

УДК 623.454.38

М. В. Кустов, д.т.н., доцент, нач. наук. відділу (ORCID 0000-0002-6960-6399)

О. В. Кулаков, к.т.н., доцент, с.н.с. наук. відділу (ORCID 0000-0001-5236-1949)

А. А. Карпов, ад'юнкт (ORCID 0009-0007-9895-1574)

О. Є. Басманов, д.т.н., професор, головн. н. с. наук. відділу (ORCID 0000-0002-6434-6575)

Ю. В. Михайловська, PhD, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0003-1090-5033)

Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна

МОДЕЛЬ ДИФРАКЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ НА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТАХ

Запропоновано модель дифракції електромагнітних хвиль на вибухонебезпечному предметі без металевих конструкційних елементів. Проаналізовані властивості речовин найбільш розповсюджених протипіхотних мін та встановлено, що їх оболонка є діелектричною, а безпосередньо вибухові речовини поділяються на дві групи в залежності від їх дипольного моменту. Зокрема вибухові речовини гексоген, пентаеритриттетранітрат та фульмінатом ртуті є речовинами з нульовим дипольним моментом й за електромагнітними властивостями відносяться до ідеальних діелектриків. Вибухові речовини тринітротолуол, тетрил, тринітрорезорцинату свинцю та азид свинцю слід розглядати як діелектрики з малими втратами. Побудовано електродинамічну модель для розрахунку коефіцієнту відбивання та коефіцієнту проходження електромагнітних плоских хвиль надвисокочастотного діапазону крізь багат шарову структуру вибухонебезпечного предмету. Для визначення еквівалентного хвильового опору багат шарової структури вибухонебезпечного предмету запропоновано використання теорії довгих ліній. Встановлено, що для випромінювання надвисокочастотного діапазону шарами корпусу вибухонебезпечних предметів із діелектричних речовин можна нехтувати внаслідок їх малої товщини. За результатами проведених розрахунків встановлено ступінь ослаблення енергії електромагнітних хвиль у товщі вибухової речовини та показано, що більшість протипіхотних мін має низький коефіцієнт відбивання, що ускладнює їх виявлення. Однак, при цьому збільшується кількість енергії, що проходить у глибину вибухової речовини. Показано, що вибухонебезпечні предмети із дипольними вибуховими речовинами здатні до поглинання енергії електромагнітного випромінювання. Отримані результати дозволяють якісно оцінити схильність вибухових речовин до їх дистанційного знешкодження внаслідок опромінення електромагнітним випромінюванням надвисокочастотного діапазону.

Ключові слова: рівень цивільного захисту територій, вибухонебезпечні речовини, електромагнітні хвилі, відбивання, поглинання, дифракція

1. Вступ

Нові виклики для України, що пов'язані із активними військовими діями на її території в тому числі, обумовлені забрудненням значної території держави вибухонебезпечними предметами (ВНП). Ситуація суттєво ускладнюється тим, що розміщення мін на території мінування не відомо внаслідок того, що активним мінуванням займались не лише Збройні Сили України (ЗСУ), але й військові підрозділи ворога. Особливу небезпеку представляє те, що при цьому використовувались ВНП з різними конструкційними особливостями, включаючи саморобні. Це призведе до неможливості повернення евакуйованого населення до своїх домівок на визволених територіях, неможливості відновлення роботи промислового та сільськогосподарського комплексів. Тому на сьогодні першочерговою задачею оперативно-рятувальних сил цивільного захисту ДСНС є якнайшвидше очищення місцевості від ВНП. Для розв'язання цієї задачі піротехнічні підрозділи ДСНС використовують різні методи виявлення та деактивації ВНП. Однак, незважаючи на активну та професійну роботу піротехнічних підрозділів та наявність у них новітніх зразків техніки та приладів для розмінування, спостерігаються випадки неконтрольованого підриву ВНП. Внаслідок цього є випадки за-

гибелі та травмування працівників ДСНС та пересічних громадян. Це, перш за все, пов'язано з тим, що широкого розповсюдження набули ВНП із мінімальним вмістом металевих компонентів або взагалі без них. Тому існуючі методи виявлення та деактивації ВНП показали свою недостатню ефективність.

Таким чином, існуюча проблема полягає у складності виявлення піротехнічними підрозділами ВНП без металевих конструкційних елементів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Процес розмінування територій в небойових умовах складається з двох етапів – виявлення ВНП та його деактивація. Кожен з цих етапів передбачає низку різноманітних способів та методик реалізації. Що стосується технічних засобів виявлення ВНП, слід зазначити, що інженерні війська ЗСУ і піротехнічні підрозділи ДСНС оснащені магнітними шукачами МБИ-1, МБИ-2, ИНМ (ПР-506); бомбошукачами ИМБ; міношукачами переносними ИМП, ИМП-2 (ПР507), МИВ (для водолазів-розвідників), РВМ «ВЕРЕСК», РВМ-2, РВМ-2М (ПР-504А), ММП «ЦИКЛОП» для пошуку протитанкових і протипіхотних мін [1]. В інших державах світу магнітний метод також набув широкого розповсюдження за рахунок своєї простоти реалізації [2]. Однак, магнітний метод пошуку ВНП має суттєві обмеження по конструкційним особливостям самих ВНП та їх місць розміщення. Тому паралельно розвиваються й інші методи виявлення ВНП. Всі методи виявлення вибухонебезпечних речовин та ВНП можна поділити на чотири групи: фізичні, фізико-хімічні, хімічні, органолептичні.

До фізичної групи належать такі як дрейф-спектрометричний метод. Він полягає в тому, що іонізовані молекули вибухових речовин попадають в дрейф-камеру, під дією електричного поля переміщуються до колектора. Потрапляючи до нього, вони створюють імпульс струму в електричному колі, що підсилюється й обробляється електронним блоком. Час дрейфу до колектора залежить від рухливості іонів і параметрів електричного поля, що і покладено в основу ідентифікації аналізованої речовини [3]. Однак цей метод не є ефективним для ВНП із герметичною оболонкою.

