

УДК 623.4.015.4

П. М. ФЕДОРОВ,*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,***В. В. БОГУЧАРСЬКИЙ,** *кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,***Н. В. ГАМАЛІЙ,** *старший науковий співробітник (Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)*

Розрахунок зон ураження зброї електромагнітного імпульсу

На основі спрощеного детерміністського підходу розроблено спосіб розрахунку дальності дії та розмірів зон ураження зброї електромагнітного імпульсу. Обґрунтовано величину рівня гарантованого функціонального ураження радіоелектронних засобів, не обладнаних спеціальними системами захисту від електромагнітного імпульсу. Показано зв'язок так званого параметра ER з дальністю дії зразка зброї електромагнітного імпульсу в напрямку максимуму діаграми спрямованості його антенної системи та запропоновано формули для розрахунку цього параметра. Встановлено, що для ураження радіоелектронних засобів на максимальній площі необхідно правильно вибрати дальність спрацювання зразка зброї електромагнітного імпульсу. Отримано розрахункові співвідношення для визначення цієї оптимальної дальності. Показано, що величина максимального радіуса ураження в першому наближенні визначається лише потужністю застосованого генератора й критеріальним рівнем ураження радіоелектронних засобів і практично не залежить від вибору антенної системи зразка зброї електромагнітного імпульсу.

Ключові слова: зброя електромагнітного імпульсу, тактико-технічні параметри, радіоелектронні засоби, функціональне ураження, дальність дії, зона ураження.

На основе упрощенного детерминистского подхода разработан способ расчета дальности действия и размеров зон поражения оружия электромагнитного импульса. Обоснована величина уровня гарантированного функционального поражения радиоэлектронных средств, не оборудованных специальными системами защиты от электромагнитного импульса. Показана связь так называемого параметра ER с дальностью действия образца оружия электромагнитного импульса в направлении максимума диаграммы направленности его антенной системы. Предложены формулы для расчета этого параметра. Установлено, что для поражения радиоэлектронных средств на максимальной площади необходимо правильно выбрать дальность срабатывания образца оружия электромагнитного импульса. Получены расчетные соотношения для определения этой оптимальной дальности. Показано, что величина максимального радиуса поражения в первом приближении определяется лишь мощностью примененного генератора и критеріальным уровнем поражения радиоэлектронных средств и практически не зависит от выбора антенной системы образца оружия электромагнитного импульса.

Ключевые слова: оружие электромагнитного импульса, тактико-технические параметры, радиоэлектронные средства, функциональное поражение, дальность действия, зона поражения.

Починаючи з Другої світової війни, у військовій справі широко застосовують такі засоби радіоелектронної боротьби (тобто боротьби в радіочастотному спектрі), як станції постановки активних перешкод. Ці станції здійснюють функціональне подавлення радіоелектронних засобів (РЕЗ) противника. Подальшому розвитку «наступальних» спроможностей засобів радіоелектронної боротьби сприятиме широке впровадження створюваних зараз у провідних країнах світу зразків зброї електромагнітного імпульсу (ЕМІ).

Під зброєю ЕМІ розуміють спеціально розроблені й виготовлені неядерні засоби генерування потужного електромагнітного імпульсу або послідовності імпульсів для функціонального ураження озброєння та військової техніки (ОВТ) противника, насамперед різноманітних РЕЗ, що входять до складу його систем управління військами і зброєю. На відміну від функціонального подавлення, при функціональному ураженні елементи РЕЗ противника зазнають необоротних ушкоджень (електричний та (або) тепловий пробій, механічні руйнування тощо), у результаті яких після припинення уражального впливу вони не можуть самостійно повернутися до працездатного стану і потребують ремонту [1, 2].

У загальному випадку будь-який зразок зброї ЕМІ має такі обов'язкові складові [1]:

джерело живлення;

генератор, що формує імпульсний сигнал – подинний відео- чи радіоімпульс або пачку імпульсів необхідної потужності (енергії);

антенно-фідерну систему, призначену для передачі енергії від генератора до антени (фідерний тракт), а також ефективного випромінювання вільно поширюваних у просторі електромагнітних хвиль та формування діаграми спрямованості (ДС) заданої форми й орієнтування її в напрямку на ціль (власне антена).

Крім цих обов'язкових елементів, що визначають основні тактико-технічні характеристики, деякі зразки зброї ЕМІ можуть доповнюватися різноманітними допоміжними підсистемами, які підвищують ефективність бойового застосування такої зброї, як от підсистеми радіотехнічної розвідки, наведення на ціль, управління, обміну інформацією та її відображення. Наявність таких підсистем більш характерна для варіанта конструктивного виконання зброї ЕМІ у вигляді потужних комплексів спрямованого випромінювання (КСВ) багаторазового використання, що здійснюють дистанційне ураження цілей зі значної відстані. Іншим варіантом виконання зброї ЕМІ є так звані боеприпаси ЕМІ (керовані ракети, авіаційні бомби, артилерійські снаряди тощо), які за допомогою відповідних носіїв доставляються в місце спрацювання, розташоване в безпосередній близькості до цілей, що уражаються.

Важливим завданням, яке необхідно виконати перед початком розробки зразків перспективної зброї ЕМІ, так само, як і будь-якого іншого новітнього зразка ОВТ, є ретельне обґрунтування тактико-технічних вимог до них. З одного боку, тактико-технічні вимоги (ТТВ) повинні базуватися на оперативнотактичних вимогах, що визначають цільове призначення, бойові можливості

та умови бойового застосування нового виду зброї. З іншого боку, при розробці ТТВ необхідно враховувати обмеження фізичних процесів, покладених в основу функціонування зброї, що впливають з фундаментальних законів природи. Для зброї ЕМІ такі обмеження визначаються закономірностями процесів генерування потужного імпульсного випромінювання, його поширення в природних умовах та взаємодії з електричними колами РЕЗ. Іншими обмеженнями, що потрібно брати до уваги, є досяжний на сучасному етапі розвитку науки й техніки рівень технологічних можливостей з виробництва необхідних матеріалів і виробів, а також раціональні масові, габаритні, енергетичні та економічні обмеження.

