
doi: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.04.015>
УДК 004.942

А.Л. Березкін, аспірант

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
(Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15,
тел. +380 44 4248773, e-mail: abis1999@ukr.net)

Модель формування електромагнітного поля в умовах замкнутого простору

Розглянуто на прикладі шахти чинники і умови, які впливають на формування електромагнітного поля і розповсюдження електромагнітних хвиль у замкнутих просторах. Проаналізовано відомі публікації та встановлено принципи оцінки впливу даних чинників для класичних моделей розповсюдження електромагнітних хвиль на формування електромагнітного поля в заданій точці замкнутого простору. Визначено зональний френелівський тип розподілу електромагнітного поля на прикладі штреків шахти. Запропоновано математичну модель формування електромагнітного поля в заданій точці та методи спрощення її побудови, які дозволяють пришвидшити створення моделі, але не призводять до суттєвого зниження точності результатів. Доведено ефективність розробленої моделі при впровадженні нових систем радіозв'язку на великих промислових об'єктах.

К л ю ч о в і с л о в а: розповсюдження радіохвиль, багатопроменеве розповсюдження, математична модель, дифракція, інтерференція.

У зв'язку із постійним збільшенням об'ємів інформації, що передається, суттєво зростає популярність бездротових засобів передачі інформації. Мініатюризація радіопристроїв сприяла їх мобільності та розширенню використання. Наразі стало можливим використання радіопристроїв там, де раніше це було складно зробити, враховуючи їх розміри. Різноманітні радіоприлади знайшли своє місце в повсякденному житті людини, проте це не стало звичайним явищем на виробництві. Відставання у часі між поширенням сучасних радіоприладів в побуті та на виробництві сягає 5—10 років. Настав час робити кроки для ліквідування цього відставання.

Впровадження на підприємствах нових систем радіозв'язку (таких як WiFi-6, LTE, 5G та ін.) стикнулося з суттєвими проблемами. Насамперед це — частотне планування і розміщення радіоприладів. Нові радіотехнології, на відміну від попередніх, використовують частоти гігагерцо-

© Березкін А.Л., 2020

вого діапазону, замість мегагерцового. Відмінність цих діапазонів полягає, насамперед, в умовах розповсюдження радіохвиль. Радіохвилі гігагерцового діапазону мають більше обмежень при розповсюдженні, ніж радіохвилі нижчого частотного діапазону.

Середовище використання радіопристроїв на підприємствах — це цехи заводів, великі кар'єри, різноманітні шахти, тунелі. Всі ці об'єкти можна віднести до категорії замкнутих або майже замкнутих просторів. Радіохвилі гігагерцового діапазону в цих умовах мають свою перевагу. Оскільки за технічних причин радіоприлади в замкнутих просторах на гігагерцових частотах не мали широкого застосування, дослідження розповсюдження радіохвиль в цих умовах не проводилися в класичному вигляді, і тепер це створює труднощі при радіочастотному плануванні.

Постановка задачі. Розглянемо задачу формування електромагнітного поля в замкнутому просторі на прикладі шахти. Оскільки шахти подібні між собою за типом підземного планування (інфраструктури), за основу візьмемо план шахти, зображений на рис. 1. Розміри горизонту можна оцінити по червоним масштабним лініям, відстань між якими 30 м. Довжина підземних виробіток сягає десятків кілометрів. Горизонт шахти складається зі штреків різної довжини, різної форми у вертикальному розрізі та має різну поверхню стін, підлоги та стелі.

Поверхню штреків зображено на рис. 2. Для повної оцінки штреків і їх поверхні треба додати, що деякі шахти (наприклад соляні) мають майже дзеркальну поверхню. Ними вільно їздить велика колісна техніка. На відміну від них вугільні шахти зазвичай вузькі і низькі, дві людини не завжди пройдуть поруч. Крім того, штреки насичені великою кількістю металічних конструкцій. Температура повітря у штреках 16—30 °С і зазвичай висока волога повітря, яке може бути насичено різноманітними газами та водяною парою.

Зараз у шахтах використовується частотний діапазон 400—5000 МГц. Радіоприлади, які використовують діапазон 400—900 МГц, мають досить великі маса-габаритні параметри і споживають багато енергії, тому їх використання з розвитком радіотехнологій має тенденцію до згортання. Увагу заслуговує частотний діапазон 900—5000 МГц.

Точна оцінка радіопокриття в штреках дозволяє правильно оцінити потреби у радіообладнанні, скоротити строки його монтування, налагодження та вводу в дію радіосистем. Необхідно також враховувати вимоги безпеки у шахтах, де не завжди є можливість використовувати потужні по випромінюванню радіоприлади. Існує два шляхи вирішення проблеми: використання великої кількості радіоприладів та забезпечення ефективного планування радіопокриття, що зрештою дозволяє отримати значну економією коштів.

