризуються складною геометрією своїх поверхонь, що при розповсюдженні радіосигналів зумовлює виникнення таких явищ, як дифракція, рефракція та інтерференція, що призводить до появи інтермодуляційних завад та явища загасання радіосигналу. На даний час на гірничих підприємствах впроваджуються технології мобільного зв'язку, позиціонування персоналу і транспортних засобів. Гарантована робота радіопристроїв досягається використанням особливих протоколів радіообміну та програмних засобів. В даних про технічні характеристики таких систем відмічається, що відстань від передавача до приймача може бути в межах до 300 метрів. Це не завжди є прийнятно, зважаючи на ціну радіосистем. Значною проблемою є відсутність моделей розповсюдження електромагнітної енергії в умовах ГВ, що не дозволяють робити радіопланування як це робиться на поверхні землі. Тому в практичному плані доцільною є розробка моделей розповсюдження електромагнітної енергії вздовж гірничих виробок в першу чергу програмних засобів радіопланування, що дозволять використання існуючих систем радіообладнання зв'язку більш ефективно при вимогах до дальності передачі не нижче 300 метрів.

Розповсюдження радіохвиль над землею та чинники формування електромагнітного поля і хвильові процеси у вільному просторі наведено у [1-3], але подібного аналізу процесів формування цих явищ у ГВ немає. Наприклад, термін «підземний радіозв'язок» пов'язаний з процесом розповсюдження радіохвиль крізь геологічну породу (світовий океан) та процеси, які виникають на кордоні земля-атмосфера [2],

але не з розповсюдженням радіохвиль вздовж ГВ.

Найвідоміше дослідження розповсюдження радіохвиль в шахті було проведено у 1975 році [4]. Пізніше було проведено ще ряд досліджень [5-9]. Сучасні погляди на процес формування радіоканалу та його особливості викладено у роботах [10-11].

У роботах [4-9] в основу формування електромагнітного поля та розповсюдження радіохвиль покладено закони розповсюдження електромагнітної енергії у прямокутному хвилеводі з урахуванням процесів послаблення радіохвиль, що виникають на стінах ГВ при віддзеркалюванні радіопроменя. Процеси віддзеркалювання розглядають як процеси розповсюдження радіохвиль у шаруватих структурах. Процес формування електромагнітного поля розглядається як рівняння Максвелла та наведено формули для розрахунку втрат електромагнітної енергії при розповсюдженні радіохвиль у шахті. Порівнюються результати теоретичних розрахунків та практичних вимірювань втрат електромагнітної енергії. Дослідження виконано при розповсюдженні радіохвиль на частотах 200-4000 МГц.

Процес розповсюдження електромагнітної енергії розглядається як процес у прямокутному хвилеводі. Взято до уваги вертикальні та горизонтальні поляризаційні складові електромагнітного поля, багатопроменеве розповсюдження радіосигналу, процеси формування віддзеркалення радіопроменя як наслідок шаруватої структури стінок тунелів шахти. Розповсюдження радіопроменя за рік розглядається як розповсюдження електромагнітної енергії у прямокутному хвилеводі, тобто як перехрестя цих хвилеводів.

У роботах [4-9] за основу взято один-два фактори формування електромагнітного поля в замкнутому просторі, не розглядається їх взаємодія, деякі чинники не враховуються зовсім, що не дозволяє отримати повноцінну математичну модель.

У вільному доступі не вдалось знайти опису методики чи методу розрахунку радіопокриття у ГВ.

Мета

Мета полягає в розробці моделей розповсюдження енергії електромагнітного поля в ГВ для створення програмних засобів щодо вирішення задач радіопланування для забезпечення ефективного прийому радіосигналів. Точна оцінка радіопокриття в ГВ дозволяє правильно оцінити потреби у радіообладнанні, скоротити строки його монтажування, налагодження та вводу в дію радіосистем, що зрештою дозволяє отримати значну економію коштів.

Основна частина

У роботах [4-9] процес формування електромагнітного поля в шахті порівнюють з процесами у прямокутному хвилеводі.

Теоретично існування електромагнітного поля у прямокутному хвилеводі можливе лише тоді, коли виконуються умови рівнянь Максвелла [9]:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\mu \mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \operatorname{div}(\varepsilon \varepsilon_0) &= 0 \\ \operatorname{div}(\mu \mu_0) &= 0 \end{aligned}$$

де ε – діелектрична проникність, ε_0 – діелектрична проникність вакууму, μ – магнітна проникність, μ_0 – магнітна проникність вакууму, σ – питома провідність.