Ефективність дії зброї ЕМІ на РЕЗ противника залежить від багатьох факторів:

1) енергетичних, спрямувальних, часових, частотних і поляризаційних параметрів випромінювання, створюваного зразком зброї ЕМІ (параметрів зброї);

2) відстані до місця розташування цілі, що уражається (радіотехнічний об'єкт, зразок ОБТ або окремих РЕЗ), та її кутових координат відносно зразка зброї ЕМІ («геометрії» зони ураження);

3) впливу земної поверхні, її рельєфу, різноманітних розташованих на ній предметів і об'єктів, а також атмосфери на умови поширення радіохвиль від зразка зброї ЕМІ до цілі, який характеризується такими явищами, як дифракція, рефракція, поглинання випромінювання ЕМІ в атмосферних газах і опадах, багатопроневе поширення тощо (впливу природних умов);

4) конкретного компоновання радіотехнічного об'єкта (зразка ОБТ), способів виконання корпусів апаратури, застосованих схемних рішень, особливостей систем електроживлення й заземлення, наявності чи відсутності засобів додаткового захисту від наведень ЕМІ у вигляді екранів, розрядників тощо (конструктивних особливостей РЕЗ);

5) стійкості застосованих електрорадіоелементів до впливу потужного ЕМІ (критеріальних рівнів ураження елементної бази).

При обґрунтуванні ТТВ розрахунку підлягають параметри зброї – перша група перелічених факторів, що впливають на ефективність дії зразків зброї ЕМІ. До таких параметрів відносяться імпульсна потужність, ширина головної пелюстки ДС, коефіцієнт підсилення антенної системи, середня частота й ширина спектра випромінювання, тривалість одного імпульсу, кількість імпульсів та частота їхнього слідування.

Друга група факторів, «геометрія» зони ураження, визначається, головним чином, оперативнотактичними вимогами до зброї ЕМІ. Основними параметрами цієї групи є дальність ураження, дальність спрацювання зразка зброї ЕМІ та радіус і площа зони ураження.

Вплив третьої групи факторів у розрахунках, що проводяться при обґрунтуванні ТТВ до зразків зброї ЕМІ, можна врахувати за допомогою відомого в теорії поширення радіохвиль [3] множника ослаблення L , який показує, наскільки поле електромагнітної хвилі, що поширюється в реальних умовах, відрізняється від

поля електромагнітної хвилі, яке існувало б у вільному просторі.

Найбільш складним завданням є точне врахування четвертої групи факторів, що характеризують шляхи проникнення електромагнітної енергії до найбільш уразливих до впливу ЕМІ елементів РЕЗ та визначають величину її ослаблення.

Нарешті остання, п'ята група факторів, характеризує фізичні процеси безпосереднього ураження електронних компонентів РЕЗ потужними імпульсними електромагнітними полями. Для надійного обґрунтування ТТВ до зразків зброї ЕМІ необхідно попередньо мати якомога достовірніші конкретні дані щодо критеріальних рівнів ураження різних електрорадіоелементів. Їх можна отримати в результаті математичного моделювання з необхідним уточненням результатів моделювання фізичним експериментом.

Реальні умови бойового застосування зразків ЕМІ дуже різноманітні, складні й мінливі, через що переважна більшість вищеперелічених факторів має випадковий характер. Найбільш раціональним і адекватним у такій ситуації повинен би стати імовірнісний підхід до обґрунтування ТТВ, при якому практичне значення мала б, наприклад, не абстрактна дальність ураження зразка зброї ЕМІ, а імовірності ураження того чи іншого ступеня важкості тих чи інших РЕЗ на різних відстанях від точки його спрацювання.

Загальні розрахункові вирази для оцінки імовірнісних показників ефективності застосування зброї ЕМІ запропоновано, зокрема, в роботах [4, 5]. Різні аспекти стосовно побудови, класифікації, шляхів створення, технічних характеристик та принципів дії зброї ЕМІ висвітлені, наприклад, у теоретичних працях [1, 6–10]. Проте, на жаль, авторам не вдалося виявити дослідження, які б містили конкретні розрахункові чи експериментальні дані щодо рівнів та імовірностей ураження РЕЗ зразками зброї ЕМІ.

Очевидно, що для отримання таких даних необхідно проводити достатню кількість випробувань конкретних РЕЗ, радіотехнічних об'єктів та зразків ОБТ за допомогою імітаторів ЕМІ на спеціалізованих полігонах, надаючи результати випробувань статистичній обробці. В Україні є такі полігони з відповідним обладнанням, значна частина якого залишилася ще з радянських часів (щоправда, реальний стан цього обладнання потребує додаткового з'ясування). Однак попри це та прямі вимоги відповідних стандартів, як ще радянських, так і стандартів НАТО, про необхідність проведення обов'язкових випробувань зразків ОБТ на стійкість до електромагнітних випромінювань, зокрема ЕМІ, такі випробування в Україні останнім часом проводяться нерегулярно. Результатом цього стало те, що на даний час в Україні відсутні достовірні дані про імовірності ураження та єдина база критеріальних рівнів ураження зброєю ЕМІ як окремих радіоелектронних компонентів, так і зразків ОБТ у цілому.

За відсутності таких даних єдиним раціональним підходом при попередньому обґрунтуванні енергетичних характеристик зразків зброї ЕМІ, необхідних для

ураження конкретних РЕЗ, залишається спрощений детерміністський підхід, що враховував би тільки найбільш важливі й незмінні фактори, вплив яких найсуттєвіший. При цьому для надійності оцінок тих параметрів, точні величини яких невідомі, можна брати їхні середні значення або ж, в окремих випадках, застосовувати граничні оцінки (максимальні чи мінімальні значення деяких параметрів).

Метою даної статті є розробка такого підходу та отримання за його допомогою попередніх оцінок дальності дії та розмірів зон ураження зброї ЕМІ за різних параметрів її функціонування для обґрунтування тактико-технічних вимог до перспективних зразків зброї ЕМІ.