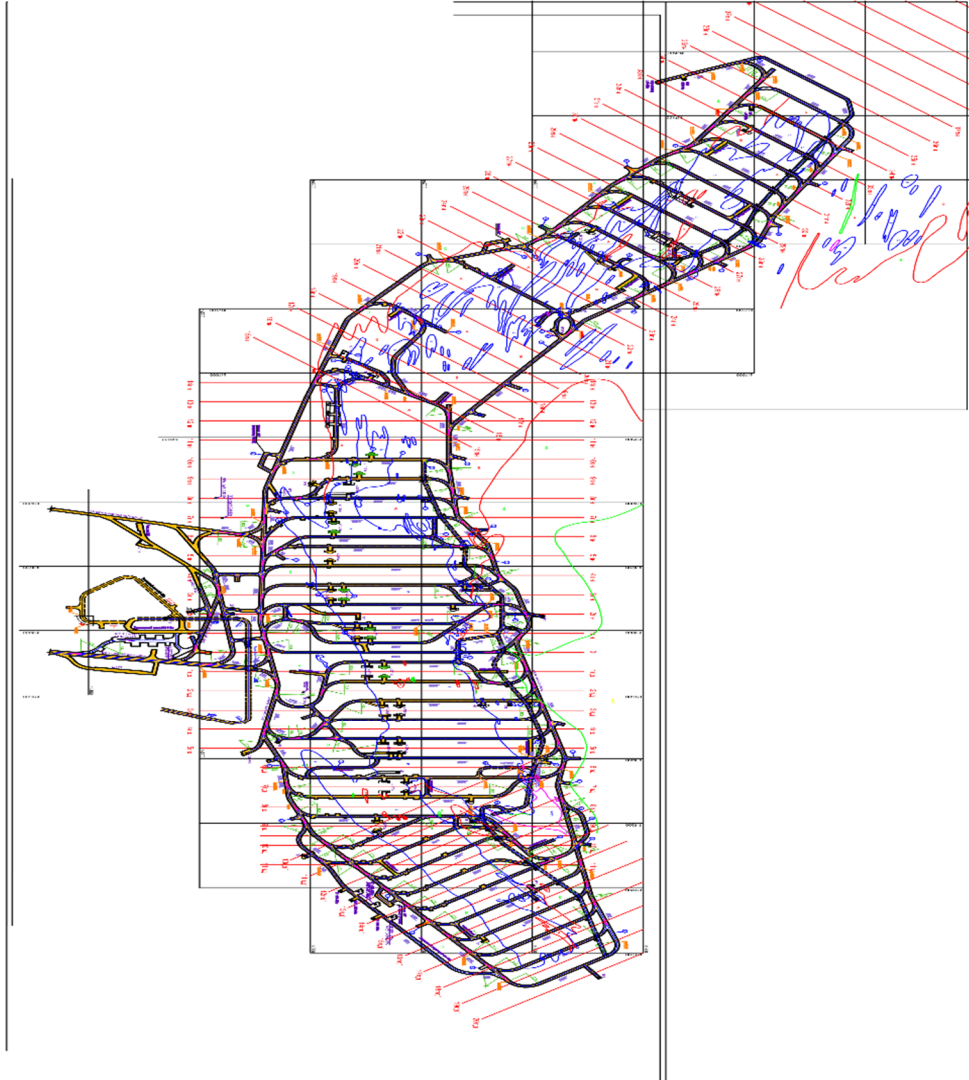


Рис. 1. План горизонту шахти

Розроблена математична модель електромагнітного поля у замкнутому просторі на прикладі існуючих штреків шахти дозволяє виявити фактори, що впливають на формування електромагнітного поля, і проаналізувати їх.

Дослідження розповсюдження радіохвиль та формування теорії розповсюдження радіохвиль у великих замкнутих просторах. Проблема формування електромагнітного поля в замкнутому просторі стала актуальною, коли розвиток технологій [1, 2] досяг рівня, який дозволив



Рис. 2. Приклади поверхні в штреках шахти: *а* — шорстка поверхня, штрек має довільний профіль поперечного січення; *б* — гладка поверхня, штрек має прямокутний профіль поперечного січення

широке застосування радіоприладів у великому замкнутому просторі, зокрема у шахтах.

Розповсюдження радіохвиль над землею та чинники формування електромагнітного поля і хвильові процеси у вільному просторі досить добре вивчені і мають велике теоретичне та практичне підґрунтя [3—15], але поглибленого аналізу процесів формування цих явищ у великому замкнутому просторі 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 [14—16], але не з розповсюдженням радіохвиль в штреках шахт.

Найвідоміше дослідження розповсюдження радіохвиль в шахті було проведено у 1975 році [17]. Пізніше було проведено ще ряд досліджень [18—23]. Сучасні погляди на процес формування радіоканалу та його особливості викладено у роботах [24—28].

У роботах [17, 19—23] 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 шахтних штреків при віддзеркалюванні радіопроменя. Процеси віддзеркалювання розглядають як процеси розповсюдження радіохвиль у шаруватих структурах.

У роботі [17] 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. Контроль радіопокриття шахтних штреків проведено за допомогою портативних радіостанцій на частоті 415 МГц, тому що на той час радіостанції більш високого частотного діапазону не були доступні для загального користування.

В роботі [18] розглянуто процес формування електромагнітного поля у великому замкнутому просторі на прикладі будівель. Зроблено висновок, що результуюче електромагнітне поле у замкнутому просторі є наслідком дифракції, а саме проходженням радіохвиль скрізь перешкоди.

У роботах [20—23] 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 радіопромєня як наслідок шаруватої структури стінок тунелів шахти. Розповсюдження радіопромєня за рїг розглядається як розповсюдження електромагнітної енергії у прямокутному хвилеводі, тобто як перехрестя цих хвилеводів.