Ядерні методи виявлення вибухових речовин використовують ядерні реакції для виявлення вибухових речовин, прихованих, наприклад, у багажі чи вантажі. Досліджені ядерні методи виявлення вибухових речовин, у яких нейтрони або в деяких випадках рентгенівські промені високої енергії (MeV) використовуються для опромінення [4]. Такі методи включають аналіз на теплових нейтронах, спектроскопію, інтроскопію пропускання імпульсних швидких нейтронів, асоційоване зображення частинок і ядерну резонансну флуоресценцію [5]. Основним недоліком таких методів є необхідність використання коштовного та великого за масогабаритними параметрами обладнання, що суттєво знижує область їх застосування.

Індукційний метод полягає на індукційному балансі – кілька котушок індуктивності, одна передавальна і одна або дві прийомні, що утворюють індуктивний датчик. Всі котушки розміщені в просторі таким чином, щоб сигнал з передавальної котушки при відсутності поблизу металевих предметів не наводився на приймальні, тобто вся система була збалансована і сигнал на виході був би рівний нулю.

До фізико-хімічних методів відносять газо-хроматографічний метод, який ґрунтується на виявленні часток вибухової речовини за рахунок розподілу її компонентів на межі фаз високочистих газів-носіїв та чутливому сорбенті. Рідинно-хроматографічний метод ґрунтується на виявленні часток вибухової речовини за

рахунок його властивостей розчинятися в рідинах-носіях та утримуватися певний час на сорбенті [6]. Як і у випадку спектрометричного методу він є неефективним для ВВП у герметичній оболонці, коли вилучається можливість потрапляння часток самої вибухової речовини у навколишнє середовище. Потенціометричний метод ґрунтується на зміні електричного опору речовини під дією електричного струму [7], поляриметричний метод – під дією світлового потоку кожна речовина має свій спектр [8]. Обидва методи передбачають безпосередній контакт детектора із поверхнею пошуку, що є небезпечним для випадків практичного застосування піротехнічними підрозділами.

До хімічних методів належить метод крапельної реакції (крапельні тести), який ґрунтується на зміні кольору слідів вибухової речовини під дією певного хімічного реагенту. Метод тонкошарової хроматографії ґрунтується на властивостях вибухової речовини в певних умовах (насичена пароповітряна суміш розчинників) розкладатися на чисті речовини. Ця група методів розрахована на знаходження вибухових речовин на різних поверхнях, шкірі, одязі [9].

До органолептичних методів відносять візуальний метод, який ґрунтується на вивченні розпізнавальних зовнішніх прикмет вибухових речовин та пристроїв. Біофізичний метод, який у свою чергу, поділяється на такі:

- біосенсорний метод – метод, що ґрунтується на виявленні азотовмістових речовин за допомогою собак, свиней тощо;
- біолюмінесцентний метод – метод, що ґрунтується на виявленні за допомогою УФ-люмінесценції залишок вибухової речовини на руках, одязі тощо.

Ферментативний метод ґрунтується на виявленні мікрочасток вибухової речовини на руках, багажу тощо при нанесенні її на спеціальний оброблений тампон. Як видно кожен метод має свої недоліки та не може забезпечити повну безпеку особі, що проводить розмінування.

Тому на сьогодні широкого розвитку набувають методи дистанційного пошуку та деактивації ВВП. Основним принципом роботи роботизованих комплексів пошуку ВВП є забезпечення транспортування приладів пошуку по замінованій місцевості без присутності людини [10]. Однак при цьому залишається невирішеним питання вилучення та деактивації ВВП. Активно розробляються та використовуються роботизовані комплекси розмінування, принципом дії яких є підрив ВВП за рахунок механічного контакту [11]. Цей метод виключає необхідність пошуку ВВП, однак при цьому має низьку надійність: швидкість розмінування та необхідність обов'язкового контакту роботизованого комплексу з ВВП. Цього недоліку можна позбавитись шляхом використання методу дистанційної деактивації ВВП опроміненням електромагнітними хвилями, який запропоновано в роботі [12]. Використання такого методу дозволить дистанційно підривати або деактивувати ВВП, які не містять металевих конструкційних елементів, та які знаходяться в полі опромінення без необхідності визначення їх місця розташування. Однак, питання проникнення та розповсюдження електромагнітних хвиль у тілі ВВП залишається нез'ясованим.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність електродинамічної моделі розповсюдження електромагнітних хвиль на елементах вибухонебезпечних предметів.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є побудова електродинамічної моделі дифракції електромаг-

нітних хвиль при проходженні крізь неметалевий вибухонебезпечний предмет у вигляді вибухової речовини в оболонці.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

1. Побудувати електродинамічну модель дифракції електромагнітних хвиль при проходженні крізь багат шарову структуру вибухонебезпечного предмету;
2. Встановити ступінь ослаблення енергії електромагнітних хвиль у товщі вибухової речовини.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є ВНП з неметалевими конструкційними елементами (або з незначною їх кількістю). До таких ВНП можна віднести протипіхотні фугасні міни, наприклад, ПМН-2, ПФМ-1 та міни осколкової дії, наприклад, МОН-90 та ПОМ-3.

Предметом дослідження є дифракція електромагнітних хвиль на ВНП з неметалевими конструкційними елементами з метою визначення кількості енергії електромагнітного поля, що може бути поглинена вибуховою речовиною всередині ВНП.

Враховуючі відомі закономірності розповсюдження електромагнітних хвиль в неструмопровідному середовищі висувається гіпотеза про можливість поглинання вибухонебезпечною речовиною ВНП енергії електромагнітних хвиль надвисоко частотного діапазону у кількості, достатній для її детонування.

Для побудови електродинамічної моделі дифракції електромагнітних хвиль при проходженні крізь багат шарову структуру ВНП застосовувався метод аналітичного розв'язання рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами та теорію довгих ліній.

Розрахунки проводитимуться засобами обчислювальної техніки з використанням програми Maple.

5. Побудова моделі дифракції електромагнітних хвиль на багат шаровій структурі вибухонебезпечного предмету

Будь-яка електродинамічна задача полягає в розв'язанні рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами.

Розглянемо розповсюдження електромагнітної хвилі з вектором Пойнтинга Π крізь ВНП, який має оболонку різної товщини d_1 та d_3 , яка вироблена із різних речовин з хвильовими опорами Z_{c2} та Z_{c4} відповідно (рис. 1).

