

**УДК 681.3**

*О.В. Закора, к.т.н., доцент, ст. викладач, НУЦЗУ,  
А.Б. Фещенко, к.т.н., доцент, доц. кафедри, НУЦЗУ*

**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ГЛИБИНИ ЗАЛЯГАННЯ  
БОЄПРИПАСУ У БАГАТОКАНАЛЬНОМУ ПРИЙМАЧІ  
МІНОШУКАЧА VLF-СИСТЕМИ**

(представлено д.філос. Б. Сцакал)

Запропоновано розрахункову методику визначення глибини залягання боєприпасу, яка ґрунтується на порівнянні амплітуд сигналів, прийнятих багатоканальною прийомною системою, що використовує спеціальні конструкції багатоелементних антен металодетектора. Наводяться аналітичні та графічні матеріали для реалізації розрахункової методики.

**Ключові слова:** гуманітарне розмінування, глибина об'єкту, VLF.

**Постановка проблеми.** Підвищення об'єму задач ДСНС України щодо проведення гуманітарного розмінування, пов'язане з наслідками бойових дій на сході держави й збільшенням випадків аварій у місцях зберігання боєприпасів, вимагає вдосконалення існуючих та розробки нових технічних засобів, що застосовуються при пошуку та знешкодженні вибухонебезпечних об'єктів. До "Very Low Frequency" або "VLF" відносять TR-металодетектори (МД типу "передача-прийом") з безперервним випромінюванням сигналу на певній частоті з діапазону від 3 до 30 кГц. Однією з актуальних проблем гуманітарного розмінування є розробка ефективних пошукових приладів забезпечення пошукових робіт та безпеки праці в зоні надзвичайної ситуації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботах [1-3] обґрунтовано доцільність використання активного зондування для виявлення вибухових пристроїв, які розташовані у товщі ґрунту. У роботі [4] приведені результати експериментальних дослідження залежності амплітуди і фази сигналу мін типу "мінімальний склад металу" при використанні сучасного мінного детектора VLF, підтверджена висока залежність цих параметрів від форми і орієнтації міни у просторі. У роботі [5] подано основні технології, які використовуються у сучасних МД VLF, проведено аналіз сучасної ситуації щодо гуманітарного розмінування, дано загальну класифікацію металодетекторів, які можна використати, в тому числі, з метою пошуку боєприпасів, що містять мінімальний вміст металів, методів вирішення задач, які покладаються на сучасні VLF МД. Підкреслено також комерційну обмеженість публікацій у цій галузі.

**Постановка завдання та його вирішення.** Важливим напрямом вдосконалення сучасних міношукачів є розробка багатфункціональних

пошукових приладів з багатоканальною прийомною системою. Ціллю роботи є розробка методики і алгоритму визначення глибини залягання боєприпасу в багатоканальному приймачі міношукача VLF -системи. Особливістю випадку виміру глибини залягання боєприпасу (вертикальної відстані від антенної системи) є те, що в умовах підземного середовища розповсюдження радіохвилі випробують швидке поглинання. Сила сигналу від боєприпасу сильно залежить від його відстані до пошукових котушок. Магнітне поле швидко зменшується зі збільшенням відстані між передавальною котушкою і ціллю, і так само поле дуже швидко зменшується зі збільшенням відстані від цілі до приймальної котушки. Але особливістю цього процесу є те, що швидкість загасання, крім інших факторів, залежить також від розміру прийомної котушки. Припустимо, що ціль знаходиться безпосередньо на центральній осі котушки. Якщо в якості передавальної антени використовується котушка радіусу  $R$ , а відстань від цілі до котушки рівна  $d$ , то поле у цілі [4]

$$H = 2NI \frac{R^2}{(R^2 + d^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

де  $I$  – струм передачі;  $N$  – кількість обмоток котушки передачі.