У роботах [17—23] 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 замкнутих просторах. Практичні проекти виконувались фахівцями Huawei та Ericsson на засадах розповсюдження радіохвиль у вільному просторі.

Дослідження розповсюдження радіохвиль у замкнутому просторі були проведені на різноманітних об'єктах — великій громадській будівлі, промисловому цеху, залізорудній та соляній шахтах. Особливістю цих досліджень є те, що вони проводились на діючих підприємствах. Тому було необхідно дотримуватись жорстких правил обмеження переміщень по території, обмежень в часі і використанні обладнання.

Найбільш повноцінні дослідження було проведено на соляній шахті. Схему цього дослідження наведено на рис. 3. Довжина відкатного штреку соляної шахти 670 м. Він має прямокутну форму шириною 9 м, висотою 4 м і уклїн з перепадом висот близько трьох метрів. Стіни штреку, складені із солі, мають дуже гладку і щільну структуру. До цього штреку приєднано іще два штреки, які утворюють Т-подібне перехрестя.

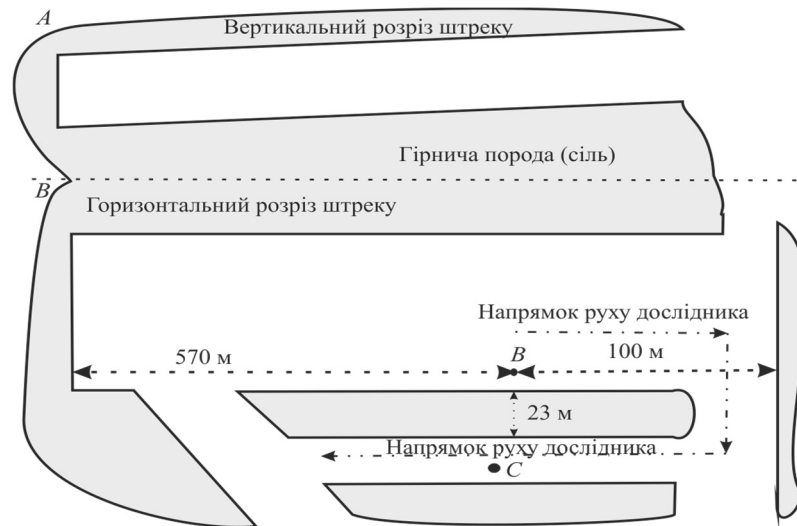


Рис. 3. Схема дослідження на соляній шахті

Паралельно основному штреку йде допоміжний, який має висоту 3 м і ширину 3 м.

Дослідження проводилися з використанням базової станції LTE (робоча частота 2350 МГц, вихідна потужність 20 дБм (100 мВт)), двох смартфонів Samsung S8, двох модулів LoRa (робоча частота 868 МГц, вихідна потужність 20 дБм), широкосмугового генератора SignalHound VSG25A (частотна смуга 100—2500 МГц, вихідна потужність 10 дБм (10 мВт)). Для контролю рівня радіосигналу використовували спектроаналізатор SignalHound USB-SA44B, виміри проводили на частотах 900 МГц, 1800 МГц, 2400 МГц. Передаючою антеною була широкосмугова всенаправлена антена, прийом здійснювався на широкосмугову направлену антену HyperLOG7060 виробництва компанії Aaronia.

Для загального контролю якості голосового радіозв'язку використовували цифрові радіостанції Motorola на частоті 415 МГц (вихідна потужність 1 Вт) та радіостанції протоколу Zigbee виробництва компанії Data Express, призначені для використання в умовах шахти (робоча частота 900 МГц, вихідна потужність 100 мВт). Оцінка електромагнітного поля здійснювалася за якістю прийому та передачі голосової інформації, швидкості передачі інформаційних пакетів (станція LTE), передачі та прийому текстової інформації (модулі LoRa), за рівнем прийнятого простого радіосигналу від генератора SignalHound VSG25A за допомогою спектроаналізатора. Для оцінки рівня сигналів LTE та LoRa використовували показники терміналів прийому цих систем.

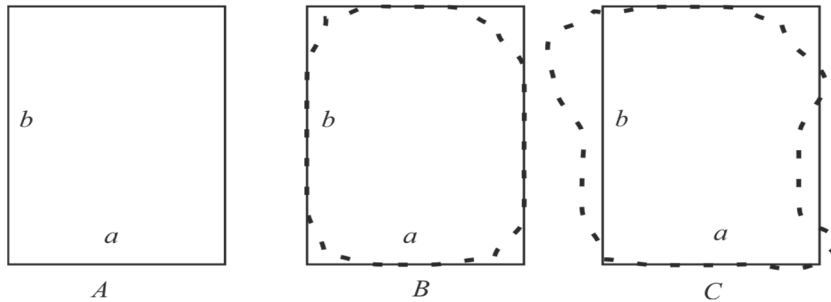


Рис. 4. Профілі прямокутних хвильоводів *A*, *B*, *C*: --- ймовірні профілі шахтного штреку відносно прямокутних хвильоводів

Загальні результати досліджень в цілому співпадають з висновками робіт [18—23]. Розбіжність виникає в оцінці чинників, які формують загальне електромагнітне поле в штреках шахти. Обґрунтуємо це на прикладі проведеного дослідження (див. рис. 3). Точка *B* — місце знаходження приймача LoRa. Дослідник з передавачем LoRa рухається за годинною стрілкою. Спочатку сигнал очікувано слабшав, за рогом якість прийому впала до критичного рівня. Під час пересування дослідника допоміжним штреком у напрямку точки *B* рівень сигналу почав збільшуватись. Через деяку відстань сигнал почав згасати і на рівні точки *B* зник — точка *C*. Між дослідником, який перебував у точці *BC*, та дослідником з передавачем LoRa підтримувався голосовий зв'язок за допомогою портативної радіостанції. Сигнал від радіостанції пропав трохи раніше, ніж сигнал від передавача LoRa.

