

УДК 621.39

А. О. АБРАМОВИЧ, аспірант,**В. О. ПІДДУБНИЙ**, кандидат технічних наук,
доцент(НТУУ «Київський політехнічний інститут
ім. І. Сікорського», м. Київ),**О. М. ГУСЛЯКОВ**, старший науковий
співробітник(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки Збройних Сил
України, м. Київ)

Вихрострумний пристрій з базою даних образів для ідентифікації типів металів прихованих об'єктів

Подані результати досліджень експериментального зразка вихрострумного пристрою (ВСП) та методи обробки сигналу з антени ВСП, що поліпшують основні технічні характеристики таких приладів, перетворюючи їх з металошукачів, які здійснюють розрізнення металів (чорний або кольоровий) в металоаналізатори, що створюють образ об'єкта, який виявляється. Запропоновано варіант застосування ВСП при розмінванні.

Ключові слова: вихрострумний пристрій, обробка сигналів, металошукач.

Представлены результаты исследований экспериментального образца вихретокового преобразователя (ВТП) и методы обработки сигнала с антенны ВТП, которые улучшают основные технические характеристики таких устройств, преобразовывая их из металлоискателей, распознающих металл (черный или цветной) в металлоанализаторы, которые создают образ обнаруживаемого объекта. Предложен вариант применения ВТП при разминировании.

Ключевые слова: вихретоковый преобразователь, обработка сигналов, металлоискатель.

У сучасних збройних конфліктах широко застосовується мінування місцевості різними типами мін та вибухонебезпечних пристроїв (ВНП). Так, для захисту власних позицій від швидкого наступу противника замінують місцевість на загрозованих напрямках і ділянках. Також при відступі замінують ділянки маршрутів руху та об'єкти, які можуть бути використані противником (споруди, військову техніку, підходи до пунктів із запасами матеріально-технічних ресурсів), що значно зменшує швидкість наступу противника. Під час проведення антитерористичної операції на сході України також спостерігається велика кількість втрат військової техніки, цивільних людей та військових внаслідок підризу на мінах та ВНП. Тому проблема виявлення та знешкодження таких небезпечних об'єктів є актуальною.

Задача виявлення мін і ВНП значною мірою вирішується за допомогою вихрострумних пристроїв – металошукачів та металоаналізаторів. Найбільш затребуваними та розповсюдженими серед ВСП є металошукачі типу «дуже низька частота» (Very Low Frequency – VLF) [1].

В основі роботи ВСП лежить явище збудження на поверхні досліджуваного металевго об'єкта вихрових струмів, які виникають внаслідок взаємодії електромагнітного поля, що наводиться в них передавальною антеною. Ці струми створюють вторинне електромагнітне поле, яке реєструється приймальною антеною, оброблюється електронним блоком і передається на індикаторний пристрій.

На даний час відомі різні способи визначення інформативного параметра: інформація про досліджуваний об'єкт міститься в амплітуді, фазі чи частоті сигналу, прийнятого антеною, причому один з цих параметрів є інформативним, а інші – заважаючі. Для виявлення та аналізу інформативного параметра в сучасних металошукачах використовують амплітудний, фазовий та частотний методи обробки сигналу.

Амплітудний метод широко використовується для аналізу сигналу у випадку коли інформативним фактором є амплітуда сигналу, а заважаючим – фаза чи частота прийнятого сигналу. Для цього до складу ВСП вводять амплітудний детектор, який відслідковує амплітуду вхідного сигналу і при досягненні деякого порогового значення, що відповідає вибраному типу матеріалу досліджуваного об'єкта, подає інформацію на індикаторний пристрій, який сигналізує про наявність об'єкта. У цьому випадку зміна фази чи частоти сигналу не впливає на показання металошукача. Більшість сучасних металошукачів якраз і використовує ідентифікацію металу за пороговим рівнем сигналу.

Фазовий та частотний методи застосовується при значному впливі заважаючого фактора на амплітуду сигналу. У структурній схемі ВСП, який реалізує вказані методи, замість амплітудного детектора використовують фазовий чи частотний. Ці два методи зазвичай використовуються в приладах неруйнівного контролю параметрів металевих об'єктів.