І умови розповсюдження радіохвиль:

$$\lambda < \lambda_{\text{кр}} = 2a; \lambda < \lambda_{\text{кр}} = 2b.$$

де λ – довжина хвилі, $\lambda_{\text{кр}}$ – максимальна довжина радіохвилі, яка може існувати у цьому прямокутному хвилеводі. Таким чином, умовою існування електромагнітної хвилі у хвилеводі є кратність сторони a чи b половині довжини радіохвилі будь-якого типу радіохвилі [12].

На рисунку 1 зображено профілі прямокутних хвилеводів А, В, С, та ймовірні профілі шахтних штреків відносно профілів прямокутних В, С.

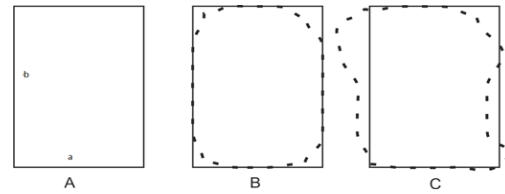


Рис. 1. А – профіль прямокутного хвилеводу, В, С – штриховою лінією зображено ймовірні профілі шахтного штреку по відношенню до прямокутного хвилеводу.

Аналізуючи можливі профілі штреків у шахті (рисунок 1), помітно, що в них дуже важко виконати умови для розповсюдження радіохвиль. В [4-9] при аналізі електромагнітного поля беруться до уваги в основному прямокутні залізобетонні штреки. Також описані умови можливі при розгляді гірничих виробіток прямокутної форми, наприклад, у соляних шахтах.

Визначимо чинники, що впливають на формування електромагнітного поля у ГВ. На рисунку 2 зображено результати моделювання випромінювання ЕМЕ, де варіант а – у вільному просторі, варіант б – в умовах тунелю шахти, на якому видно вплив зон Френеля на формування загальної діаграми розподілу енергії поля випромінювання. Дані отримано з використанням програмної платформи Matlab. Вісь X – спрямована по ширині тунелю (1,5 м), Y – вздовж тунелю (більше 5 м), Z – по висоті тунелю (2 м).

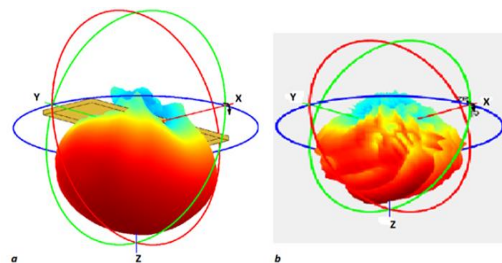


Рис. 2. Формування діаграми розподілу енергії від первинного джерела.

Як показано на рисунку 2, в умовах ГВ діаграма випромінювання від антени розпадається на сектори. Відстань між секторами кратна довжині радіохвилі λ . Так

як в силу конфігурації ГВ основним джерелом випромінювання стає вторинне джерело, що формується віддзеркаленням від поверхні яка оточує первинне джерело, як наслідок, маємо мінімуми і максимуми енергії поля, що віддзеркалюється.

Важливість значення зон Френеля пояснює поняття радіоканалу, що є прямою яка з'єднує радіопередавач і радіоприймач. Навколо цієї прямої формується еліпси – зони Френеля [13], рисунок 3 точки А і С.

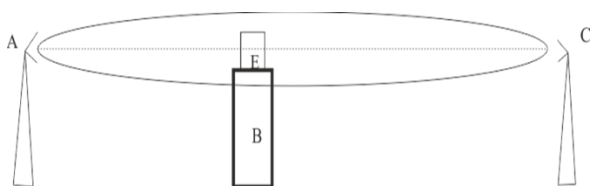


Рис. 3. Радіоканал і перша зона Френеля.

З точки зору радіоприйому, значення зон Френеля полягає в тому, що в них концентрується енергія передачі радіосигналу. Найбільш суттєвими є перші три зони, де концентрується 80% енергії передачі.

Ширина еліпса зон Френеля пов'язана зі значенням довжини радіохвилі – чим менше довжина радіохвилі, тим менше ширина зон Френеля

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{d}{4f}}$$

де r – радіус зони Френеля, d – відстань між радіопередавачем і радіоприймачем, f – частота сигналу.

В таблиці 1 наведено радіус зон Френеля по відношенню до частоти (довжини хвилі) радіосигналу при відстані між точками передачі та прийому 305 м.