На іншій ділянці шахти, структура якої подібна до місця, зображеного на рис. 3, було проведено подібне дослідження з використанням тільки портативних радіостанцій Motorola і Zigbee. При цьому поліпшення якості сигналу не відбулось, сигнал згас [18—23]. Далі розглянемо це фізичне явище.

Чинники, що впливають на формування електромагнітного поля у замкнутому просторі за результатами проведених досліджень. У роботах [19—23] процес формування електромагнітного поля в шахті порівнюють з процесами у прямокутному хвильоводі. На рис. 4 зображено профілі прямокутних хвильоводів *A*, *B*, *C* та ймовірні профілі шахтних штреків відносно профілів прямокутних *B*, *C*.

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

$$\operatorname{rot} H = \sigma E + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t},$$

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

де ε і ε_0 — діелектрична проникність і діелектрична проникність вакууму; μ і μ_0 — магнітна проникність і 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. Отже, умовою існування електромагнітної хвилі у хвилеводі є кратність (кр) сторони a чи b половині довжини радіохвилі будь-якого типу [9].

Аналізуючи можливі профілі штреків у шахті (див. рис. 4), можна помітити, що в них дуже важко виконати умови розповсюдження радіохвиль. У [19—23] при аналізі електромагнітного поля розглянуто переважно прямокутні залізобетонні штреки, а також описано умови, можливі при розгляді гірничих виробіток прямокутної форми, наприклад у соляних шахтах. Створення електромагнітного поля в інших умовах та при інших типах профілів штреків потребує додаткового аналізу.

Визначення чинників, що впливають на формування електромагнітного поля у замкнутих просторах, почнемо з аналізу радіоканалу. Радіоканал — це пряма лінія що з'єднує радіопередавач і радіоприймач. Навколо цієї лінії утворюється еліпс, який формують зони Френеля A і C [6—10] (рис. 5). Значення зон Френеля полягає в тому, що в них концентрується енергія передачі радіосигналу. Найбільш значущими є перші три зони, де концентрується 80% енергії передачі. Зазвичай розглядають першу зону Френеля. Вважається, якщо якась перешкода закриває до 60% першої зони Френеля, якість радіоканалу задовільна (див. рис. 5, перешкода B). Якщо перешкода закриває 80% і більше першої зони Френеля, якість радіоканалу дорівнює нулю (див. рис. 5, перешкода E).

Розгляд формування зон Френеля дозволяє зрозуміти, чому в умовах замкнутих просторів краще розповсюджуються радіохвилі меншої довжини [19—23]. Ширина еліпса, сформованого зонами Френеля, пов'язана зі значенням довжини радіохвилі, а саме чим менше довжина радіохвилі, тим менше ширина зон Френеля:

$$r = 17,32 \sqrt{\frac{d}{4f}},$$

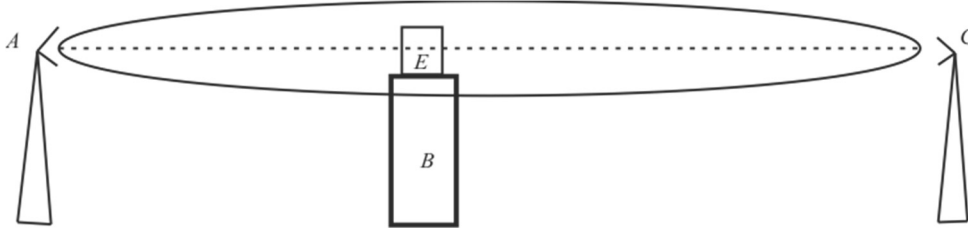


Рис. 5. Схема радіоканалу і зони Френеля A, C ; B, E — перешкоди

де r — радіус зони Френеля; d — відстань між радіопередавачем і радіоприймачем; f — частота сигналу. Довжина радіохвилі $\lambda = c/f$, де c — швидкість світла.

У роботі [28] наведено радіус зон Френеля відносно частоти (довжини хвилі) радіосигналу при відстані між точками передачі та прийому 305 м:

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

Дослідження проводилось з метою оцінки розповсюдження радіосигналу в тунелі шириною 6 м, висотою 4,8 м. Радіоприймач було встановлено на відстані 305 м від входу до тунелю. На частоті 1000 МГц було зафіксовано послаблення сигналу 4 дБ. Ширина зони Френеля 9,56 м, тобто перекриття зони було не більше 60% в точці надходження радіосигналу. При цьому в тунелі в точці дослідження зафіксовано послаблення електромагнітного поля від чинника, не вказаного у роботах [19—23].