Амплітудний підхід до виявлення інформативного сигналу має ряд недоліків, основним з яких є велика кількість хибних спрацьовувань при пошукових

роботах на ділянці з великою кількістю сміття (мінералізований ґрунт, металева стружка, цвяхи, шурупи). Зниження чутливості приладу для мінімізації кількості хибних спрацьовувань призводить до втрати інформації про металеві зразки малих розмірів. Амплітуда відбитого сигналу залежить від рівня намагніченості, тому якщо два предмети магнітний (сталь) та немагнітний (мідь) лежать поруч, то сигнал від магнітного предмета буде значно більший, ніж від немагнітного (рівень намагніченості сталі в сім разів більший рівня намагніченості міді) і останній виявити буде неможливо. Тому ВСП, побудовані на вихрострумовому методі розрізнення металів, не дозволяють визначати тип металу, якщо два зразки з різних металів знаходяться в безпосередній близькості один від одного [2]. Відстань нерозрізнення, тобто мертвої зони між двома різними металевими предметами, близька до половини діаметра приймальної антени.

Використовуючи запропоновані нами нестандартні методи обробки сигналу з антени ВСП, можливо поліпшити основні технічні характеристики цих приладів, перетворивши їх з металошукачів, що здійснюють дихотомічне розрізнення металів (чорний/кольоровий, тобто сильно намагнічений/слабо намагнічений) в металоаналізатори, які дозволять по аналогії з радіолокацією створювати образи об'єкта, що виявляється ВСП. Дослідженням цих питань і присвячена дана робота.

Розглянемо принцип функціонування експериментального зразка ВСП (рис. 1), який був розроблений нами в навчально-дослідній лабораторії радіотехнічного факультету НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» [3] та використовувався для отримання інформаційного сигналу при виявленні та ідентифікації об'єкта.

Структурна схема зразка ВСП показана на рис. 2. До неї входять: дві антени (передавальна 1 та приймальна 4), імпульсний генератор низькочастотного сигналу 2, блок підсилення та обробки сигналу 5, генератор тактових імпульсів 7, мікроконтролерний блок обробки 3 та індикаторний пристрій 6 (монітор ноутбука).

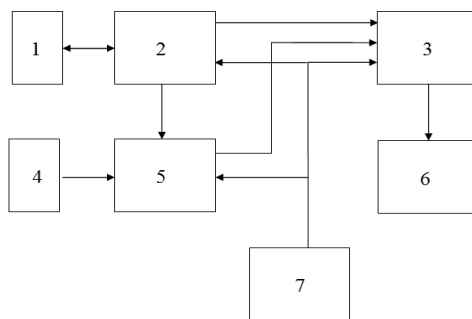


Рис. 2. Структурна схема вихрострумового металошукача

Розглянемо роботу ВСП: генератор низькочастотного сигналу 2 формує імпульсні сигнали, що надходять на передавальну антену 1 та випромінюють в досліджуване середовище електромагнітне поле. За рахунок електромагнітної індукції на поверхні досліджуваного об'єкта виникають струми Фуко, що змінюють первинне електромагнітне поле. Зміни в полі реєструються приймальною антеною 4, підсилюються та проходять первинну обробку в блоці 5. Для забезпечення синхронізації між вузлами металошукача використовується генератор тактових імпульсів 7. Після обробки сигнал надходить до мікроконтролерного блока 3, в якому отримані від досліджуваних зразків сигнали порівнюються з еталонними, інформація про які зберігається в пам'ятовувальному пристрої, а потім до індикаторного пристрою 6. Діаграма спрямованості рамочної антени зображена на рис. 3

Конструктивно приймально-передавальний блок побудований на двох мікроконтролерах AVR Atmega32: перший керує роботою вихрострумового блока, другий забезпечує перетворення вимірних даних у необхідний формат для передачі на ноутбук. Як індикаторний пристрій використовувався ноутбук HP 4540s, на якому для обробки сигналів встановлений пакет прикладних