На своєму зворотному шляху наведений боєприпасом сигнал зазнає таких саме втрат, тому поле біля прийомної котушки

$$H_{\text{пр}} = c \cdot \frac{R^2}{(R^2 + d^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

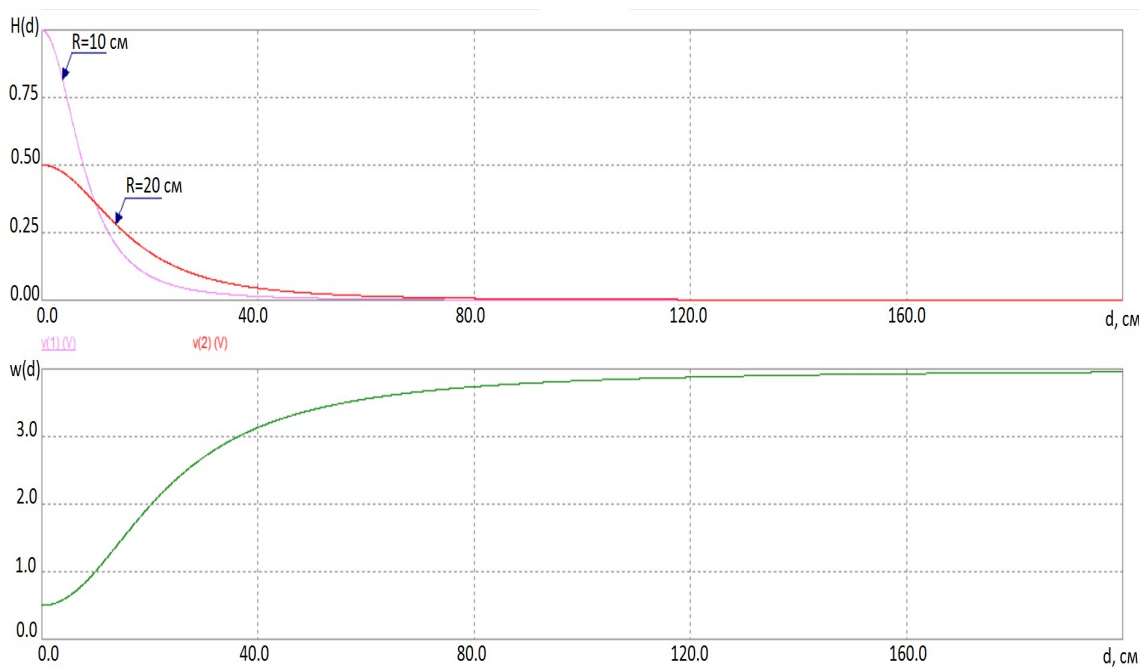
де  $c = \text{const}$  – коефіцієнт, який враховує вплив зовнішніх факторів, однакових для всіх прийомних котушок;  $R$  – радіус прийомної котушки.

Відомо, що велика котушка передавача при інших рівних параметрах створює інший розподіл напруги поля, чим поле маленької (рис. 1): на малих відстанях напруження великої котушки зменшується, а на великих перебільшує напруження малої [5]. Такі відміни дозволяють визначати вимірювану глибину шляхом порівняння сигналів двох прийомних каналів, амплітуди  $V_1$  і  $V_2$  яких пропорційні  $H_{\text{пр}1/2}$ .

При використанні двох прийомних каналів, обладнаних антенами радіусів  $R_1$  і  $R_2$ , розташованими на відстані  $d_1$  і  $d_2$  від цілі відповідно, якщо об'єкт пошуку є досить малим щодо котушок або досить далекім від них, можна розрахувати співвідношення амплітуд сигналів в прийомних каналах [5]

$$w = \frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1^2 (R_2^2 + d_2^2)^{3/2}}{R_2^2 (R_1^2 + d_1^2)^{3/2}} = \frac{R_1^2 (R_2^2 + (d_1 + \Delta d)^2)^{3/2}}{R_2^2 (R_1^2 + d_1^2)^{3/2}}, \quad (3)$$

де  $\Delta d = d_2 - d_1$  – різниця відстаней від котушок до боєприпасу.