Обґрунтування рівня гарантованого функціонального ураження. Вирішення задачі обґрунтування дальності дії, розмірів зон ураження та інших тактико-технічних параметрів і характеристик зразків зброї ЕМІ, що плануються до розробки, будемо проводити на основі розробленої в [11] методики розрахунку густини потоку випромінювання зразків електромагнітної зброї в місці розташування об'єкта ураження.

Загальна схема розрахунку виглядає так. Спочатку визначається густина потоку випромінювання Π [Вт/м²] зразка зброї ЕМІ в місці розташування об'єкта ураження за формулою [11]

$$\Pi = \frac{PG}{4\pi R^2} L^2 F^2(\alpha), \quad (1)$$

де P – імпульсна потужність зразка зброї ЕМІ, Вт; G – коефіцієнт підсилення зразка зброї ЕМІ в максимумі ДС його антенної системи; R – відстань від зразка зброї ЕМІ до об'єкта ураження, м; L^2 – квадрат множника ослаблення, який характеризує конкретні особливості поширення радіохвиль під час ураження; $F^2(\alpha)$ – значення нормованої ДС антенної системи в напрямку цілі, що задається величиною кута α .

Для спрощення подальшого розгляду обмежимося граничним ідеальним випадком $L^2 = 1$, коли вплив навколишнього середовища на умови поширення радіохвиль відсутній. За необхідності (наприклад, у випадку поширення електромагнітної хвилі вздовж земної поверхні) розрахунки можна уточнити, припустивши, наприклад, як це зроблено в [11], що на відкритій місцевості $L^2 \approx 0,3 \dots 0,7$, а на пересіченій місцевості та в населених пунктах $L^2 \approx 0,1 \dots 0,3$.

Знання величини густини потоку випромінювання Π в місці розташування РЕЗ, що уражається, насправді є лише першим, найбільш легким завданням. Наступний етап ідеальної методики розрахунку уражального впливу зброї ЕМІ на об'єкти ураження повинен був би передбачати визначення шляхів проникнення електромагнітної енергії до найбільш уразливих до впливу ЕМІ елементів РЕЗ та величини її ослаблення. На цьому етапі мав би здійснюватися перехід від значення Π до потужності P_{ef} [Вт], яка виділяється на елементі РЕЗ, що зазнає функціонального ураження:

$$P_{ef} = \Pi S_{ef}. \quad (2)$$

Параметр S_{ef} з розмірністю площі, який може бути названо «ефективною площею поглинання», узагальнено характеризує «поглинальну здатність» зразка РЕЗ щодо випромінювання ЕМІ. Він залежить як від параметрів самого випромінювання ЕМІ (його часових, частотних та поляризаційних характеристик), так і від безлічі інших факторів, що характеризують конкретне конструктивне виконання РЕЗ. Тому точне значення параметра S_{ef} , як правило, невідоме.

Так само невідомим, залежним від багатьох умов (температури, атмосферного тиску, напруги живлення тощо) і через те певною мірою випадковим є точне значення мінімальної поглинутої елементом РЕЗ потужності P_{up} електромагнітного поля, за якої відбувається його функціональне ураження.

Через суттєву невизначеність параметрів S_{ef} і P_{up} зазначена ідеальна методика розрахунку уражального впливу зброї ЕМІ на об'єкти ураження є мало придатною для практичного застосування. Більш практичним і доцільним при орієнтовних розрахунках ефективності застосування зброї ЕМІ може бути інший підхід, який передбачає встановлення певного рівня густини потоку електромагнітного випромінювання Π_0 , за якого відбувається гарантоване функціональне ураження переважної більшості РЕЗ, не обладнаних спеціальними системами захисту від ЕМІ. Спробуємо якимось чином раціонально обґрунтувати величину Π_0 .

Відомо [10, 12], що під впливом поодиноких імпульсів тривалістю $\tau > 10$ нс напівпровідникові прилади діапазону 1–10 ГГц, що є одними з найуразливіших до дії ЕМІ, уражаються при імпульсній потужності в місці розташування приладу 5–10 Вт. Найбільш сильно впливає (при найменшій енергії або потужності ураження) зброя ЕМІ при проникненні через антену РЕЗ. Припустимо для прикладу, що випромінювання ЕМІ сантиметрового діапазону потрапляє до напівпровідникового змішувача радіолокаційного приймача за боковими пелюстками з доволі низьким рівнем –35 дБ через дзеркальну антену півметрового діаметра, зазначаючи при цьому додаткового ослаблення 10 дБ у фідерному тракті. Нескладно підрахувати, що навіть у цьому випадку, характерному для достатньо захищеної від впливу ЕМІ радіолокаційної станції, величина S_{ef} становитиме

$$S_{ef} = \pi \cdot 50^2 \cdot 10^{-\frac{45}{10}} \approx 0,25 \text{ см}^2.$$

За формулою (2), вибравши середнє значення $P_{up} = 7,5$ Вт, отримаємо таку оцінку рівня Π_0 :

$$\Pi_0 = \frac{7,5}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 300 \text{ кВт/м}^2.$$

Дана оцінка збігається з прийнятим у спеціальній англомовній літературі визначенням так званого Conservative Kill Criterion (що приблизно можна перекласти як «критерій гарантованого ураження»): два імпульси тривалістю 30 нс з густиною потоку випромінювання 30 Вт/см² з певним запасом забезпечують ураження більшості РЕЗ, що зазнали такого впливу.

У подальших розрахунках дальності дії, розмірів зон ураження та інших тактико-технічних параметрів і характеристик зразків зброї ЕМІ будемо виходити саме з цього граничного рівня. Вважатимемо, що переважно більшість РЕЗ противника буде уражено, якщо в місці їх розташування зразок ЕМІ створить електромагнітне поле з густиною потоку $\Pi_0 = 300 \text{ кВт/м}^2$ і більше.