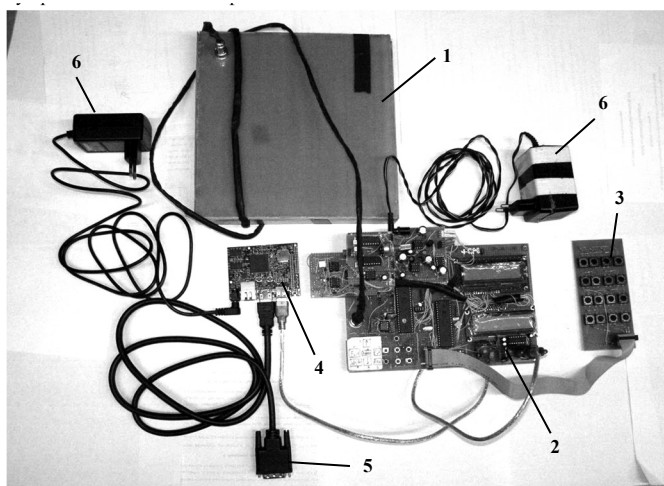


Рис. 1. Експериментальний зразок вихрострумового пристрою:
1 – блок антен; 2 – приймально-передавальний блок; 3 – клавіатура; 4 – плата обробки інформації;
5 – роз'єм для підключення ноутбука; 6 – блок живлення

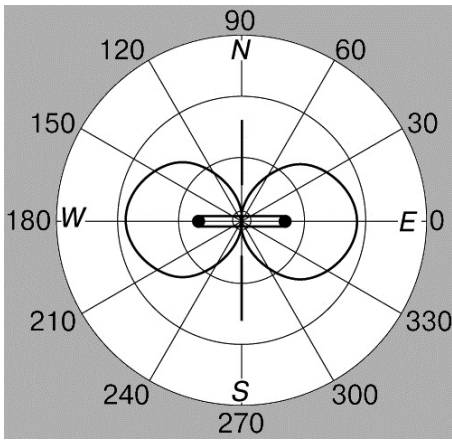
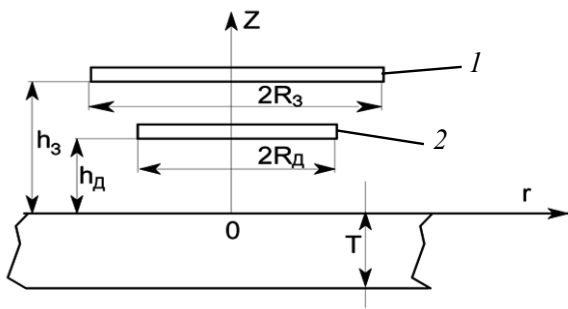
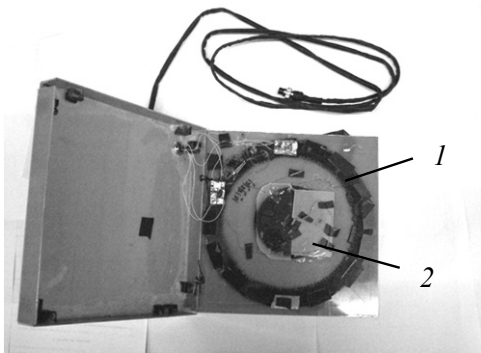


Рис. 3. Діаграма рамочної антени



а – схема розміщення антенного блока



б – вид антенного блока

Рис. 3. Антенний блок:

1 – передавальна антена; 2 – приймальна антена;
 h_d – відстань (50 мм) від приймальної антени до металевого предмета товщиною T , h_3 – відстань (56 мм) від передавальної антени до металевого предмета товщиною T ,
 R_3 – радіус (100 мм) передавальної антени,
 R_d – радіус приймальної антени (40 мм)

програм MATLAB [7], у середовищі якого розробленою нами програмою проводиться обробка та аналіз отриманого сигналу. Інформація через USB-порт передається на ноутбук пакетами по 8 біт. Динамічний діапазон аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера близько 48 дБ.