**Рис. 1. а) Залежність напруженості магнітного поля  $H(d)$  для двох передаючих котушок різного радіуса від глибини  $d$ , см (поля нормовані до поля меншої котушки при  $d = 0$ ); б) Залежність відношення  $w(d)=V_1/V_2$  від глибини  $d$ , см, при  $\Delta d = 0$**

Це рівняння є лише функцією глибини боєприпасу і не залежить ні від його електричних властивостей, ні від властивостей навколишнього середовища. Перетворення останнього рівняння дозволяє розрахувати глибину відносно першої котушки  $d_1$ , як рішення квадратного рівняння

$$d_1^2 \left( w^{2/3} \frac{R_2^{4/3}}{R_1^{4/3}} - 1 \right) - 2d_1 \Delta d + (w^{2/3} R_2^{4/3} R_1^{2/3} - R_2^2 - \Delta d^2) = 0. \tag{4}$$

Але, якщо пара прийомних котушок є компланарною (розташована в одній площині), як їх зараз переважно виготовляють в антенних системах МД VLF, то  $\Delta d = 0$  і

$$d(w) = \sqrt{\frac{w^{2/3} R_1^{2/3} R_2^{4/3} - R_2^2}{1 - w^{2/3} (R_2/R_1)^{4/3}}}. \tag{5}$$

З метою спрощення розрахунку функції (5) можуть використовуватися розраховані чи табульовані значення цієї функції.

Отримувана на підставі виразу (5) методика визначення глибини залягання боєприпасу передбачає вимір амплітуд сигналів в двох прийомних каналах  $V_1$  і  $V_2$ , розрахунок їх співвідношення  $w = V_1/V_2$  і значення глибини з виразу (5) або відповідних графіків. В процесі

досліджень для розрахунку графіків функції використовувався математичний апарат системи прикладного схемотехнічного моделювання «Micro-Cap» 9-ї версії [7]. На рис.2 представлено графік функції (5) для випадку радіусів котушок  $R_1=20$  см і  $R_2=10$  см. Користуючись таким графіком, розрахованим заздалегідь з урахуванням параметрів антенної системи, що використовується двоканальним прийомним пристроєм, або безпосередньо виразом (5), можна перерахувати величину відношення вимірних амплітуд у значення глибини боєприпасу  $d$ .

Як видно з рисунку 1,б), найбільша швидкість зміни  $w(d)$  і, відповідно, краща точність виміру глибини, приходить на найбільш затребуваний на практиці діапазон від 0 до 40-50 см, хоча цей діапазон буде залежати від співвідношення параметрів котушок, що застосовуються.

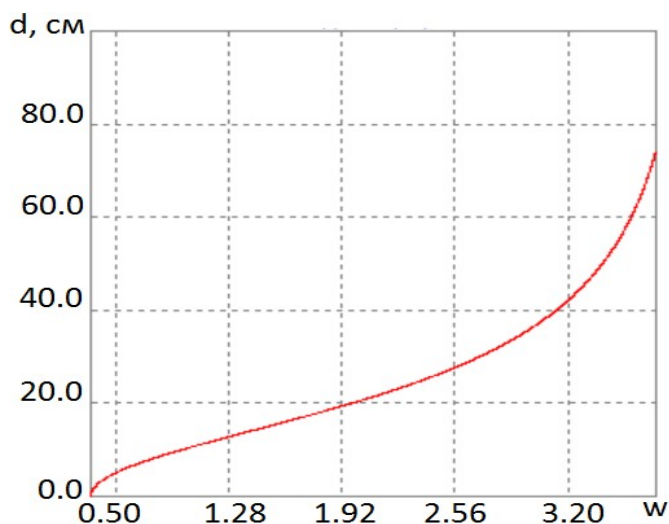


Рис. 2. Графік залежності глибини боєприпасу  $d$ , см, від співвідношення амплітуд відгуків цілі  $w$  при радіусах котушок  $R_1=20$  см і  $R_2=10$  см

Інша проблема, пов'язана з побудовою двоканальної прийомної системи, полягає в розробці конструкції антен, яка б забезпечила функціонування двох прийомних каналів. Відштовхуючись від найпоширеніших зараз конструкцій концентричної та "2D" антен VLF МД, можна передбачити, що найбільш придатними у випадку, що розглядаються, є їх трьохкотушкові аналоги (рис. 3).