Враховавши відомий зв'язок [13, 14] вектора Пойнтінга Π і напруженості електричного поля E електромагнітної хвилі в далекій зоні випромінювача

$$\Pi = \frac{E^2}{120\pi}, \quad (3)$$

де $120\pi \approx 377 \text{ Ом}$ – хвильовий опір середовища поширення електромагнітної хвилі – земної атмосфери, зазначимо, що густині потоку $\Pi_0 = 300 \text{ кВт/м}^2$ відповідає напруженість електричного поля $E_0 \approx 10 \text{ кВ/м}$.

Параметр ER і максимальна дальність ураження. При оцінці дальності ураження зразків зброї ЕМІ дуже зручним у користуванні параметром є добуток напруженості електричного поля E в максимумі ДС та відстані R , так званий параметр ER . Оскільки напруженість електричного поля будь-якої антенної системи в її далекій зоні змінюється за законом R^{-1} , параметр ER не залежить від відстані й визначається лише енергетичними та спрямувальними властивостями зразка зброї ЕМІ.

Визначивши в результаті точних вимірювань напруженості електричного поля або теоретичних розрахунків величину параметра ER , можна дуже просто, за допомогою очевидного й простого співвідношення

$$h_{\max} = \frac{ER}{E_0} \quad (4)$$

обчислити максимальну (у напрямі максимуму ДС антенної системи) дальність ураження h_{\max} зразка

зброї ЕМІ. Величина E_0 у формулі (4) має фізичний зміст напруженості електричного поля, при якому відбувається ураження РЕЗ. Підставивши до рівняння (4) значення $E_0 \approx 10 \text{ кВ/м}$, що відповідає рівню гарантованого функціонального ураження РЕЗ, можливо ще більше спростити формулу для визначення максимальної дальності ураження зразків зброї ЕМІ

$$h_{\max} \approx \frac{(ER)_{\text{кВ}}}{10}. \quad (5)$$

Виразивши в рівнянні (3) густину потоку Π через формулу (1) і поклавши в ній $L^2 = 1$ та $F^2(\alpha) = 1$, отримаємо співвідношення

$$ER = \sqrt{30PG}, \quad (6)$$

$$(ER)_{\text{кВ}} = 173,2\sqrt{P_{\text{ГВт}}G}. \quad (7)$$

Індекси «кВ» та «ГВт» в рівняннях (5) і (7) означають, що при користуванні ними параметр ER та імпульсну потужність зразка зброї ЕМІ P слід вимірювати не в одиницях СІ, а в більш практичних одиницях: у кіловольтах та гігаватах відповідно.

Зазначимо, що залежно від коефіцієнта підсилення застосованої антени значення параметра ER зразків зброї ЕМІ з імпульсною потужністю порядку 1 ГВт коливаються від 200–300 кВ для боеприпасів ЕМІ зі слабкоспрямованою антеною невеликих електричних розмірів (порівняно з довжиною хвилі) до понад 30 МВ для комплексів спрямованого випромінювання з апертурними антенами діаметром до кількох метрів, що мають ДС із шириною головної пелюстки близько 1° .

Для орієнтовної оцінки параметра $(ER)_{\text{кВ}}$, а відтак і максимальної дальності ураження зразків зброї ЕМІ, можна крім формули (7) запропонувати кілька інших розрахункових співвідношень. Так, зокрема, враховуючи відому [11, 13] залежність коефіцієнта підсилення антени G від ширини головної пелюстки вісесиметричної нормованої ДС на рівні половинної потужності

$$\Delta\alpha_{0,5}, \quad G \approx \frac{32000}{(\Delta\alpha_{0,5})^2}, \text{ отримаємо оцінку}$$

$$(ER)_{\text{кВ}} \approx 3,1 \cdot 10^4 \frac{\sqrt{P_{\text{ГВт}}}}{\Delta\alpha_{0,5}}, \quad (8)$$

де параметр $\Delta\alpha_{0,5}$ вимірюється в кутових градусах.

Перспективними для застосування в зразках зброї ЕМІ є широкосмугові антени апертурного типу. Для круглої апертури діаметром d коефіцієнт підсилення G можна оцінити за формулою [11, 13]

$$G = \left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)^2 K_{\text{ен}}, \quad (9)$$

в якій λ – довжина хвилі, що відповідає середній частоті f робочого діапазону частот; $K_{\text{ен}}$ – так званий коефіцієнт використання поверхні апертури.

Після підстановки до формули (7) рівняння (9) з $K_{\text{ен}} \approx 0,8$ маємо

$$(ER)_{\text{кВ}} \approx 487\sqrt{P_{\text{ГВт}}}\frac{d}{\lambda}. \quad (10)$$

Так як $\lambda = \frac{300}{f_{\text{МГц}}}$ [11], можливий інший варіант розрахункового співвідношення (10):

$$(ER)_{\text{кВ}} \approx 1,62\sqrt{P_{\text{ГВт}}f_{\text{ГГц}}d_{\text{мм}}}. \quad (11)$$

При застосуванні інженерної формули (11) усі параметри виражають у практичних одиницях, зокрема частоту – у гіггерцах, а діаметр круглої апертурної антени – у міліметрах.