Як антенний блок використовуються дві коаксіально розміщені рамочні антени (передавальна та приймальна), що зміщені одна від одної на 6 мм. Розміщення антен над металевими зразками та вигляд антенного блока зображено на рис. 4.

Характеристики антен та їх конструктивні особливості наведено в табл. 1.

Рівень сигналу, збудженого вторинним електромагнітним полем на виході приймальної антени металодіагностичного (внесена напруга) $\bar{U}_{вн}$ величина комплексна і залежить від провідності досліджуваного об'єкта та його магнітних властивостей [5]. Форма інформативного сигналу [5], який знятий з антени та підсилений в блоці 5, для різних металів (мідь та залізо) показана на рис. 5. Як бачимо, сигнали різні за амплітудою, формою та тривалістю, яка залежить від швидкості сканування об'єктів, що виявляються.

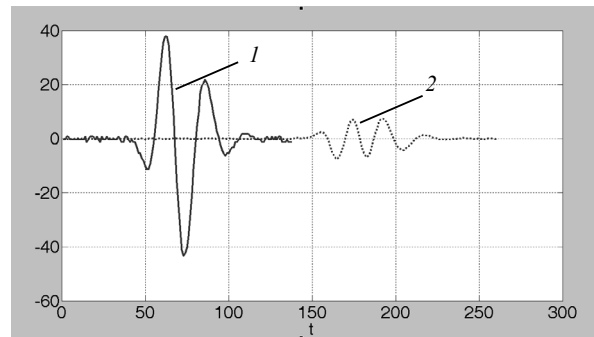


Рис. 5. Форма сигналу приймальної антени в залежності від типу металу, розміру об'єкта та швидкості (t – дискретний час) сканування антени:
 1 – залізо; 2 – мідь

Інформативний сигнал (внесена напруга) $\bar{U}_{вн}$ є функцією фактора впливу [6] магнітних та електричних властивостей ($\varphi_1(x, \beta)$) і залежить від магнітної проникності металу μ_0 та його електропровідності, а його значення змінюється в залежності від властивості металів [3]:

$$\bar{U}_{вн} = F(j\omega\mu_0\pi N_{пд}N_{пр}R_{пр}\varphi_1(x, \beta)), \quad (1)$$

де $N_{пр}, N_{пд}$ – кількість витків у приймальній та передавальній антенах, ω – кутова частота, $R_{пр}$ – радіус приймальної антени, j – позначення комплексних чисел.

Таблиця 1. Конструктивні характеристики антен ВСП

№ з/п	Параметр	Передавальна	Приймальна
1	Діаметр дроту, мм	0,33	0,22
2	Товщина антени a, мм	5	6
3	Кількість витків w	85	275
4	Кількість шарів дроту n	5	12
5	Внутрішній діаметр рамки $d_{пр}, d_{пер}$, мм	162	81
6	Індуктивність, мГн	3,87	13,14

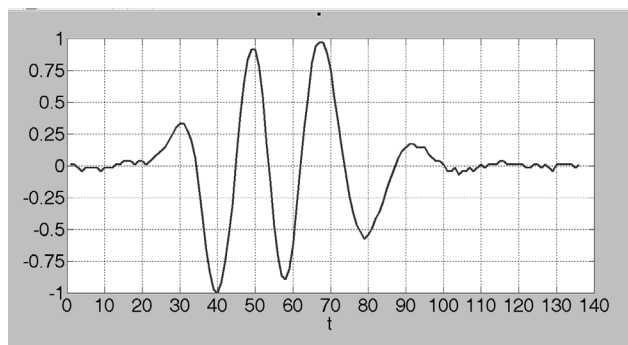
Фактор впливу магнітних та електричних властивостей розраховується за формулою [6, формула (4.54), с. 187]

$$\varphi_1(x, \beta) = \frac{\mu_r - \sqrt{x^2 + j\beta^2}}{\mu_r + \sqrt{x^2 + j\beta^2}}, \quad (2)$$