Між оболонками знаходиться вибухова речовина товщиною d_2 з хвильовим опором Z_{c3} , який і є основним об'єктом дослідження. Граничними шарами з хвильовими опорами Z_{c1} та Z_{c5} є повітря в якому знаходиться ВНП. Ці граничні шари можна прийняти напівнескінченими. Виходячи з того, що оболонка ВНП виконана із однієї речовини із сталою товщиною та цей предмет знаходиться у повітрі із рівномірними параметрами, то:

$$d_1 = d_2, Z_{c2} = Z_{c4}, Z_{c1} = Z_{c5}. \quad (1)$$

Вектор густини потоку енергії електромагнітної хвилі (вектор Пойнтинга) у комплексному вигляді $\dot{\Pi}$ розраховується через вектора (комплексні числа) напруженості електричного \dot{E} та магнітного \dot{H} полів за формулою [13]:

$$\dot{P} = \frac{1}{2} \cdot [\dot{E} \times \dot{H}^*], \quad (2)$$

де

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{E}^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z} + \dot{E}^- \cdot e^{i\dot{\gamma}z}, \\ \dot{H} &= \dot{H}^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z} + \dot{H}^- \cdot e^{i\dot{\gamma}z}, \end{aligned} \quad (3)$$

де \dot{E}^+ та \dot{H}^+ комплексні амплітуди електричної та магнітної складових електромагнітної хвилі, що проникає крізь речовину та поверхню поділу фаз; \dot{E}^- та \dot{H}^- комплексні амплітуди електричної та магнітної складових електромагнітної хвилі, що відбиває від поверхні поділу фаз; $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця; z – координата по осі розповсюдження; $\dot{\gamma}$ – комплексна постійна розповсюдження, що визначається як:

$$\dot{\gamma} = \omega \cdot \sqrt{\dot{\epsilon} \cdot \epsilon_0 \cdot \mu \cdot \mu_0} = k - i \cdot \alpha, \quad (4)$$

де ω – кутова частота електромагнітної хвилі; $\dot{\epsilon}$ – комплексна діелектрична проникність речовини; ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму; μ – магнітна проникність середовища; μ_0 – магнітна проникність вакууму; k – фазова постійна розповсюдження (хвильове число), що характеризує зміну фази хвилі на одиницю відстані; α – коефіцієнт затухання хвилі. k та α визначаються як:

$$\begin{aligned} k &= \frac{\omega}{2c} \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu \cdot (\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta_\epsilon} + 1)}, \\ \alpha &= \frac{\omega}{2c} \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu \cdot (\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta_\epsilon} - 1)}, \end{aligned} \quad (5)$$

де $\text{tg} \delta_\epsilon$ – тангенс кута діелектричних втрат (вважаємо тангенс кута магнітних втрат $\text{tg} \delta_\mu = 0$).

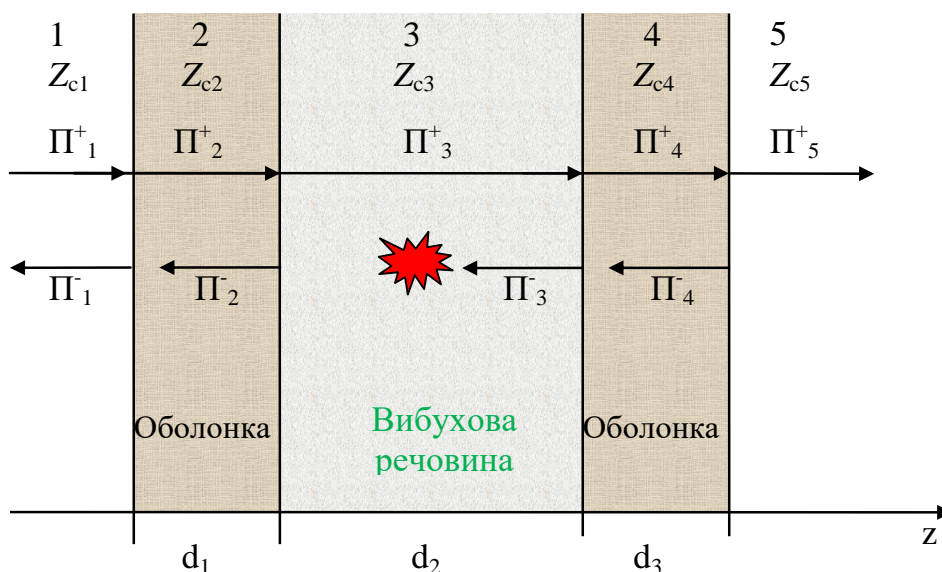


Рис. 1. Модель розповсюдження електромагнітних хвиль крізь вибухонебезпечний предмет (ВНП)

Дійсна частина $\text{Re}(\dot{P})$ дорівнює середньому потоку активної потужності, уявна частина $\text{Im}(\dot{P})$ дорівнює амплітуді реактивної потужності.

Хвильовий опір \dot{Z}_c можна представити у комплексному вигляді як:

$$\dot{Z}_c = \frac{\dot{E}^+}{\dot{H}^+} = \frac{\dot{E}^-}{\dot{H}^-} = \frac{\dot{\gamma}}{\omega \cdot \dot{E} \cdot \epsilon_0} = \sqrt{\frac{\mu \cdot \mu_0}{\dot{E} \cdot \epsilon_0}}. \quad (6)$$

Для переходу від комплексних значень до миттєвих діючих значень рівняння (3) з урахуванням (4) помножимо на $e^{i\omega t}$, візьмемо діюче значення й отримуємо для електричного поля:

$$E = \text{Re}(\dot{E} \cdot e^{i\omega t}) = E_m^+ \cdot e^{-\alpha z} \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi_0^+) + E_m^- \cdot e^{\alpha z} \cdot \cos(\omega t + kz + \varphi_0^-). \quad (7)$$

де φ_0^+ та φ_0^- – початкові фази, що залежать від початку координат чи часу спостереження.

Проаналізуємо параметри хвилі для трьох середовищ, представлених на рис. 1, а саме повітря (ділянки 1, 5), пластикова оболонка (ділянки 2, 4), вибухова речовина (ділянка 3).