Таблиця 1.

f (МГц)	200	400	900	1000	1800	2400	5600
λ (м)	1,5	0,75	0,33	0,3	0,17	0,13	0,05
r (м)	10,69	7,56	5,04	4,78	3,56	3,09	2,02

Також необхідно відрізнити поняття хвилеводу викладеного у [12], від хвилеводів, як явища створення сприятливих умов для розповсюдження радіохвиль у будь-якому середовищі [1-3].

В таблиці 1 наведено співвідношення частоти радіосигналу до його довжини

хвилі. Очевидно, що при збільшенні частоти радіосигналу, довжина хвилі стає порівняною з розмірами перешкод всередині замкнутих поверхонь (штреків шахти). Відповідно, для аналізу чинників, що впливають на створення електромагнітного поля в ГВ, закономірно враховувати теоретичні положення, викладені у [1-3].

Користуючись рисунками 4, 5, визначимо умови розповсюдження радіохвиль.



Рис. 4. Приклади складної поверхні в штреках шахти.



Рис. 5. Приклади гладкої поверхні в штреках шахти.

В ГВ можливі наступні основні умови до типів поверхонь, що впливають на формування та розповсюдження енергії електромагнітного поля:

- розповсюдження у вільному просторі;
- розповсюдження в умовах наближених до прямокутного хвилеводу;
- розповсюдження з огинанням перешкод -дифракція;

- гладкі поверхні, що створюють умови віддзеркалювання для радіопроменив;
- перешкоди, що сприяють багатопроменевому розповсюдженню радіохвиль;
- розповсюдження в шаруватих структурах та крайових умовах;
- відтворення електромагнітного поля на краях отвору та на півплощині;
- розповсюдження радіохвиль над нерівною поверхнею, підсилення за перешкодою.

Визначено, що на формування електромагнітної енергії в точках тунелів шахт суттєвий вплив мають наступні типи розповсюдження, створені первинним джерелом, для кожного з яких відображено загальні залежності, на основі яких обчислюється енергія поля в довільній з точок:

- Π_1 – електромагнітне поле, що створено первинним джерелом;

$$\Pi = \frac{1}{\varepsilon R} e^{ikR}$$

- Π_2 – від гладкої поверхні;

$$\Pi = \frac{1}{2} \left\{ \frac{e^{iR_1 k}}{R_1} + \frac{e^{iR_2 k}}{R_2} + (f - 1) \frac{e^{iR_2 k}}{R_2} \right\}$$

- Π_3 – електромагнітне поле, що створюється поверхнею яка обмежує об'єм

$$\Pi(R) = \int P \frac{e^{-ikr}}{r} dV' + \frac{1}{4\pi} \int \left\{ \frac{\partial \Pi}{\partial n} \frac{e^{-ikr}}{r} - -\Pi \frac{\partial}{\partial n} \frac{e^{-ikr}}{r} \right\} dS'$$

- Π_4 – дифракція на півплощині

$$\Pi(C) = \frac{(-i)}{2\pi} p \frac{e^{ikD}}{D} \{F(u_2) - F(-u_1)\} \times \{F(v_2) - F(-v_1)\}$$

- Π_5 – прямолінійне розповсюдженням

$$\Pi(R) = -\frac{ikp}{2\pi} \int \frac{p_0}{p} \frac{e^{ik(r+p)}}{rp} dS'$$

- Π_6 – проходження через перешкоду з отвором

$$\Pi(\varphi) = \int_S K(\varphi) \frac{a_0}{r} \cos(\omega t - kr + \alpha_0) dS$$

- Π_7 – розповсюдження у вільному просторі

$$\Pi(R) = \frac{1}{\varepsilon} \int_V \frac{P(R')}{r} e^{ikr} + \frac{1}{4\pi} \int_S \left\{ \frac{e^{ikr}}{r} \frac{\partial \Pi(R')}{\partial n} - \frac{\partial e^{ikr/r}}{\partial n} \Pi(R') \right\} dS'$$

- Π_8 – розповсюдження у неоднорідному середовищі

$$\Pi(R) = -\frac{1}{4\pi} \int U(R') v(R, R') dV' + \frac{1}{4\pi} \int_S \left\{ v(R, R') \frac{\partial u(R')}{\partial n} - u(R') \frac{\partial v(R, R')}{\partial n} \right\} dS' + \frac{1}{4\pi} \int_V u(R') (\nabla_R^2 v(R, R') + k^2(R') v(R, R')) dV'$$

Враховуючи всі чинники, запропоновано адитивну математичну модель електромагнітного поля $\Pi_{\text{рез}}$ в будь-якій точці замкнутого простору:

$$E_{\text{рез}}(t) = \sum_{i=1}^N K_i G_i(t).$$

де K_i – коефіцієнт налаштування, який визначається по методу найменших квадратів. Він враховує взаємний вплив моделей розповсюдження в умовах тунелів шахти. $G_i(t_i)$ – апроксимуючі функції, що є функціями розповсюдження електромагнітного поля та описуються представленими вище класичними моделями.