Як показано у [19—23, 28], кращі умови розповсюдження у замкнутих просторах, зокрема у шахтах, мають радіохвилі великих частот (сотні мегагерц, одиниці гігагерц) на відміну від частот менших діапазонів. Треба розрізнити поняття «умови розповсюдження під землею у замкнутому просторі», тобто шахті, і «умови розповсюдження під землею», тобто розуміючи геологічну породу, воду (світовий океан) та процеси, що виникають на кордоні земля—атмосфера [3, 6, 7, 10, 12, 14, 15]. У цих випадках краще розповсюджуються наддовгі радіохвилі.

Необхідно також відрізнити хвилевод, описаний у роботі [9], тобто пристрій для розповсюдження радіохвиль з заданими геометричними параметрами, від хвилеводів як явищ, утворюваних природними умовами (віддзеркалювання від іоносфери, геологічний прошарок породи), що сприяють розповсюдженню радіохвиль на більшій, ніж зазвичай, відстані [7, 12, 14, 15]. Вочевидь, при збільшенні частоти радіосигналу, довжина хвилі відповідає розмірам перешкод всередині замкнутих поверхонь (штреків шахти). Тому для аналізу чинників, що впливають на створення

електромагнітного поля в замкнутих просторах та розповсюдження радіохвиль в них, є доцільним враховувати теоретичні положення [3—7, 12—15] та використовувати закони класичної оптики [11].

Визначимо умови розповсюдження радіохвиль, використовуючи рис. 1 і 2. В замкнутому просторі можливі наступні умови та типи поверхонь, що впливають на формування та розповсюдження електромагнітних хвиль:

- Розповсюдження у вільному просторі [3, 4, 6, 14].
- Розповсюдження в умовах, наближених до прямокутного хвилеводу [3, 9].
- Розповсюдження з огинанням перешкод—дифракція [6, 12, 14].
- Гладкі поверхні, що створюють умови віддзеркалювання радіопромінів [6, 14].
- Перешкоди, що сприяють багатопроменевому розповсюдженню радіохвиль [7, 14].
- Розповсюдження в шаруватих структурах та крайових умовах [3, 5, 6, 14].
- Відтворення електромагнітного поля на краях отвору та на півплощині [12, 14].
- Розповсюдження радіохвиль над нерівною поверхнею, підсилення за перешкодою [7, 14].

На рис. 6 схематично наведено варіанти розповсюдження електромагнітних хвиль у замкнутому просторі від точки A і формування результуючого поля у точці прийому C , а саме багатопроменеве розповсюдження, віддзеркалювання, дифракція. З урахуванням потужності джерела первинного електромагнітного поля, вищезначених умов розповсюдження та діелектричних параметрів середовища розповсюдження математична модель результуючого електромагнітного поля у заданій точці замкнутого простору має вигляд

$$\Pi_{\text{рез}} = N (\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \dots + \Pi_j),$$

де Π_j — елемент електромагнітного поля, який створюється одним із чинників j утворення вторинного поля у заданій точці простору, $j = 1, 2, \dots$; N — коефіцієнт, що враховує діелектричну проникність середовища. У загальному вигляді запишемо

$$\Pi_{\text{рез}} = N \left(\sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^v K_j \Pi_{\text{дж}} \right), \quad (1)$$

де $\Pi_{\text{дж}}$ — електромагнітне поле, яке утворює джерело випромінювання; v — кількість складових даного чинника; w — загальна кількість всіх чинників,

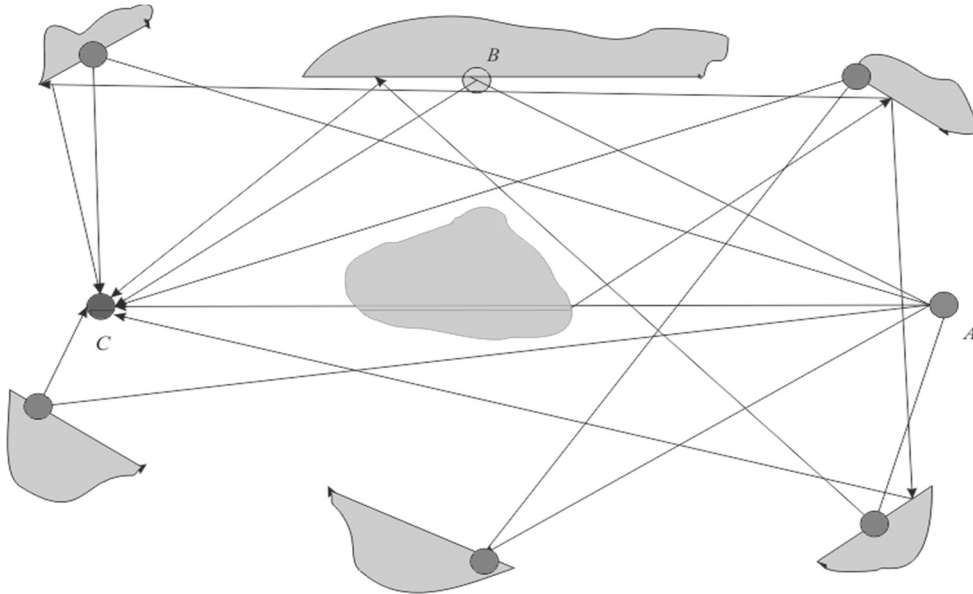


Рис. 6. Схема розповсюдження електромагнітних хвиль у замкнутому просторі

що впливають на утворення електромагнітного поля у даній точці; K_j — ваговий коефіцієнт, що характеризує внесок кожної складової у підсумкове поле, $\sum K_j = 1$, $0 \leq K_i \leq 1$. При $K_j = 0$ електромагнітне поле в заданій точці замкнутого простору відсутнє, при $K_j = 1$ електромагнітне поле в заданій точці замкнутого простору відтворюється від одного джерела.