1. Повітря. Для шару повітря до 100 м (саме такі умови передбачає застосування методу дистанційного знешкодження ВВП) в якості електромагнітних властивостей можна взяти властивості вакууму із достатньою точністю припущення ($\epsilon=1$, $\mu=1$; $\text{tg}\delta=0$). Відповідно з (5) маємо, що при таких умовах затухання електромагнітної хвилі відсутнє ($\alpha=0$), при цьому хвиля розповсюджується зі швидкістю світла $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$ та має довжину хвилі $\lambda_0 = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{c}{f}$ (де f – циклічна частота електромагнітної хвилі).

Хвильовий опір для таких умов повітря також можна прийняти як $Z_{c1} = Z_{c5} = Z_{c0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi$ Ом, при цьому вектори електричного та магнітного полів змінюються синфазне.

2. Оболонка. Як розглядалось вище оболонка протипіхотних мін виконана із діелектричного пластика для зменшення чутливості при виявленні індукційними приладами розмінування. Тобто такі речовини за своїми властивостями максимально наближені до ідеальних діелектриків, для яких виконуються умови: $\epsilon > 1$, $\mu = 1$; $\text{tg}\delta_\epsilon = \text{tg}\delta_\mu = 0$. Відповідно, відмінністю від повітря, яке розглянуто вище, є те, що в оболонці швидкість розповсюдження хвилі (відповідно, c_2 та c_4), довжина хвилі (відповідно, λ_2 та λ_4) та хвильовий опір (відповідно, Z_{c2} та Z_{c4}) зменшуються в $\sqrt{\epsilon}$ разів:

$$c_2 = c_4 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}, \quad \lambda_2 = \lambda_4 = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon}}, \quad Z_{c2} = Z_{c4} = \frac{Z_{c0}}{\sqrt{\epsilon}}. \quad (8)$$

3. Вибухова речовина. Як розглядалось в роботі [12] всі вибухові речовини відносяться до діелектриків двох різних класів. Такі речовини як гексоген

($C_3H_6N_6O_6$), пентаеритриттетранітрат ($C_5H_8(ONO_2)_4$), та фульмінат ртуті ($Hg(ONC)_2$) мають нульовий дипольний момент та нечутливі до електромагнітного випромінювання, тобто їх можна віднести до ідеальних діелектриків, властивості яких розглянуті вище. Однак такі вибухові речовини, як тринітротолуол ($C_7H_5N_3O_6$), тетрил ($C_7H_5N_5O_8$), тринітрорезорцинату свинцю ($C_6H(NO_2)_3(OPb)_2$) та азид свинцю ($Pb(N_3)_2$) мають суттєвий дипольний момент, відповідно їх потрібно розглядати як діелектрики з малими втратами ($\varepsilon > 1$, $\mu = 1$, $0 < \operatorname{tg} \delta_\varepsilon \ll 1$, $\operatorname{tg} \delta_\mu = 0$). Для таких умов відповідно до (5) для k можна нехтувати $\operatorname{tg}^2 \delta_\varepsilon$, тобто швидкість та довжина хвилі залишаються таким ж як і в ідеальному діелектрику. Однак, для таких речовин вже є суттєвим хвильове затухання ($\alpha \neq 0$). Якщо використати наближення:

$$\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_\varepsilon} \approx 1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\delta_\varepsilon}{2},$$

то отримуємо:

$$\alpha = \frac{\omega}{2c} \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \mu \cdot (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_\varepsilon} - 1)} \approx \frac{\omega}{2c} \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot \operatorname{tg} \delta_\varepsilon = \frac{\omega}{2c_3} \cdot \operatorname{tg} \delta_\varepsilon = \frac{\pi}{\lambda_3} \cdot \operatorname{tg} \delta_\varepsilon = \sigma \cdot Z_{c3}, \quad (9)$$

де σ – питома електрична провідність середовища.

З (9) видно, що коефіцієнт затухання прямо пропорційний питомої електричній провідності вибухової речовини.

6. Встановлення ступеня ослаблення енергії електромагнітних хвиль при проходженні вибухонебезпечного предмету

З електродинамічної точки зору ступень ослаблення енергії електромагнітних хвиль при проходженні через неметалевий предмет можна оцінити за допомогою показників «коефіцієнт проходження електромагнітної хвилі» та «коефіцієнт відбивання електромагнітної хвилі» [13].

Якщо розглядати процес проходження електромагнітної хвилі крізь декілька шарів, як показано на рис. 1, то видно, що крізь шари 1–4 розповсюджується і пряма хвиля й відбита, тоді як в шарі 5 – лише пряма. Тому з (3) з урахуванням (6) можна отримати наступні співвідношення:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{1-4} &= \dot{E}_{1-4}^+ \cdot e^{-i\dot{y}z_{1-4}} + \dot{E}_{1-4}^- \cdot e^{i\dot{y}z_{1-4}}, \\ \dot{H}_{1-4} &= (\dot{E}_{1-4}^+ \cdot e^{-i\dot{y}z_{1-4}} + \dot{E}_{1-4}^- \cdot e^{i\dot{y}z_{1-4}}) / \dot{Z}_{c1-4}, \\ \dot{E}_5 &= \dot{E}_5^+ \cdot e^{-i\dot{y}z_5}, \\ \dot{H}_5 &= \dot{E}_5^+ \cdot e^{-i\dot{y}z_5} / \dot{Z}_{c5}. \end{aligned} \quad (10)$$