Для отримання функції розподілу енергії сигналу в точках тунелю запропоновано використовувати функції розповсюдження радіосигналу, отримані для класичних варіантів розповсюдження у вигляді алгебраїчної суми енергій поля.

Функція $E_{\text{рез}}(t)$ вибудовується на основі експериментальних даних отриманих в точці тунелю, шляхом виміру значень енергії ряду точок періоду сигналу від еталонного радіопередавача (рис.6) методом найменших квадратів.

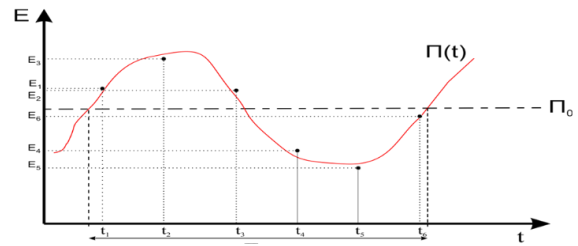


Рис. 6. Отримання значень величини енергії

$$K = [\Pi^T * \Pi]^{-1} * \Pi^T * E$$

$$K = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \dots \\ K_N \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_M \end{bmatrix}$$

$$M \geq N$$

$$\Pi = \begin{bmatrix} G_1(t_1) & \dots & G_N(t_1) \\ G_1(t_2) & \dots & G_N(t_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ G_1(t_M) & \dots & G_N(t_M) \end{bmatrix}$$

E_i – отримані значення енергії поля в заданій точці шляхом вимірювання.

Для отримання найбільш точного значення функції розподілу енергії $E_{\text{рез}}(t)$ використовується метод Чебишевського наближення для задач лінійної апроксимації.

Якісна картина перерозподілу енергії електромагнітного поля радіосигналу за наявності в ГВ ефекту віддзеркалювання і приклад екстраполяції значення функції енергії поля, що отримано в точці R, в точки R' і R'', зображено на рисунку 7.

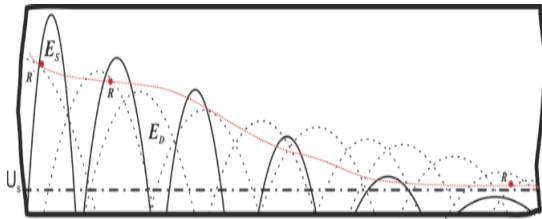


Рис. 7. Загальна модель розподілу енергії електромагнітного поля в тунелі шахти з урахуванням ефекту віддзеркалювання (пунктирна лінія) і приклад екстраполяції значення функції енергії поля, що отримано в точці R в точки R' і R''

Висновки

На основі проведеного аналізу типів ГВ та умов розповсюдження електромагнітних хвиль в них, запропоновано математичну модель формування розподілу енергії електромагнітного поля в них на основі існуючих класичних моделей розповсюдження електромагнітних хвиль у вільному просторі і над різноманітними типами підстильної поверхні. Запропоновано метод визначення відстані до місця розміщення радіоприймачів при вирішенні завдань радіопланування в тунелях шахт на основі використання математичної моделі енергії електромагнітного поля в точці, що є адитивною сумою енергій складових поля, які описують як процеси прямолінійного розповсюдження радіосигналів, так і ті, що виникають внаслідок дифракції та рефракції. Функції енергії в точці для складових, що входять в математичну модель, визначаються згідно існуючих класичних моделей розповсюдження радіохвиль. А загальна функція енергії поля в точці формується як адитивна сума функцій складових поля, де коефіцієнти

налаштування визначаються методом найменших квадратів за експериментальними даними. В запропонованому методі ітераційний процес уточнення відстані між передавачем і приймачем реалізується за рахунок екстраполяції функції енергії поля на іншу відстань з урахуванням обмеження на мінімальну енергію сигналу відповідно чутливості радіоприймача, з подальшим експериментальним підтвердженням рівня енергії сигналу.