Якщо для ураження радіоелектронних засобів противника в зразку зброї ЕМІ здійснюється генерація не радіоімпульсів, а коротких надширокосмугових відеоімпульсів наносекундної тривалості, поняття середньої частоти і середньої довжини хвилі певною мірою втрачають практичний зміст. У цьому випадку при оцінці уражальних можливостей зброї ЕМІ більш коректно застосовувати такий параметр, як тривалість імпульсу τ . Оскільки тривалість імпульсу й ширину його смуги частот Δf пов'язує відоме в радіотехніці рівняння неви-

значеності $\Delta f \tau \approx 1$, а середня частота спектра відеоімпульсу $f \approx \frac{\Delta f}{2}$, то очевидно, що

$$f \approx \frac{1}{2\tau} \text{ або } f_{ГГц} \approx \frac{1}{2\tau_{нс}}. \quad (12)$$

Виражаючи у формулі (11) величину $f_{ГГц}$ за допомогою співвідношення (12), отримуємо таке рівняння для оцінки параметра $(ER)_{кВ}$:

$$(ER)_{кВ} \approx 0,81 \sqrt{P_{ГВт}} \frac{d_{дмм}}{\tau_{нс}}. \quad (13)$$

Скориставшись формулою (13), нескладно розрахувати, що, наприклад, зразок зброї ЕМІ, який через антену діаметром 500 мм випромінює імпульс тривалістю 1 нс і потужністю 1 ГВт, створює уражальний вплив, що характеризується величиною параметра $ER \approx 400$ кВ. Згідно з рівнянням (5), поділивши цю величину на коефіцієнт 10, отримуємо максимальну дальність ураження зразка зброї ЕМІ $h_{\max} \approx 40$ м.

Радіус і площа зони ураження. Розглянемо типову модельну задачу бойового застосування зброї ЕМІ – ураження наземного об'єкта зразком зброї ЕМІ з повітря. Комплекс спрямованого випромінювання повітряного базування чи боеприпас ЕМІ у вигляді бойової частини керованої ракети, авіаційної бомби або артилерійського снаряда за допомогою відповідного носія доставляється в точку А, розташовану на висоті h над об'єктом, що уражається, як показано на рис. 1. Антена система зразка зброї ЕМІ орієнтується вертикально вниз. Зразок зброї ЕМІ спрацьовує, і потужний імпульс електромагнітного випромінювання здійснює функціональне ураження радіоелектронних засобів, що знаходяться на земній поверхні всередині зони ураження площею S_{yp} .

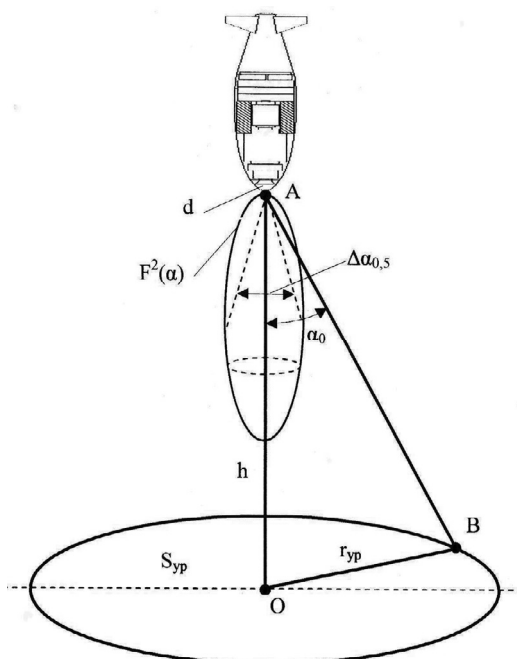


Рис. 1. Схема бойового застосування зброї ЕМІ

Принадібно зауважимо, що всі отримані в результаті розгляду цієї модельної задачі результати можуть бути очевидним способом узагальнені, наприклад, на випадок ураження повітряних цілей. При цьому треба замість висоти вести мову про дальність до цілі, а під радіусом і площею зони ураження розуміти відповідні параметри в площині, перпендикулярній до лінії, що з'єднує зразок зброї ЕМІ і ціль.

Для спрощення подальшого розгляду обмежимося випадком осесиметричної ДС, коли слід межі зони ураження на земній поверхні являє собою коло радіусом r_{yp} , у всіх точках якого густина потоку випромінювання дорівнює рівню гарантованого функціонального ураження РЕЗ Π_0 (застосування в зразках зброї ЕМІ антен з вісесиметричною ДС є найбільш раціональним і доцільним варіантом, оскільки при цьому знімається проблема точного орієнтування антени для забезпечення необхідної форми зони ураження, яку попередньо ще необхідно достовірно встановити). Величинами, що підлягають визначенню, є радіус зони ураження r_{yp} та площа цієї зони

$$S_{yp} = \pi r_{yp}^2. \quad (14)$$

З урахуванням геометрії задачі (трикутник АОВ на рис. 1) маємо очевидну формулу для розрахунку радіуса зони ураження

$$r_{yp} = h \operatorname{tg} \alpha_0. \quad (15)$$

Невідомий кут α_0 у рівнянні (15) можна відшукати в результаті розв'язання рівняння

$$\Pi_0 = \frac{PG}{4\pi(h^2 + r_{yp}^2)} F^2(\alpha) = \frac{PG}{4\pi h^2} \cos^2 \alpha F^2(\alpha). \quad (16)$$

Значимо, що функція кута $g^2(\alpha) = \cos^2(\alpha) F^2(\alpha)$ у формулі (16) сягає свого максимального значення, що дорівнює одиниці, при $\alpha = 0$. Отже, існує гранична висота спрацювання зразка зброї ЕМІ

$$h_{\max} = \sqrt{\frac{PG}{4\pi\Pi_0}}, \quad (17)$$

яка за заданих параметрах P , G і Π_0 ще забезпечує ураження наземної цілі. З урахуванням формули (17) рівняння (16) можливо подати у вигляді

$$g^2(\alpha) = \cos^2(\alpha) F^2(\alpha) = \left(\frac{h}{h_{\max}}\right)^2. \quad (18)$$

При спрацюванні зразка зброї ЕМІ на висоті h_{\max} здійснюється ураження наземних РЕЗ, розташованих лише в точці О (рис. 1) – у напрямку максимуму ДС антени. Радіус зони ураження r_{yp} в цьому випадку наближається до нуля. Так само дуже малою залишатиметься величина r_{yp} при спрацюванні зброї ЕМІ безпосередньо над точкою О на невеликій висоті. З елементарних міркувань очевидно, що при поступовому збільшенні висоти спрацювання зброї ЕМІ від 0 до h_{\max} радіус зони ураження r_{yp} спочатку зростатиме, на деякій висоті h_{opt} досягне свого максимального значення, а при подальшому збільшенні h знову зменшуватиметься до нуля через різке зменшення кута α_0 (див. формули (15) і

(18)). Зрозуміло, що для завдання противнику найбільшої шкоди необхідно намагатися, щоб зразки зброї ЕМІ спрацювали на висоті h_{opt} , оскільки в цьому випадку радіус і площа зони ураження будуть максимальними. Тому вкрай важливо правильно розрахувати величину h_{opt} .