Враховуючи можливість формування великої кількості складових у кожному із чинників, наприклад велика кількість віддзеркалюваних променів, або різноманіття шаруватих структур, необхідно зробити деякі допущення, що спрощують обчислення, але не суттєво впливають на кінцевий результат. Так, поверхню стінок в замкнутих просторах (штреках) будемо вважати гладкою при виконанні умови

$$L < \frac{\lambda}{16 \sin \beta}, \quad (2)$$

де L — висота нерівності; β — кут ковзання радіопроменя. Якщо стан всієї поверхні замкнутого простору відповідає (2) (штрек соляної шахти або бетонний тунель) і має прямокутний профіль, умови створення електромагнітного поля можна вважати подібними до прямокутного хвилеводу. В інших випадках слід враховувати складові, що мають найбільший ваговий коефіцієнт K_j . Наприклад, при утворенні поля від декількох півплощин необхідно брати до уваги тільки найбільше абсолютне значення.

Таким чином, (1) спрощується до наступного вигляду

$$\Pi_{\text{рез}} = N \sum_{i=1}^w K_{\text{max}_i} \Pi_{\text{дж}}. \quad (3)$$

Слід зауважити, що кількість складових залежить від чутливості радіоприймального обладнання, тобто чим нижче чутливість радіоприймача, тим більше складових треба враховувати.

Структура електромагнітного поля в замкнутих просторах є френелівською [3—6, 10, 12, 14], тобто у шахті вздовж тунелю електромагнітне поле має максимуми і мінімуми. При розрахунку фізичних значень параметрів електромагнітного поля у заданій точці замкнутого простору коефіцієнт K в (3) характеризує частку енергії складової електромагнітного поля Π_i відносно енергії електромагнітного поля первісного джерела: $K_i = \Pi_i / \Pi_{\text{дж}}$. Водночас, значення Π_i залежить від таких чинників, як втрати енергії електромагнітного поля при розповсюдженні у вільному просторі, втрати при віддзеркалюванні, втрати від розсіювання, значення фази тощо [1—15, 17—28]. При визначенні фізичних параметрів електромагнітного поля в заданій точці замкнутого простору, з врахуванням фази всіх складових поля, (3) набуває вигляду

$$|\Pi_{\text{рез}}| = N \sum_{i=1}^w K_i \Pi_{\text{дж}}.$$

Враховуючи всі чинники, які впливають на формування і розповсюдження електромагнітного поля у замкнутому просторі, бачимо, що у соляній шахті на початку штреку, паралельного основному (див. рис. 3), склалися умови, відповідні вимогам підсилювання за перешкодою [14]. Отже, ця точка простору стала також і ретранслятором радіохвилі. Надалі при переміщенні дослідника затухання радіохвилі відбувалося згідно умов розповсюдження в цьому середовищі.

Таким чином, проведені дослідження доводять ефективність запропонованої моделі формування і розповсюдження електромагнітного поля у замкнутому просторі на відміну від моделей, наведених у [18—23], які не дають відповіді на природу виникнення явища підсилювання радіосигналу.

Висновки

Запропонована модель формування і розповсюдження електромагнітного поля у замкнутому просторі спрощує оцінку факторів, що впливають на розповсюдження електромагнітних хвиль на промислових та інших об'єктах. Ця модель забезпечує розуміння процесів формування електромагнітного поля у замкнутому просторі та його структуру в середині цього простору. Використання запропонованої моделі має практичне

значення, тому що дозволяє робити точне радіопланування на промислових підприємствах. Це буде сприяти значному скороченню строків пуско-налагоджувальної роботи при впровадженні нових радіосистем зв'язку і зниженню загальної вартості радіосистем в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Гепко І.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В.* Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. Киев: Изд. дом “Экмо”, 2009, 672 с.
2. *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширение спектра. М.: Радио и связь, 2000, 520 с.
3. *Баскаков С.И.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1992, 416 с.
4. *Бредов М.М., Румянцева В.В., Топтыгин И.Н.* Классическая электродинамика. М.: Наука, 1986, 400 с.
5. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. Изд. второе. М.: Наука, 1973, 343 с.
6. *Голдштейн Л.Д., Зернов Н.В.* Электромагнитные поля и волны. Изд. второе. М.: Сов. радио, 1971, 664 с.
7. *Грудинска Г.П.* Распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1975, 280 с.
8. *Кубанов В.П.* Влияние окружающей среды на распространение радиоволн. Учеб. пособие. Самара: ПГУТИ, 2013, 92 с.
9. *Лебедев И.В.* Техника и приборы СВЧ. Т.1. М.: Высшая школа, 1970, 440 с.
10. *Рабинович М.И., Трубецков Д.И.* Введение в теорию колебаний и волн. Изд. второе. М.: Наука, 1992, 564 с.
11. *Рид М., Саймон Б.* Методы современной математической физики. Т.3. Теория рассеивания. М.: Мир, 1982, 441 с.
12. *Никольский В.В., Никольская Т.И.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989, 544 с.
13. *Тихонов В.И., Бакаев Ю.Н.* Статистическая теория радиотехнических устройств. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1978, 420 с.
14. *Фейнберг Е.Л.* Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. Изд. второе. М.: Наука Физматлит, 1999, 496 с.
15. *Черный Ф.Б.* Распространение радиоволн. Изд. второе. М.: Сов. радио, 1972, 464 с.
16. *Рязанцев А.М.* Экспериментальные исследования распространения электромагнитных волн сверхнизких частот в земной коре и волноводе «земля-ионосфера», выполненных институтом радиотехники и электроники им В.А. Котельникова РАН // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал, 2017, № 12.
17. *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, No. 2, pp.192—205.
18. *Авдеев В.Б., Авдеева Д.В., Катруша А.Н., Макаров Г.В.* Экспериментальные исследования особенностей распространения СВЧ—СВЧ радиоволн внутри здания // Изв. вузов. Радиоэлектроника, 2004, 47, № 3–4 [ч. 1], с. 70—76.
19. *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, pp.75—105.
20. *Chenming Zhou, Joseph Waynert, Timothy Plass, Ronald Jacksha.* Modeling RF Propagation in Tunnels // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-SURSI) Conf., 2013. Orlando, FL, pp.1916, 1917