Використовуючи модель, в якій різні середовища з хвильовими опорами \dot{Z}_{cn} моделюються відрізками довгих ліній з опорами \dot{Z}_{0n} (дорівнює відношенню комплексних амплітуд напруги та струму для хвиль однакового напрямку), правило трансформації опорів довгих ліній [14], рівняння (6), (10) та приймаючи, що $d = z_n - z_{n-1}$ ($n = 1, 2, 3, 4, 5$), $d_1 = d_3$ отримуємо вирази для еквівалентного опору багат шарової структури, приведені на рис. 1:

$$\begin{aligned}\dot{Z}'_{05} &= \dot{Z}_{04} \frac{Z_{05} + i \cdot \dot{Z}_{04} \cdot \operatorname{tg}(\dot{\gamma}_4 \cdot d_1)}{\dot{Z}_{04} + i \cdot Z_{05} \cdot \operatorname{tg}(\dot{\gamma}_4 \cdot d_1)} \\ \dot{Z}''_{05} &= \dot{Z}_{03} \frac{\dot{Z}_{04} + i \cdot \dot{Z}_{03} \cdot \operatorname{tg}(\dot{\gamma}_3 \cdot d_2)}{\dot{Z}_{03} + i \cdot \dot{Z}_{04} \cdot \operatorname{tg}(\dot{\gamma}_3 \cdot d_2)}, \\ \dot{Z}'''_{05} &= \dot{Z}_{02} \frac{\dot{Z}_{03} + i \cdot \dot{Z}_{02} \cdot \operatorname{tg}(\dot{\gamma}_2 \cdot d_1)}{\dot{Z}_{02} + i \cdot \dot{Z}_{03} \cdot \operatorname{tg}(\dot{\gamma}_2 \cdot d_1)}.\end{aligned}\quad (11)$$

Виходячи з цього коефіцієнт відбивання електромагнітної хвилі від багатосарової структури (рис. 1) розраховується за виразом:

$$\dot{\rho} = \frac{\dot{Z}'''_{05} - Z_{01}}{\dot{Z}'''_{05} + Z_{01}}. \quad (12)$$

Коефіцієнт проходження електромагнітних хвиль крізь багатосарову структуру (рис. 1) розраховується за формулою:

$$\dot{\tau} = \frac{2 \cdot \dot{Z}'''_{05}}{\dot{Z}'''_{05} + Z_{01}}. \quad (13)$$

Для забезпечення виділення достатньої кількості енергії необхідно застосувати електромагнітне випромінювання в діапазоні довжин хвиль, порівнюваних з розміром ВНП. При цих умовах довжина хвилі $\lambda > 1$ см (НВЧ діапазон). Вважаючи, що товщина стінок оболонки є незначною ($d_1 = d_3 \sim 0,1$ см) у порівнянні з довжиною вибухової речовини, еквівалентним опором на ділянках 2 та 4 нехтуємо. Відповідно, рівняння (11) перетворюються у рівняння

$$\dot{Z}'_{05} = \dot{Z}_{03} \frac{Z_{05} + i \cdot \dot{Z}_{03} \cdot \operatorname{tg}(\dot{\gamma}_3 \cdot d_2)}{\dot{Z}_{03} + i \cdot Z_{05} \cdot \operatorname{tg}(\dot{\gamma}_3 \cdot d_2)}. \quad (14)$$

На рис. 2 та 3 представлено графічний вигляд залежності модулю коефіцієнту відбивання $|\rho|$ та фази φ_ρ відповідно до рівняння $\dot{\rho} = |\rho| \cdot e^{i\varphi_\rho}$ для електромагнітної хвилі частотою $f=1$ ГГц від діелектричної проникності ε в діапазоні від 1 до 20 вибухової речовини товщиною d від 3 см до 10 см при $\mu=1$, $\operatorname{tg}\delta_\varepsilon=0$, $\operatorname{tg}\delta_\mu=0$.

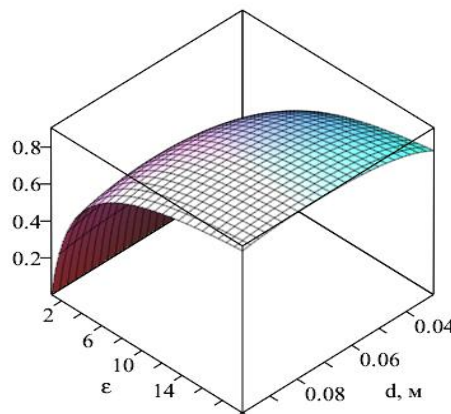


Рис. 2. Залежність модулю коефіцієнта відбивання $|\rho|$ від діелектричної проникності ε та товщини вибухової речовини d

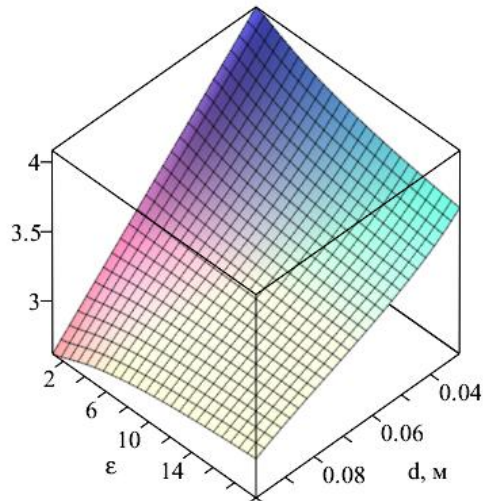


Рис. 3. Залежність фази φ_r коефіцієнта відбивання від діелектричної проникності ϵ та товщини d вибухової речовини

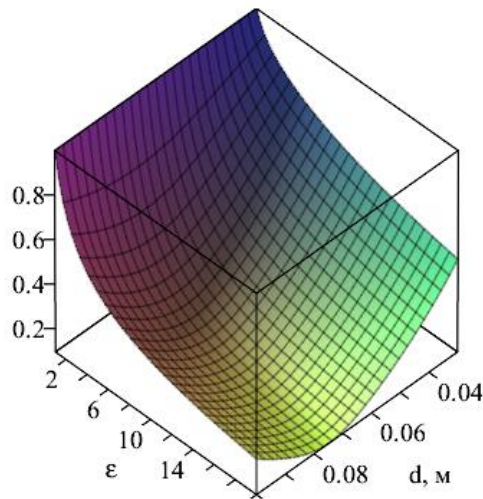


Рис. 4. Залежність модулю $|\tau|$ коефіцієнта проходження від діелектричної проникності ϵ та товщини d вибухової речовини