Розглянемо цю проблему детальніше. Конкретний вигляд функціональної залежності радіуса ураження зразка зброї ЕМІ від висоти h , на якій він спрацював, відповідно до рівнянь (15) та (18) визначається формою ДС його антенної системи $F^2(\alpha)$ у межах головної пелюстки. Для отримання кількісних результатів проведемо розрахунок зазначеної залежності на прикладі круглих апертурних антен (конічні рупори, дзеркала у формі параболоїда обертання тощо), застосування яких перспективне в зразках зброї ЕМІ. Як відомо [15], ДС круглої синфазної апертури діаметром d може бути апроксимовано формулою

$$F^2(\alpha) = \left(\frac{J_1\left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\pi \frac{d}{\lambda} \sin \alpha} (1 + \cos \alpha) \right)^2, \quad (19)$$

де $J_1(x)$ – функція Беселя першого порядку від аргументу x .

Типовий вигляд функції $g^2(\alpha) = \cos^2(\alpha)F^2(\alpha)$ круглих синфазних апертурних антен, розрахований з використанням формули (19), показано на рис. 2 (для випадку $d = 5\lambda$). Для розрахунку радіуса ураження зразка зброї ЕМІ з такою антеною при заданих значеннях висоти спрацювання h та максимальної дальності ураження h_{max} можливо скористатися графічним або аналітичним способами.

При застосуванні графічного способу необхідно:

за графіком на рис. 2 знайти невідомий кут α_0 , при

якому, згідно з рівнянням (18), функція $g^2(\alpha)$ приймає значення $\left(\frac{h}{h_{max}}\right)^2$;

розрахувати r_{yp} за допомогою формули (15).

Перевагою такого способу є його відносна простота, а очевидним недоліком – необхідність мати під рукою сімейство заздалегідь підготовлених графіків функції $g^2(\alpha)$ для різних розмірів антени (значень відношення $\frac{d}{\lambda}$).

У сучасних умовах графічний спосіб виглядає дещо архаїчним, адже навіть найпростіші комп'ютерні

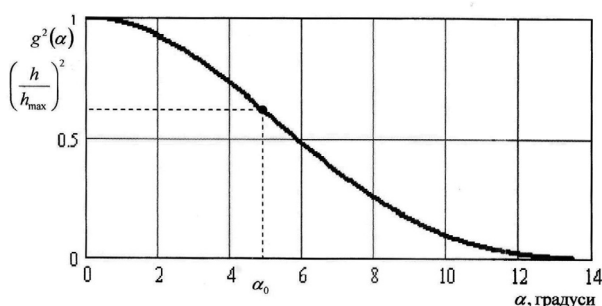


Рис. 2. Графік функції $g^2(\alpha)$ круглої апертурної антени ($d = 5\lambda$)

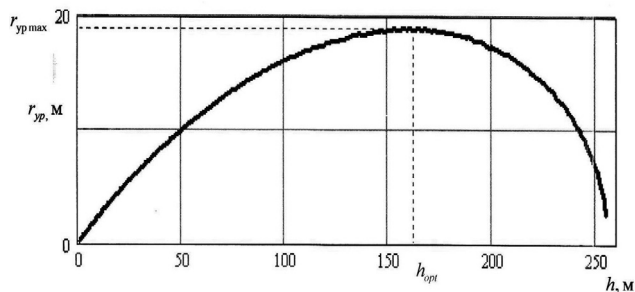


Рис. 3. Залежність r_{yp} від висоти спрацювання зброї ЕМІ

програми типу Mathcad мають достатньо розвинуті засоби пошуку коренів трансцендентних рівнянь на основі чисельних аналітичних методів. Результати розрахунків, наведені далі в статті, отримані саме аналітичним способом.

На рис. 3 показано шукану залежність радіуса ураження r_{yp} зразка зброї ЕМІ з круглою апертурною антеною від висоти спрацювання для випадку $d = 5\lambda$.

Як можна бачити, рис. 3 наочно демонструє відзначену вище особливість: для кожного зразка зброї ЕМІ існує оптимальна висота h_{opt} його спрацювання, за якої радіус зони ураження досягає свого максимального значення $r_{yp, max}$.

Результати розрахунків. Деякі результати розрахунків параметрів зброї ЕМІ, проведених за допомогою розробленого в статті підходу, надано в табл. 1. Дані таблиці відповідають таким умовам:

тип антени – синфазна кругла апертурна антена діаметром d ;

пікова потужність радіоімпульсу – $P = 1$ ГВт;

середня довжина хвилі радіоімпульсу – $\lambda = 3$ см;

критеріальний рівень ураження $\Pi_0 = 300$ кВт/м² ($E_0 = 10$ кВ/м), який забезпечує гарантоване функціональне ураження РЕЗ.

Аналізуючи дані таблиці, можна відзначити такі закономірності.

1. Зі збільшенням діаметра антенної системи, за всіх інших незмінних умов, випромінювання зразка зброї ЕМІ стає все більш спрямованим і концентрується в секторі все меншої кутової ширини $\Delta\alpha_{0,5}$. Це приводить до збільшення за квадратичним законом коефіцієнта підсилення антени G та лінійного зростання параметра ER і, як наслідок, до максимальної дальності ураження h_{max} та оптимальної висоти (дальності) спрацювання h_{opt} , при якій радіус зони ураження найбільший.

2. За гігаватного рівня потужності генератора електромагнітного імпульсу (типового для сучасного етапу розвитку цих засобів) максимальна дальність гарантованого функціонального ураження РЕЗ становить від кількох десятків метрів при застосуванні в зразку зброї ЕМІ слабкоспрямованих антен малих габаритних розмірів, до понад 2,5 км у разі використання гостроспрямованих дзеркальних антен кількадеметрового діаметра з шириною головної пелюстки порядку 1° і менше.