Література

1. Голдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. Изд. второе. – М.: Советское радио, 1971. – 664 с.
2. Грудинска Г.П. Распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.
3. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. Издание второе. – М.: Наука Физматлит, 1999. – 496 с.
4. Alfred G. Emslie, Robert L. Lagace, Peter F. Strong Theory of the Propagation of UHF Radio Waves in Coal Mine Tunnels // IEEE transactions on antennas and propagation, 1975. – Vol. AP-23. – №2. – P. 192-205.
5. Chenming Zhou, Joseph Waynert, Timothy Plass, Ronald Jacksha. Attenuation constants of radio waves in lossy-walled rectangular waveguides // Progress In Electromagnetics Research, 2013. – Vol. 142. – P.75-105.
6. Chenming Zhou, Joseph Waynert, Timothy Plass, Ronald Jacksha. Modeling RF Propagation in Tunnels // Conference: 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-SURSI) At: Orlando, FL. – P. 1916-1917
7. Jacksha R., C. Zhou Measurement of RF propagation around corners in underground mines and tunnels // Trans Soc Min Metall Explor Inc, 2016. – №340(1). – P. 30-37.
8. M. Boutin, A. Benzakour, C.L. Despins Radio Wave Characterization and Modeling in Underground Mine Tunnels // IEEE Transactions on antennas and propagation, 2008. – Vol. 56. – №2.

9. Timothy Plass, Ronald Jacksha, Joseph Waynert, Chenming Zhou. Measurement of RF Propagation in Tunnels // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). Conf. 2013, At Orlando, FL. – P. 1604-1605.

10. Рекомендация МСЭ-R P. 526-9. Распространение радиоволн за счет дифракции. Ассамблея радиосвязи МСЭ.

11. Рекомендация МСЭ-R P. 530-15. Данные о распространении радиоволн и

методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости. Серия Р. Распространение радиоволн. ИТУ (09/2013). – 53 с.

12. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – Т.1. – М.: Высшая школа, 1970. – 440 с.

13. William C. Y. Lee. Mobile Communications Design Fundamentals. Second Edition // A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & SONS, 1993. – 369 p.

Березкін А.Л.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ В ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ

Розглянуті чинники і умови, що впливають на модель розподілу енергії електромагнітного поля при розповсюдженні електромагнітних хвиль у гірничих виробках. Проведено аналіз відомих публікацій та запропоновано принципи оцінки впливу чинників, що існують в гірничих виробках, з точки зору класичних моделей розповсюдження електромагнітних хвиль на формування моделі розподілу енергії електромагнітного поля в заданій точці виробки. Запропоновано математичну модель енергії електромагнітного поля в заданій точці. Визначено зональний-френелівський тип розподілу енергії електромагнітного поля в гірничих виробках. Запропоновано методики по спрощенню побудови математичної моделі розподілу енергії електромагнітного поля, що зменшує кількість аналізованих чинників але не впливає на загальну якість моделі. Доведена значимість розробленої моделі з точки зору радіопланування в гірничих виробках, впровадження нових систем радіозв'язку в шахтах та інших подібних об'єктах.

Ключові слова: розповсюдження радіохвиль, багатопроменеве розповсюдження, математична модель, дифракція, інтерференція, розповсюдження радіохвиль, радіопланування.

Berezkin A.L.

FEATURES OF DISTRIBUTION OF ELECTROMAGNETIC POWER IN MINING WORKS

The factors and conditions affecting the model of the distribution of the energy of the electromagnetic field during the propagation of electromagnetic waves in mining are considered. The analysis of well-known publications is carried out and the principles of assessing the influence of existing factors in mine workings from the point of view of classical models of the propagation of electromagnetic waves on the formation of a model of the distribution of the energy of the electromagnetic field at a given point of development are proposed. A mathematical model of the energy of the electromagnetic field at a given point is proposed. The type of the model of the distribution of the energy of the electromagnetic field in the mine workings as zonal-Fresnel was determined. Methods are proposed that simplify the construction of a mathematical model of the distribution of the energy of the electromagnetic field, allows to reduce the number of analyzed factors, but does not affect the overall quality of the model. The significance of the developed model from the point of view of radio planning in mine workings, the introduction of new radio communication systems in mines and other similar objects has been proved.

Keywords: radio wave propagation, multipath propagation, mathematical model, diffraction, interference, radio wave propagation, radio planning.