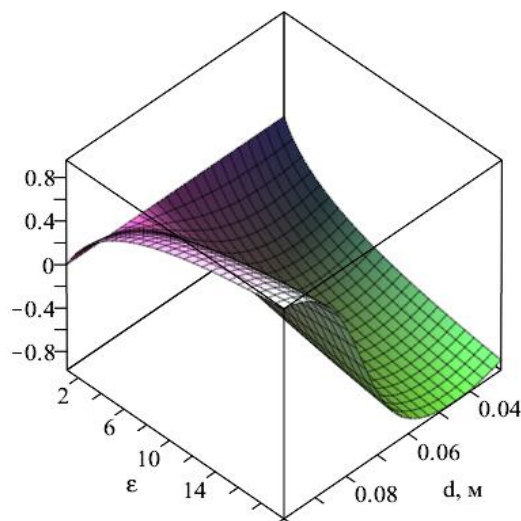


Рис. 5. Залежність фази φ_t коефіцієнта проходження від діелектричної проникності ϵ та товщини d вибухової речовини

На рис. 4 та рис. 5 представлено графічні залежності модулю $|\tau|$ та фази φ_τ коефіцієнту проходження відповідно до рівняння $\dot{\tau} = |\tau| \cdot e^{i\varphi_\tau}$ при тих же параметрах електромагнітної хвилі.

7. Обговорення результатів моделювання дифракції електромагнітних хвиль на вибухонебезпечному предметі

Аналіз залежності модулю $|\rho|$ коефіцієнту відбивання $\dot{\rho}$ електромагнітного випромінювання від ВВП без металевих конструкційних елементів від діелектричної проникності ϵ вибухової речовини та товщини d вибухової речовини (рис. 2) показує, що $|\rho|$ збільшується з ростом ϵ за законом, близьким до логарифмічного, та наближається до 1 приблизно при $\epsilon > 20$. Враховуючі, що модуль коефіцієнту відбивання характеризує зміну амплітуди хвилі при відбиванні, можна зробити висновок, що при діелектричній проникності більше 10 більша частина енергії електромагнітної хвилі відбивається від ВВП, що може бути використано, наприклад, для встановлення місця знаходження цього ВВП на поверхні землі. Збільшення товщини d вибухової речовини приводить до зменшення $|\rho|$ (більший за розміром ВВП відбиває меншу частину електромагнітної енергії).

Збільшення діелектричної проникності ϵ вибухової речовини призводить до збільшення фази φ_ρ коефіцієнта відбивання (рис. 3). Подібною є залежність φ_ρ й від товщини вибухової речовини d . З фізичної точки зору фаза коефіцієнту відбивання показує величину запізнення відбитої хвилі відносно падаючої.

Модуль $|\tau|$ коефіцієнту проходження $\dot{\tau}$ електромагнітного випромінювання через ВВП без металевих конструкційних елементів зменшується за законом, близьким до гіперболічного (рис. 4). З цього можна зробити припущення, що при збільшенні величини діелектричної проникності вибухонебезпечної речовини збільшується кількість енергії електромагнітної хвилі, що розсіюється всередині цієї речовини. З рис. 4 видно, що при $\epsilon > 10$ $|\tau|$ має виражений мінімум при зміні товщині вибухонебезпечної речовини. $|\tau|$ є мінімальним при $\epsilon = 20$ та товщині вибухонебезпечної речовини біля 0,07 м, що також свідчить про збільшення енергії електромагнітної хвилі, що розсіюється всередині цієї речовини.

З рис. 5 видно, що фаза φ_τ коефіцієнта проходження суттєво залежить від діелектричної проникності ϵ та товщини d вибухової речовини. На відміну від фази φ_ρ фаза φ_τ змінює свій знак, що може свідчити про зміну поляризації електромагнітної хвилі. З фізичної точки зору фаза коефіцієнту проходження показує величину запізнення хвилі, що пройшла ВВП, відносно падаючої.

Розраховані коефіцієнти відбиття та проходження електромагнітного випромінювання крізь ВВП без наявності металевих конструкційних елементів (рис. 2–5) показали, що такі предмети мають низький коефіцієнт відбиття та високий коефіцієнт проходження. Це пов'язано з тим, що ВВП виконані із діелектричних матеріалів. Це є негативним фактором для їх виявлення, так як низький рівень відбитого випромінювання важко ідентифікувати та відокремити від «шуму» на фоні відбиття від інших предметів ландшафту. Однак це є позитивним фактором для дистанційного підриву таких ВВП за рахунок опромінення електромагнітним полем. Висока діелектрична проникність оболонки таких ВВП не перешкоджає проникненню енергії випромінювання до

вибухової речовини. При цьому також треба звернути увагу на електромагнітні властивості вибухових речовин. Для таких речовин, як гексоген ($C_3H_6N_6O_6$), пентаеритриттетранітрат ($C_5H_8(ONO_2)_4$), та фульмінат ртуті ($Hg(ONC)_2$) з нульовим дипольним моментом та діелектричною проникністю $\epsilon \approx 1$ коефіцієнт проходження суттєво більший. Це призводить до того, що кількість енергії, що поглинається ВВП буде мінімальною. Відповідно використання методу дистанційного підриву за рахунок електромагнітного випромінювання для таких ВВП недоцільний. Однак такі вибухові матеріали, як тринітротолуол ($C_7H_5N_3O_6$), тетрил ($C_7H_5N_5O_8$), тринітрорезорцилату свинцю ($C_6H(NO_2)_3(OPb)_2$) та азид свинцю ($Pb(N_3)_2$) мають суттєвий дипольний момент, це призводить до суттєвого зниження коефіцієнту проходження (рис. 4). При цьому значення модулю τ корелює із дипольним моментом цих речовин та їх діелектричною проникненістю. Відповідно ВВП з такими речовинами у якості вибухових схильні до поглинання енергії електромагнітного випромінювання та їх підриви може бути ініційований НВЧ випромінюванням дистанційно. Однак слід звернути увагу, що для таких речовин на 30–40 % збільшується й коефіцієнт відбиття ρ у порівнянні з неполярними речовинами. Хоча це й полегшує виявлення таких ВВП за рахунок моніторингу відбитого випромінювання, однак це й зменшує кількість енергії яка поглинається масою вибухової речовини. Однак представлені на рис. 2–5 результати дозволяють лише якісно оцінити кількість поглиненої тілом ВВП енергії випромінювання. Тому у подальшому доцільно використати отримане в цій роботі теоретичне підґрунтя для розробки моделі поглинання НВЧ випромінювання вибуховими речовинами.