3. Цілком зрозуміло, що габаритні й важкі антени, доповнені підсистемами точного наведення вузького променя на ціль, можна без проблем розміщувати лише на стаціонарних чи рухомих зразках зброї ЕМІ

Таблиця 1. Розрахункові параметри зброї ЕМІ

d , см	G	$\Delta\alpha_{0,5}$, градуси	ER , кВ	h_{\max} , м	h_{opt} , м	$\frac{h_{opt}}{h_{\max}}$	$r_{yp\max}$, м
3	9,9	59,0	544	51,2	28	0,55	17,3
6	39,5	29,5	1088	102,3	62	0,61	18,6
9	88,8	19,7	1632	153,5	95	0,62	18,8
12	157,9	14,8	2176	204,7	125	0,61	18,9
15	246,7	11,8	2721	255,8	160	0,62	19,0
18	355,3	9,8	3265	307,0	193	0,63	19,0
21	483,6	8,4	3809	358,1	226	0,63	19,0
24	631,6	7,4	4353	409,3	257	0,63	19,0
27	799,4	6,6	4897	460,5	293	0,64	19,0
30	987,0	5,9	5441	511,7	323	0,63	19,1
60	3948	3,0	10880	1023	642	0,63	19,3
90	8883	2,0	16320	1535	971	0,63	19,4
120	15790	1,5	21760	2047	1307	0,64	19,6
150	24670	1,2	27210	2558	1648	0,64	19,8

наземного або повітряного базування, реалізованих у варіанті великих комплексів спрямованого випромінювання. Такі комплекси здатні здійснювати дистанційне функціональне ураження РЕЗ зі значної відстані, достатньої, щоб гарантувати необхідний рівень самозахисту від застосування зброї противника у відповідь.

З іншого боку, малогабаритні й легкі антени, що забезпечують невелику максимальну дальність ураження, найбільш доцільно й раціонально встановлювати на зразках зброї ЕМІ одноразового застосування, так званих боеприпасів ЕМІ. За необхідності бойового застосування боеприпасів ЕМІ по точкових цілях (РЕЗ окремого броньованого об'єкта, літального апарата тощо) потрібно забезпечити спрацювання боеприпасу ЕМІ якомога ближче до об'єкта ураження. У той же час, при ураженні розосереджених цілей, що займають значну площу (пункти управління, вузли зв'язку, важливі об'єкти інфраструктури тощо), для досягнення максимального радіуса зони ураження необхідно, щоб боеприпас ЕМІ спрацював у точці, віддаленій від центра зони ураження на певну відстань h_{opt} , значення якої можна визначити з наведеної таблиці.

Антенні системи з розмірами в десятки сантиметрів, що неможливо встановити на типових засобів доставки боеприпасів ЕМІ (керованих ракетах, авіаційних бомбах, артилерійських снарядах невеликих калібрів) і які забезпечують максимальну дальність ураження кількох сот метрів, можуть знайти застосування в такому перспективному варіанті виконання зброї ЕМІ, як мобільні комплекси спрямованого випромінювання (КСВ). Так звані мобільні КСВ, що займають проміжну позицію між великими КСВ наземного чи повітряного базування й боеприпасами ЕМІ, найбільш доцільно реалізовувати на основі спеціалізованих безпілотних літальних апаратів середнього класу. Такі безпілотники з генератором ЕМІ багаторазового використання на борту мають виводитися в точку, з якої можливо здійснити гарантоване функціональне ураження заданої цілі (виходячи з наявних енергетичних параметрів генератора ЕМІ), а потім повертатися в безпечний район для підготовки до повторного бойового застосування.

4. Величина відношення $\frac{h_{opt}}{h_{\max}}$ коливається в невеликому інтервалі 0,55–0,64. Враховуючи положистий характер залежності радіуса ураження r_{yp} від висоти спрацювання зброї ЕМІ h у районі максимуму (див. рис. 3), без істотної похибки можна запропонувати таку формулу розрахунку величини h_{opt} :

$$h_{opt} \approx 0,63h_{\max}, \quad (20)$$

в якій значення параметра h_{\max} визначається за допомогою рівнянь (5) або (17).

5. Хоча при збільшенні розмірів антени й ступеня спрямованості випромінювання оптимальна дальність спрацювання зразка зброї ЕМІ h_{opt} зростає, максимальний радіус ураження $r_{yp\max}$ при цьому залишається практично незмінним. У першому наближенні він визначається лише енергетикою P застосованого генератора й критеріальним рівнем ураження РЕЗ Π_0 або E_0 . Іншими словами, використання більш спрямованої антени дозволяє збільшити дальність ураження, але не може суттєво вплинути на максимальні розміри зони ураження. Єдиним способом розширення зони ураження може бути тільки підвищення імпульсної потужності генератора ЕМІ.

6. Результати проведеного математичного моделювання підтверджують справедливості таких формул розрахунку максимальних радіуса і площі зони ураження

$$r_{yp\max} \approx 0,33 \sqrt{\frac{P}{\Pi_0}}; \quad S_{yp\max} \approx 0,34 \frac{P}{\Pi_0}. \quad (21)$$

Скориставшись формулами (21), зокрема знаходимо, що при $P=1$ ГВт і $\Pi_0=300$ кВт/м² $r_{yp\max} \approx 19$ м, а $S_{yp\max} \approx 1130$ м².

Висновки:

1. За відсутності достовірних даних про імовірності та рівні ураження радіоелектронних компонентів і зразків ОБТ попереднє обґрунтування енергетичних характеристик зразків зброї ЕМІ, необхідних для ураження конкретних РЕЗ, може бути виконане на основі спрощеного детерміністського підходу, розробленого в статті.