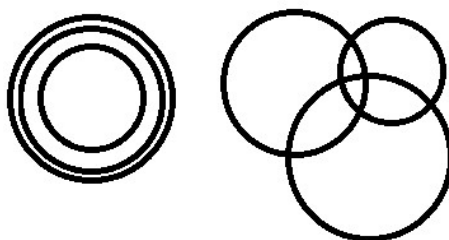


Рис. 3. Компланарні трьохкотушкові антенні системи типу «концентрична» та «3D»

Але більш якісний вибір цих систем вимагає проведення додаткових досліджень і натурних випробувань, так само як і вдосконалення роботи всієї схеми вимірювача у комплексі інших систем і пристроїв МД.

Введення третього та більшої кількості прийомних каналів з окремими котушками надає можливість збільшувати кількість незалежних оцінок параметру глибини, підвищувати точність оцінювання шляхом розрахунку усередненого значення параметру. Звичайно, таке збільшення ускладнює структуру прийомного тракту й антенної системи, але може бути доцільним, наприклад, у системах, які возяться, або застосовуються на пересувній транспортній базі.

**Висновки.** Для визначення глибини боєприпасу може використовуватися аналітична або графічна залежність глибини залягання від співвідношення амплітуд сигналів цілі, прийнятих багатоканальною прийомною системою. Отримана методика дозволяє вдосконалити алгоритм розрахунку глибини боєприпасу, що дозволить збільшити точність визначення його глибини, зменшити час і підвищити безпеку праці співробітників ДСНС України при виконанні завдань гуманітарного розмінування.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Seleenko Y.Y. Results from study of signal distortion in radar sensing of explosive devices in soil column [Електронний ресурс] / А.В. Feshchenko, О.В. Zakora, D.L. Sokolov// Проблеми надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗУ, 2016. – №23. – С. 164-167. Режим доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1351>.

2. Селеенко Е.Е. Магнитометрический метод подповерхностного зондирования взрывных устройств [Электронный ресурс] / А.Б.Фещенко, А.В. Загора// Збірник матеріалів науково-практичного семінару Проблеми цивільного захисту: профілактика, попередження та ліквідація надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗУ, 2017. – С.145-146. Режим доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5387>.

3. Селеенко Е.Е. Математическое моделирование электромагнитных откликов диэлектрических взрывоопасных предметов [Электронный ресурс] / А.Б.Фещенко, А.В. Загора// Проблеми надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗУ, 2012. – №16. – С. 120-124. – Режим доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1402>.

4. Ripka P. Depth estimation of metal objects. [Електронний ресурс] / М. Janošek, P. Nováček. // Procedia Engineering. – Czech Technical University, 2010, № 5. – С. 280–283. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705810006491#>.

5. Metal detector basics and theory [Електронний ресурс] / Режим доступу: [https://www.minelab.com/\\_files/f/11043/КВА\\_METAL\\_](https://www.minelab.com/_files/f/11043/КВА_METAL_)

---

DETECTOR\_BASICS\_&\_THEORY.pdf.

6. Claudio Bruschini. A multidisciplinary analysis of frequency domain metal detectors for humanitarian demining. [Електронний ресурс] /Ph.D. thesis, Vrije Universiteit, Faculty of Applied Sciences. – Brussels, 2002. Режим доступу: <https://www.gichd.org/fileadmin/pdf/database/PhDBruschiniFinalv2Booklet.pdf>.

7. Micro-Cap 11. Electronic Circuit Analysis Program User's Guide [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.spectrum-soft.com/down/ug11.pdf>.

*Отримано редколегією 02.03.2018*

А.В. Загора, А.Б. Фещенко

**Методика определения глубины залегания боеприпасов в многоканальном приёмнике миноискателя VLF-системы**

Предложена расчетная методика определения глубины залегания боеприпаса, которая основывается на сравнении амплитуд сигналов, принятых многоканальной приемной системой, использующей специальные конструкции многоэлементных антенн металлодетектора. Приводятся аналитические и графические материалы для реализации расчетной методики.

**Ключевые слова:** гуманитарное разминирование, глубины объекта, VLF.

O.V. Zakora, A.B. Feshchenko

**Method for determining the depth of the munitions in the multichannel receiver of the mine detector VLF-system**

A calculation technique for determining the depth of the munitions is proposed, which is based on a comparison of the amplitudes of the signals received by a multichannel receiving system using special designs of multi-element antennas of a metal detector. Analytical and graphical materials are presented for the implementation of the calculation method.

**Keywords:** humanitarian demining, depth of the object, VLF.