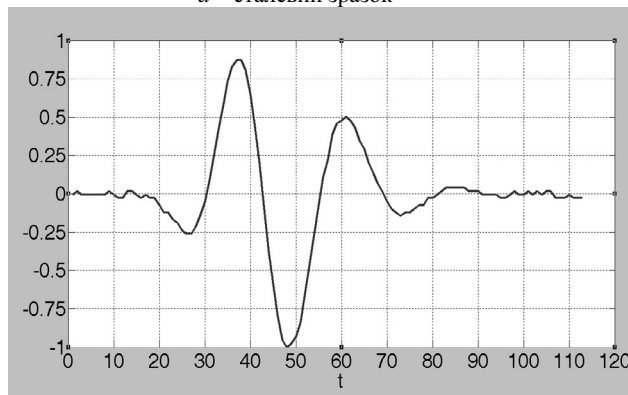
де x – відстань від центра антени, $x = \lambda R_{\text{пд}}$, λ – параметр інтегрального перетворення, $R_{\text{пд}}$ – радіус передавальної антени, μ_r – відносна магнітна проникність, $\beta = R_{\text{пд}} \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$ – узагальнений параметр вихрострумового контролю згідно з ГОСТ 24289–80 [7], σ – електропровідність (табличне значення відповідного матеріалу).

Розглянемо для прикладу два метали: сталь та мідь. Як відомо, відносна магнітна проникність сталі $\mu_r = 100$, а міді $\mu_r = 1$, провідність заліза (сталі) $0,769 \cdot 10^6$ См/м, а міді $-59,5 \cdot 10^6$ См/м. Тоді модуль фактора впливу для сталі та міді відповідно складають: $|\varphi_{\text{сталь}}(x, \beta)| = 0,836$ та $|\varphi_{\text{мідь}}(x, \beta)| = 1,0$, тобто маємо значну відмінність між ними.

Інформація про досліджуваній об'єкт, зображена на дисплеї, міститься в формі сигналу, його тривалості, крутості зростання та спадання фронтів та ін. [8]. Однак порівнювати їх можна лише після нормування за амплітудою та тривалістю. Нормування за амплітудою не викликає ніяких труднощів, а як параметр нормування за тривалістю сигналу використовувалася відстань між двома максимумами сигналу. Нормовані сигнали показані на рис. 6, де зібрано часові відклики для зразків із сталі та міді.



а – сталевий зразок



б – мідний зразок

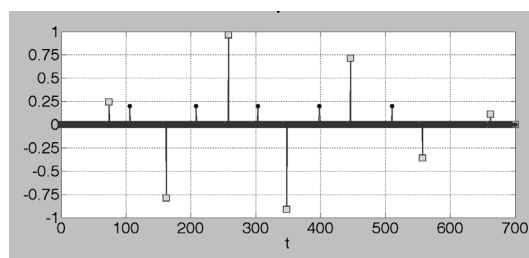
Рис. 6. Параметр нормування за тривалістю сигналу

Аналізувати такий сигнал в часовій формі незручно. Тому для перетворення його в більш зручний для

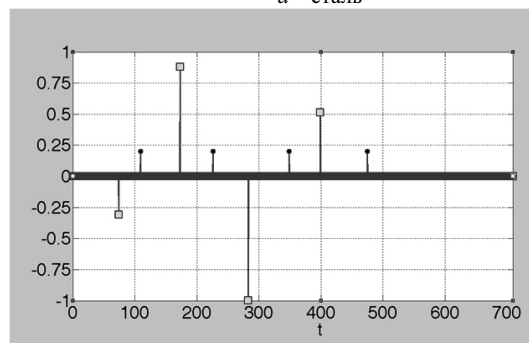
аналізу та математичної обробки вигляд необхідно за критичними точками (екстремуми сигналу та перехід через нуль) апроксимувати його кусково-поліноміальними функціями. Ступінь полінома апроксимації та кількість інтервалів апроксимації залежать від складності сигналу та необхідної точності апроксимації. На кожному інтервалі апроксимації задаємо кількість дискретних точок x_1, x_2, \dots, x_m , отриманих експериментально, a_1, a_2, \dots, a_{m-1} – коефіцієнти полінома, і записуємо поліном апроксимації інтервалу залежністю

$$P(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_{n-1}x^n. \quad (3)$$

Часовий сигнал, отриманий після апроксимації, перетворюється програмою в графічний образ, в якому неперервна зміна сигналу замінюється характерними лініями (точками розміщення екстремумів). Відповідні часовим сигналам графічні образи (рис. 5) для сталі та міді зображені на рис. 7, а числові значення інформаційних параметрів надані в табл. 2.