8. Висновки

1. Побудована електродинамічна модель дифракції електромагнітних хвиль при проходженні крізь багат шарову структуру вибухонебезпечного предмету шляхом розв'язання рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами. Запропоновано розглядати процес опромінення електромагнітним випромінюванням вибухонебезпечних предметів, що знаходяться на поверхні землі, як поетапний процес проходження, поглинання та відбивання від поверхонь розділу шарів оболонки та вибухової речовини. Це дозволяє застосовувати однакові електродинамічні моделі для всіх шарів з відповідними параметрами хвильового опору Z_c , товщини d , діелектричної проникності ϵ , магнітної проникності середовища μ та тангенсу кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$. Проаналізовані ці параметри для речовин, з яких вироблені протипіхотні фугасні міни ПМН-2, ПФМ-1 та протипіхотні міни осколкової дії МОН-90 та ПОМ-3. Встановлено, що речовини, з яких вироблено їх корпуси, мають $\epsilon > 1$, $\mu = 1$; $\operatorname{tg} \delta = 0$, а вибухові речовини поділяються на два класи: $\epsilon > 1$, $\mu = 1$; $\operatorname{tg} \delta = 0$ та $\epsilon > 1$, $\mu = 1$; $\operatorname{tg} \delta \ll 1$, відповідно.

2. Встановлено ступінь ослаблення енергії електромагнітних хвиль у товщі вибухової речовини за допомогою визначення коефіцієнтів відбивання та проходження електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону крізь вибухонебезпечний предмет. Отримано рівняння для визначення еквівалентного хвильового опору вибухонебезпечного предмету. Аналіз результатів розрахунку коефіцієнтів відбивання та проходження показав, що модуль та фазове число коефіцієнту проходження суттєво залежать від дипольного моменту вибухової речовини та можуть змінюватись в 5–8 разів в залежності від хімічного складу вибухової речовини. Коефіцієнт відбивання для вибухонебезпечних предметів з такими дипо-

льними вибуховими речовинами як тринітротолуол ($C_7H_5N_3O_6$), тетрил ($C_7H_5N_5O_8$), тринітрорезорцинату свинцю ($C_6H(NO_2)_3(OPb)_2$) та азид свинцю ($Pb(N_3)_2$) також на 30–40 % більший у порівняння з гексогеном ($C_3H_6N_6O_6$), пентаеритриттетранітратом ($C_5H_8(ONO_2)_4$) та фульмінатом ртуті ($Hg(ONC)_2$). Отримані результати дозволяють оцінити кількість поглиненої енергії та, відповідно, оцінити можливість дистанційного впливу електромагнітним випромінюванням на вибухонебезпечні предмети.

Література

1. Іщенко А. В., Кобець М. В. Засоби і методи виявлення вибухових речовин та пристроїв у боротьбі з тероризмом. Національна академія внутрішніх справ України. 2005, 146 с. URL: <http://elar.naiu.kiev.ua/bitstream/123456789/18996/1/Kobets%20M.V.%20Zasoby%20i%20metody%20vyaiyvlenaiy%20VP.pdf>
2. Yoo L. S., Lee J. H., Lee Y. K., Jung S. K., Choi Y. Application of a drone magnetometer system to military mine detection in the demilitarized zone. *Sensors*. 2021. Vol. 21(9). P. 3175. doi: 10.3390/s21093175
3. Фірман В. М., Сеник В. В., Білінський Б. О. Виявлення вибухових пристроїв шляхом детектування парів і часток вибухових речовин та особиста безпека персоналу. *Пожежна безпека*. 2019. Том 8. С. 30–32. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/issue/archive>
4. Kagan A., Jimmie C. O. *Counterterrorist Detection Techniques of Explosives*, Second Edition. 2022. P. 429. URL: <https://www.elsevier.com/book-and-journals>
5. Clifford E., Ing H., McFee J., Cousins T. High rate counting electronics for a thermal neutron analysis land mine detector. *Proc. SPIE 3769. Penetrating Radiation Systems and Applications*. (1 October 1999). doi: 10.1117/12.363677.
6. Gaft M., Nagli L. UV gated Raman spectroscopy for standoff detection of explosives. *Optical materials*. 2008. Vol. 30(11). P. 1739–1746. doi: 10.1016/j.optmat.2007.11.013
7. Sun W., Liu S., Wang M., Zhang X., Shang K., Liu Q. Soil copper concentration map in mining area generated from AHSI remote sensing imagery. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 860. P. 160511. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160511
8. Horvath T. Emergency Cases at Countering Improvised Explosive Devices (C-IED), and their Potential Management. *Land Forces Academy Review*. 2019. Vol. 24(2). P. 95–106. URL: https://www.armyacademy.ro/reviste/rev2_2019/Horvath_RAFT_2_2019.pdf
9. Kabessa Y., Eyal O., Bar-On O., Korouma V., Yagur-Kroll S., Belkin S., Agranat A. J. Standoff detection of explosives and buried landmines using fluorescent bacterial sensor cells. *Biosensors and Bioelectronics*. 2016. Vol. 79. P. 784–788. doi: 10.1016/j.bios.2016.01.011
10. Shimoi N., Takita Y. Remote mine sensing technology using a mobile wheeled robot rat-1. In *ICCAS*. 2010. P. 622–626. doi: 10.1109/ICCAS.2010.5669836
11. Wynn C. M., Palmacci S., Kunz R. R., Rothschild M. A novel method for remotely detecting trace explosives. *Lincoln Laboratory Journal*. 2008. Vol. 17(2). P. 27–39. URL: <https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/publication/doc/novel-method-remotely-detecting-trace-wynn-ja-14525.pdf>
12. Kustov M., Karpov A. Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2023. № 1(37). С. 4–17.

doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-1

13. Kolcunová I., Pavlík M., Beňa L., Čonka Z., Ilenin S., Kanálik M., Zbojovský J. Influence of electromagnetic shield on the high frequency electromagnetic field penetration through the building material. *Acta Physica Polonica A*. 2017. Vol. 131(4). P. 1135–1137. doi: 10.12693/APhysPolA.131.1135