21. Jacksha R., Zhou C. Measurement of RF propagation around corners in underground mines and tunnels // Trans Soc Min Metall Explor Inc, 2016, 340(1), pp. 30—37.
22. Mathieu Boutin, Ahmed Benzakour, Charles L. Despins Radio Wave Characterization and Modeling in Underground Mine Tunnels // IEEE Transactions on antennas and propagation, 2008, Vol. 56, No. 2.
23. Timothy Plass, Ronald Jacksha, Joseph Waynert, Chenming Zhou. Measurement of RF Propagation in Tunnels // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). Conf. 2013, Orlando, FL, pp.1604,1605.
24. Рекомендация МСЭ-R P.526-9. Распространение радиоволн за счет дифракции. Ассамблея радиосвязи МСЭ, (1978-1982-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2005) // https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-9-200508-S!!PDF-R.pdf.
25. Рекомендация МСЭ-R P.530-15. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости. Серия Р. Распространение радиоволн. © ITU (09/2013), 53с. // https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-15-201309-S!!PDF-R.pdf
26. HANDBOOK Terrestrial land mobile radiowave propagation in the VHF/UHF bands. © ITU 2002 // <http://www.itu.int/pub/R-HDB-44/ru>
27. Jian Lee. Advanced Electrical and Electronics Engineering. Vol. 2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 723 p.
28. William C.Y.L. Mobile Communications Design Fundamentals. Second Edition. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & SONS, INC., 1993, 369 p.

Отримано 20.05.20

REFERENCES

1. Gepko, I.A., Oleynik, V.F. and Chayka, YU.D., Bondarenko A.V. (2009), *Sovremennyye besprovodnyye seti: sostoyaniye i perspektivy razvitiya* [Modern wireless networks: status and development prospects], Izd. dom “Ekmo”, Kiev, Ukraine.
2. Feyer, K. (2000), *Besprovodnaya tsifrovaya svyaz'. Metody modulyatsii i rasshireniye spektra* [Wireless digital communication. Modulation methods and spectrum spreading], Radio i svyaz', Moscow, Russia.
3. Baskakov, S.I. (1992), *Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln* [Electrodynamics and radio wave propagation], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
4. Bredov, M.M., Rumyantseva, V.V. and Toptygin, I.N. (1986), *Klassicheskaya elektrodinamika* [Classical electrodynamics], Nauka, Moscow, Russia.
5. Brekhovskikh, L.M. (1973), *Volny v sloistykh sredakh. Izd. vtoroye* [Waves in layered media. Ed. second], Nauka, Moscow, USSR.
6. Goldshteyn, L.D. and Zernov, N.V. (1971), *Elektromagnitnyye polya i volny. Izd. vtoroye* [Electromagnetic fields and waves. Ed. second], Sov. radio, Moscow, USSR.
7. Hrudynska, H.P. (1975), *Rasprostraneniye radiovoln* [Radio wave propagation], Vysshaya shkola, Moscow, USSR.
8. Kubanov, V.P. (2013), *Vliyaniye okruzhayushchey sredy na rasprostraneniye radiovoln. Ucheb. posobiye* [The influence of the environment on the propagation of radio waves. Textbook allowance], PSUTI, Samara, Russia.
9. Lebedev, I.V. (1970), *Tekhnika i pribory SVCH. T.1* [Microwave equipment and devices. T.1], Vysshaya shkola, Moscow, USSR.
10. Rabinovich, M.I. and Trubetskov, D.I. (1992), *Vvedeniye v teoriyu kolebaniy i voln. Izd. vtoroye* [Introduction to the theory of oscillations and waves. Ed. second], Nauka, Russia.
11. Rid, M. and Saymon, B. (1982), *Metody sovremennoy matematicheskoy fiziki. T.3. Teoriya rasseyvaniya* [Methods of modern mathematical physics. T.3. Scattering theory], Mir, USSR.