а – сталь



б – мідь

Рис. 7. Графічні образи сигналів. Квадратами позначено точки екстремумів, кружками – точки переходу через нульовий рівень. (По вертикалі – нормована амплітуда, по горизонталі t – дискретний час)

Графічні образи мають більшу інформативну насиченість ніж звуковий сигнал, тому що характерні лінії відрізняються одна від одної координатами, висотою та полярністю. Крім того, інформаційними є точки переходу сигналу через нульовий рівень.

Далі за розробленими алгоритмами і програмою інформативні параметри образів об'єктів, що виявляються, порівнюються з накопиченими в базі еталонними сигналами. Це дозволяє аналізувати металеві предмети не за ознакою «сильно намагнічений/слабо намагнічений», а як узагальнений образ, що складається з різноманітних металів, що входять до складу виявленого об'єкта.

Таблиця 2. Числові значення інформативних параметрів образів для сталі та міді

№ екстремуму по порядку зліва направо	1	2	3	4	5	6	7	K,%*
Сталь								
Амплітуда	0,3055	-0,9471	0,9461	-0,9007	0,9826	-0,5326	0,1844	3,7
Координати екстремумів	80	180	280	360	460	570	690	–
Координати нулів	120	230	320	410	520	650	–	–
Мідь								
Амплітуда	-0,2551	0,8720	-0,9963	0,4949	-0,1403	–	–	43
Координати екстремумів	70	180	290	410	520	–	–	–
Координати нулів	110	230	360	490	560	–	–	–

де K,%* – різниця у відсотках між двома найбільшими позитивними максимумами сигналу.

Запропонований підхід дозволяє здійснювати селективний пошук потрібної групи образів. Так, окремі елементи ВВП або мін сумарно за своїми властивостями дають різні сигнали. Ці відмінності можна виявити та записати в базу даних, що зберігається в пам'яті ВСП. При скануванні невідомого об'єкта необхідно порівняти отриманий сигнал із записаним в пам'яті [9], та ідентифікувати об'єкт в цілому. Якщо отриманий сигнал повністю не співпадає із відомими, що знаходяться в базі даних, то мікропроцесор розрахує відсоткову збіжність з найближчим еталонним образом і вкаже, з якою ймовірністю відшуканий металевий предмет (елемент) відповідає записаному в базі.

Отже, проведені дослідження підтвердили можливість: створення образів виявлюваних об'єктів, якими можуть бути складові ВВП і різних типів мін (корпуси, детонатори, ударники); накопичення сигналів від різних

предметів для зберігання відповідної бази даних і в подальшому порівняння параметрів сигналу від виявленого об'єкта; здійснювати селекцію сигналів від різного типу сміття в ґрунті (невеликі уламки, гільзи, консервні банки, фольга, корки від пляшок).

Крім цього, розроблений макет ВСП можливо використовувати як у ручному режимі, коли сапер здійснює рух штанги з антеною над поверхнею, так і в автоматизованому режимі, коли пошуковий ВСП встановлюється на малогабаритний дистанційно керований робототехнічний комплекс, а поворотний пристрій, закріплений на передній частині корпусу, здійснює циклічний рух штанги з антеною з встановленою швидкістю та на визначеній висоті над поверхнею (рис. 7).