14. Rahmani-Andebili M. Problems: Transmission Line Model and Performance. In: *Power System Analysis*. Springer, Cham. 2022. P. 53–57. doi: 10.1007/978-3-030-84767-8_5

M. Kustov, DSc, Associate Professor, Head of the Scientific Department

O. Kulakov, PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the Scientific Department

A. Karpov, Adjunct

O. Basmanov, DSc, Professor, Chief Researcher of the Scientific Department

Yu. Mykhailovska, PhD, Senior Researcher of the Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

MODEL OF DIFFRACTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES ON EXPLOSIVE OBJECTS

A model of electromagnetic wave diffraction on an explosive object without metal structural substances is proposed. The properties of the materials of the most common anti-personnel mines were analyzed and it was established that their shell is dielectric, and explosive substances are divided into two groups depending on their dipole moment. In particular, the explosive substances such as hexogen, pentaerythritol tetranitrate, and mercury fulminate with zero dipole moment and according to their electromagnetic properties, they belong to ideal dielectrics. The explosives trinitrotoluene, tetryl, lead trinitroresorcinate, and lead azide should be considered as low-loss dielectrics. An electrodynamic model was built to calculate the reflection coefficients and the passage of electromagnetic plane waves of the microwave range through the multilayer structure of an explosive object. To determine the equivalent wave resistance of the multilayer structure of an explosive object, the use of the theory of long lines is proposed. It is established that for microwave radiation, the layers of the case of explosive objects made of dielectric substances can be neglected due to their small thickness. The modeling results show that most anti-personnel mines have a low reflection coefficient, which makes them difficult to detect, but at the same time increases the amount of energy that can pass deep into the body of the explosive substance. It has been shown that explosive objects with dipole explosive substances are capable of absorbing electromagnetic radiation energy. The obtained results allow us to qualitatively assess the susceptibility of explosive substances to their remote detonation by irradiation with powerful pulses of electromagnetic radiation in the microwave range.

Keywords: level of civil protection of territories, explosive substances, electromagnetic waves, reflection, absorption, diffraction

References

1. Ishchenko, A. V., Kobets, M. V. (2005). «Zasoby i metody vyivlennia vybukhovyykh rehovyn ta prystroiv u borotbi z teroryzmom. Natsionalna akademiia vnutrishnikh sprav Ukrainy». Means and methods of detecting explosive substances and devices in the fight against terrorism. National Academy of Internal Affairs of Ukraine, 148. Available at: <http://elar.naiu.kiev.ua/bitstream/123456789/18996/1/Kobets%20M.V.%20Zasoby%20i%20metody%20vyaiyvlenaiy%20VP.pdf>

2. Yoo, L. S., Lee, J. H., Lee, Y. K., Jung, S. K., Choi, Y. (2021). Application of a drone magnetometer system to military mine detection in the demilitarized zone. *Sensors*, 21(9), 3175. doi: 10.3390/s21093175

3. Firman, V. M., Senyk, V. V., Bilinskyi, B. O. (2019). «Vyivlennia vybukhovyykh prystroiv shliakhom detektuvannia pariv i chastok vybukhovyykh

rečovyn ta osobysta bezpeka personalu. Pozhezhna bezpeka», Detection of explosive devices by detecting vapors and particles of explosives and personal safety of personnel. Fire safety, 8, 2019, 30–32. Available at: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/issue/archive>

4. Kagan, A., Oxley, J. (2022). Counterterrorist Detection Techniques of Explosives, Second Edition, 429. Available at: <https://www.elsevier.com/book-and-journals>

5. Clifford, E., Ing, H., McFee, J., Cousins, T. (1999). High rate counting electronics for a thermal neutron analysis land mine detector", Proc. SPIE, Penetrating Radiation Systems and Applications, 3769. doi: 10.1117/12.363677

6. Gaft, M., Nagli, L. (2008). UV gated Raman spectroscopy for standoff detection of explosives. Optical materials, 30(11), 1739–1746. doi: 10.1016/j.optmat.2007.11.013

7. Sun, W., Liu, S., Wang, M., Zhang, X., Shang, K., Liu, Q. (2023). Soil copper concentration map in mining area generated from AHSI remote sensing imagery. Science of The Total Environment, 860, 160511. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160511

8. Horvath, T. (2019). Emergency Cases at Countering Improvised Explosive Devices (C-IED), and their Potential Management. Land Forces Academy Review, 24(2), 95–106. Available at: https://www.armyacademy.ro/reviste/rev2_2019/Horvath_RAFT_2_2019.pdf

9. Kabessa, Y., Eyal, O., Bar-On, O., Korouma, V., Yagur-Kroll, S., Belkin, S., Agranat, A. J. (2016). Standoff detection of explosives and buried landmines using fluorescent bacterial sensor cells. Biosensors and Bioelectronics, 79, 784–788. doi: 10.1016/j.bios.2016.01.011

10. Shimoi, N., Takita, Y. (2010). Remote mine sensing technology using a mobile wheeled robot rat-1. In ICCAS 2010, 622–626. doi: 10.1109/ICCAS.2010.5669836

11. Wynn, C. M., Palmacci, S., Kunz, R. R., Rothschild, M. (2008). A novel method for remotely detecting trace explosives. Lincoln Laboratory Journal, 17(2), 27–39. Available at: <https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/publication/doc/novel-method-remotely-detecting-trace-wynn-ja-14525.pdf>

12. Kustov, M., Karpov, A. (2023). Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. Problems of emergency situations, 1(37), 4–17. doi:10.52363/2524-0226-2023-37-1

13. Kolcunová, I., Pavlík, M., Beňa, L., Čonka, Z., Ilenin, S., Kanálik, M., Zbojovský, J. (2017). Influence of electromagnetic shield on the high frequency electromagnetic field penetration through the building material. Acta Physica Polonica A, 131(4), 1135–1137. doi: 10.12693/APhysPolA.131.1135

14. Rahmani-Andebili, M. (2022). Problems: Transmission Line Model and Performance. In: Power System Analysis. Springer, Cham., 53–57. doi.org/10.1007/978-3-030-84767-8_5

Надійшла до редколегії: 19.09.2023

Прийнята до друку: 10.11.2023