2. Розрахунки дальності дії, розмірів зон ураження та інших тактико-технічних параметрів і характеристик зразків зброї ЕМІ доцільно проводити, виходячи з рівня гарантованого функціонального ураження РЕЗ, не обладнаних спеціальними системами захисту від ЕМІ, який становить 300 кВт/м^2 для густини потоку електромагнітного випромінювання і 10 кВ/м для напруженості електричного поля в місці розташування об'єкта ураження.

3. Максимальну дальність ураження h_{max} зразків зброї ЕМІ можливо орієнтовно оцінити, поділивши величину параметра ER , виражену в кіловольтах, на десять. Значення параметра ER можна отримати в результаті точних вимірювань напруженості електричного поля або за допомогою розрахункових формул, запропонованих у статті.

4. За гігаватного рівня потужності генератора електромагнітного імпульсу (типового для сучасного етапу розвитку цих засобів) максимальна дальність гарантованого функціонального ураження РЕЗ становить від кількох десятків метрів при застосуванні в зразку зброї ЕМІ слабкоспрямованих антен малих габаритних розмірів, до понад $2,5 \text{ км}$ у разі використання гостроспрямованих дзеркальних антен кількаметрового діаметра з шириною головної пелюстки порядку 1° і менше.

5. При ураженні розосереджених цілей, що займають значну площу (пункти управління, вузли зв'язку, важливі об'єкти інфраструктури тощо), для досягнення максимального радіуса зони ураження необхідно, щоб зразок зброї ЕМІ спрацював у точці, віддаленій від центра зони ураження на оптимальну відстань $h_{\text{opt}} \approx 0,63h_{\text{max}}$.

6. Величина максимального радіуса ураження в першому наближенні визначається лише потужністю застосованого генератора й критеріальним рівнем ураження РЕЗ. Використання більш спрямованої антени дозволяє збільшити дальність ураження, але не може суттєво вплинути на максимальні розміри зони ураження. Єдиним дієвим способом розширення зони ураження може бути тільки підвищення імпульсної потужності генератора ЕМІ.

7. Наведені в статті розрахункові дані щодо дальності ураження та розмірів зони ураження стосуються випадку гарантованого (з певним запасом) функціонального ураження більшості РЕЗ, не обладнаних спеціальними пристроями захисту від ЕМІ. Тому слід очікувати, що в багатьох випадках реальні дальність ураження й радіус зони ураження тих чи інших РЕЗ можуть дещо перевищувати значення, подані у табл. 1. За наявності точних даних щодо потужності генератора зразка зброї ЕМІ, коефіцієнта підсилення його антенної системи та критеріального рівня ураження зразка РЕЗ (встановленого за результатами відповідних випробувань на спеціальних полігонах), за допомогою запропонованих у статті формул можна обчислити значення дальності ураження й радіус зони ураження для конкретних умов застосування зброї ЕМІ.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ковтуненко О. П., Богучарський В. В., Слюсар В. І., Федоров П. М. Зброя на нетрадиційних принципах дії : стан, тенденції, принцип дії та захист від неї. Полтава : Вид-во ПВІЗ, 2006. 247 с.
2. Федоров П. М., Богучарський В. В. Місце нетрадиційної зброї в системі сучасних видів зброї // Збірник наук. праць / ЦНДІ ОВТ ЗС України. Вип. 2(61). К. : ЦНДІ ОВТ ЗС України, 2016. С. 200–205.
3. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М. : Связь, 1972. 336 с.
4. Сотников А. М., Лупандин В. А., Кожушко Я. Н., Сидоренко Р. Г. Показатель оценки эффективности применения артиллерийских, реактивных снарядов и ракет, которые оснащены боевыми частями электромагнитного действия // Збірник наук. праць ХУПС. Вип. 1 (23). Харків : ХУПС, 2010. С. 22–24.
5. Семененко О. М., Иванов В. Л., Сушак М. Б. Методичний підхід до оцінювання ефективності застосування електромагнітної імпульсної зброї // Збірник наук. праць ДНДІА. Вип. 13 (20). К. : ДНДІА, 2017. С. 92–98.
6. Kopp C. The Electromagnetic bomb – a Weapon of Electrical Mass Destruction. URL: <http://www.globalsecurity.org/military/library/report/1996/apjemp.htm>.
7. Черниш О. М., Певцов Г. В., Авчінніков Є. О., Лупандін В. А. Основні тенденції створення електромагнітної зброї // Системи озброєння і військова техніка. Вип. 4 (16). Харків : ХУПС, 2008. С. 5–15.
8. Кравченко В. И. Электромагнитное оружие. Харьков : Изд-во НТУ “ХПИ”, 2008. 185 с.
9. Benford J., Swegle J. A. Edl Schamiloglu High Power Microwaves. 2007. 532 p.
10. Добькин В. Д., Куприянов А. И., Пономарев В. Г., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем. М. : Вузовская книга, 2007. 463 с.
11. Федоров П. М., Богучарський В. В., Гамалій Н. В. Методика розрахунку густини потоку випромінювання зразків електромагнітної зброї // Збірник наук. праць / ЦНДІ ОВТ ЗС України. Вип. 4 (59). К. : ЦНДІ ОВТ ЗС України, 2015. С. 168–180.
12. Федоров П. М., Богучарський В. В., Гамалій Н. В. Оцінка реальних уражальних можливостей сучасної зброї електромагнітного імпульсу // Збірник наук. праць / ЦНДІ ОВТ ЗС України. Вип. 3 (62). К. : ЦНДІ ОВТ ЗС України, 2016. С. 165–176.
13. Modern Antenna Handbook / Ed. by C.A. Balanis. 2008. 1680 p.
14. Milligan T.A. Modern Antenna Design. A John Wiley & Sons, 2005. 633 p.
15. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / под ред. В. Н. Дулина, М. С. Жука. М. : Энергия, 1977. 576 с.

1. Ковтуненко О. П., Богучарський В. В., Слюсар В. І., Федоров П. М. Зброя на нетрадиційних принципах

Рецензент А. С. Довгополий, д-р техн. наук, проф.
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України)