Висновки. Таким чином, побудований за запропонованою структурною схемою ВСП та удосконалений

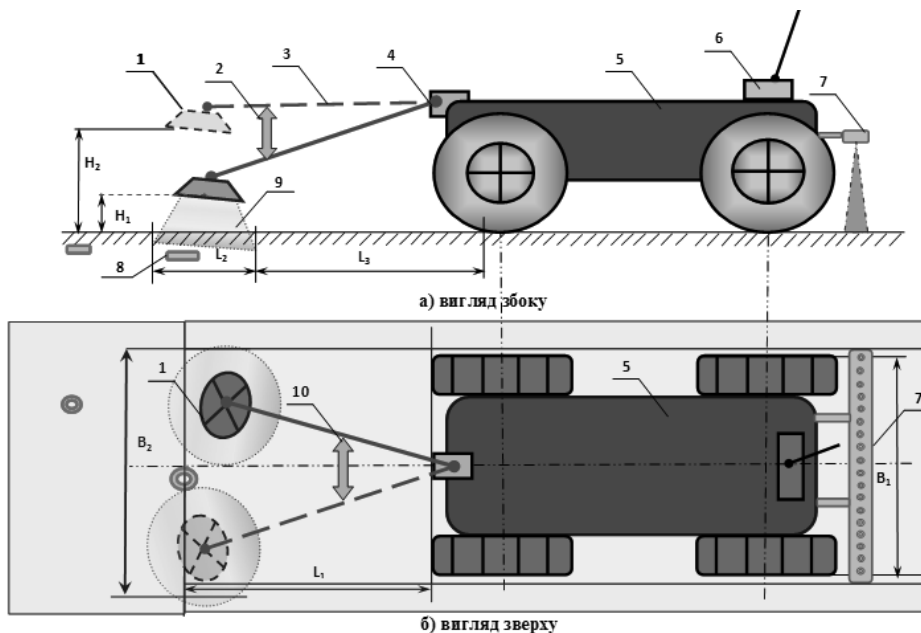


Рис. 7. Схема функціонування робототехнічного комплексу, оснащеного запропонованим ВСП:

- 1 – антенний блок, 2 – позначення вертикального руху штанги, 3 – виводна штанга антенного блока, 4 – механізм управління рухом штанги, 5 – шасі, 6 – система дистанційного управління і передачі даних, 7 – система маркування місця виявлення об'єктів, 8 – прихований в ґрунті ВВП, 9 – зона дії антен, 10 – позначення горизонтального циклічного руху штанги

математичний апарат обробки сигналу виявленого невідомого металевго предмета дозволяє ідентифікувати об'єкт за базою даних, підвищити імовірність виявлення різних об'єктів, що, у свою чергу, дозволяє збільшити швидкість та підвищити ефективність проведення робіт з пошуку вибухонебезпечних предметів.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. IEEE Xplore, Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). DOI: 10.1109/ICGPR.2012.6254822.
2. Щербаков Г. Н. Увеличение предельной глубины обнаружения локальных ферромагнитных объектов в толще проводящих укрывающих сред методом дистанционного параметрического подмагничивания // Радиотехника. 2005. № 12. С. 42–45.
3. Абрамович А. О. Радиолокаційно-вихрострумвий радар // Вісник НТТУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2014. Вип. № 57. С. 77–82.
4. Jol M. H. Ground Penetrating Radar Theory and Applications // Oxford GB.: Elsevier B.V. 2009. 574 p.
5. Diamanti L., Annan P. Characterizing the energy distribution around GPR antennas. J. Appl.Geophys., this issue. 2013.
6. Неразрушающий контроль : в 5 т. Т. 3. Электромагнитный контроль : прак. пособие / под ред. В. В. Сухорукова. М. : Высш. шк., 1992. 312 с.
7. ГОСТ 24289–80. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения.
8. Obiazi A. M., Anyasi F. I., Jacdonmi O. O. Implementing a Robust Metal Detector Utilizing the Colpitts Oscillator with Toroidal Coil // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2010. № 5 (2). P. 56–63.
9. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход : пер. с англ. 2-е изд. М. : Вильямс, 2004. 992 с.

Рецензент М. І. Луханін, д-р техн. наук, проф.
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)