12. Nikol'skiy, V.V. and Nikol'skaya, T.I. (1989), *Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln* [Electrodynamics and radio wave propagation], Nauka, USSR.
13. Tikhonov, V.I. and Bakayev, YU.N. (1978), *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh ustroystv* [Statistical Theory of Radio Engineering Devices], VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo, Moscow, USSR.
14. Feynberg, Ye.L. (1999), *Rasprostraneniye radiovoln vdol' zemnoy poverkhnosti. Izd. vtoroye* [Propagation of radio waves along the earth's surface. Ed. second], Nauka Fizmatlit, Moscow, Russia.
15. Chernyy, F.B. (1972), *Rasprostraneniye radiovoln. Izd. vtoroye* [Propagation of radio waves. Ed. second], Sov. radio, Moscow, USSR.
16. Ryazantsev, A.M. (2017), "Experimental studies of the propagation of electromagnetic waves of ultra-low frequencies in the earth's crust and the earth-ionosphere waveguide, performed by the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V.A. Kotelnikov RAS", *Zhurnal radioelektroniki: elektronnyy zhurnal*, no. 12.
17. Alfred, G.E, Robert, L.L. and Peter, F. (1975), "Strong Theory of the Propagation of UHF Radio Waves in Coal Mine Tunnels", *IEEE transactions on antennas and propagation*, Vol. AP-23, no. 2, pp.192-205.
18. Avdeyev, V.B., Avdeyeva, D.V., Katrusha, A.N. and Makarov, G.V. (2004), Vol. 47, no. 3-4, pp. 70-76.
19. Zhou, C., Waynert, J., Plass, T. and Jacksha, R. (2013), "Attenuation constants of radio waves in lossy-walled rectangular waveguides", *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 142, pp. 75-105.
20. Zhou, C., Waynert, J., Plass, T. and Jacksha, R. (2013), "Modeling RF Propagation in Tunnels", *Conference Proceeding of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2013, Orlando, FL, pp. 1916-1917.
21. Jacksha, R. and Zhou, C. (2016), "Measurement of RF propagation around corners in underground mines and tunnels", *Trans Soc Min Metall Explor Inc*, Vol. 340, no. 1, pp. 30-37.
22. Boutin, M., Benzakour, A. and Charles, L. (2008), "Despins Radio Wave Characterization and Modeling in Underground Mine Tunnels", *IEEE Transactions on antennas and propagation*, Vol. 56, no. 2.
23. Plass, T., Jacksha, R., Waynert, J. and Zhou, C. (2013), "Measurement of RF Propagation in Tunnels", *Conference Proceeding of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2013, Orlando, FL, pp. 1604-1605.
24. (2005), "Propagation of radio waves due to diffraction. ITU Radiocommunication Assembly", MCЭ-R P.526-9, available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-9-200508-S!!PDF-R.pdf (accessed July 13, 2020).
25. (2013), "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line of sight systems. Series P. Propagation of radio waves. © ITU", available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-15-201309-S!!PDF-R.pdf (accessed July 13, 2020).
26. (2002), "HANDBOOK Terrestrial land mobile radiowave propagation in the VHF/UHF bands. © ITU", available at: <http://www.itu.int/pub/R-HDB-44/ru> (accessed July 13, 2020).
27. Jian, L. (2011), "Advanced Electrical and Electronics Engineering", *Springer-Verlag*, Vol. 2.
28. William, C.Y.L. (1993), "Mobile Communications Design Fundamentals. Second Edition", *John Wiley & SONS*.

Received 20.05.20

А.Л. Березкин

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
В УСЛОВИЯХ ЗАМКНУТОГО ПРОСТРАНСТВА

Рассмотрены на примере шахты факторы и условия, влияющие на формирование электромагнитного поля и распространение электромагнитных волн в замкнутых пространствах. Проанализированы известные публикации и установлены принципы оценки влияния данных факторов для классических моделей распространения электромагнитных волн на формирование электромагнитного поля в заданной точке замкнутого пространства. Определен зональный френелевский тип распределения электромагнитного поля на примере штореков шахты. Предложена математическая модель формирования электромагнитного поля в заданной точке которая позволяет ускорить создание модели, но не приводит к существенному снижению точности результатов. Доказана эффективность разработанной модели при внедрении новых систем радиосвязи на крупных промышленных объектах.

К л ю ч е в ы е с л о в а: распространение радиоволн, многолучевое распространение, математическая модель, дифракция, интерференция.

A.L. Berezkin

MODEL OF ELECTROMAGNETIC FIELD
FORMATION IN CLOSED SPACE CONDITIONS, ANALYSIS
OF FACTORS INFLUENCING ITS FORMATION

On the example of mine drifts the factors and conditions influencing formation of an electromagnetic field and propagation of electromagnetic waves in closed spaces are considered. The analysis of known publications of researches on this subject is carried out. The principles of estimating the influence of these factors from the point of view of classical models of electromagnetic wave propagation on the formation of the electromagnetic field at a given point of closed space are proposed. On the basis of which the mathematical model of formation of an electromagnetic field at the set point is offered. The zonal Fresnel type of electromagnetic field distribution is determined on the example of mine drifts. Methods for simplifying the construction of a mathematical model of the electromagnetic field are proposed, which reduces 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 introduction of new radio communication systems at large industrial facilities is proved.

K e y w o r d s: radio wave propagation, multipath propagation, mathematical model, diffraction, interference, radio wave propagation.

БЕРЕЗКІН Андрій Леонідович, аспірант Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. В 1988 році закінчив Київське вище інженерне радіотехнічне училище ППО. Область наукових досліджень – моделі розповсюдження радіохвиль у замкнутих просторах.