



І. А. Симақ, І. М. Журавель, Л. З. Мичуда

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО МІНУВАННЯ НА БАЗІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ДАВАЧІВ З БЕЗПРОВІДНИМ КАНАЛОМ КОМУНІКАЦІЇ

Розроблено пристрій для дистанційного мінування на базі ультразвукових давачів з безпроводним каналом комунікації, що стало основою для розроблення системи автоматичного захисту периметра об'єктів з використанням мінних загороджень. Досліджено будову та функціонал ультразвукових давачів і безпроводних модулів, а також проаналізовано ефективність і точність результатів вимірювання відстані за допомогою ультразвуку. На час воєнних протистоянь на території України актуальним є використання цих технологій для встановлення мінних загороджень із можливості дистанційного управління та модернізації наявних інженерно-саперних систем, що відкриває нові перспективи для підвищення ефективності та безпеки виконання воєнних завдань. Ретельно проаналізовано сучасні інженерно-саперні системи, визначено їх ключові характеристики та режими роботи. На підставі теоретичних досліджень розроблено прототип ультразвукового далекоміра, який став основою для створення автоматизованого пристрою керованого мінування. Для забезпечення відповідності розроблення нормативно-правовим актам, ретельно вивчено відповідну законодавчу базу, а саме конвенцію про заборону або обмеження застосування конкретних видів звичайної зброї, які можуть вважатися такими, що завдають надмірних ушкоджень або мають не вибіркову дію. У дослідженні важливе значення мають методи оброблення сигналу, які дали змогу істотно підвищити точність вимірювань відстаней до об'єктів за допомогою ультразвукового давача. Розроблення та впровадження програмно-апаратних компонентів пристрою керованого мінування базувались на ґрунтовному аналізі потреб сучасних інженерно-саперних систем та врахуванні специфічних умов їх застосування. Завдяки ретельному розробленню та тестуванню прототипу, дослідження підтвердило високу ефективність і потенціал застосування ультразвукових технологій у сфері воєнних інженерних рішень, що відкриває можливості для подальших інновацій і підвищень у цій галузі. Розроблено прототип пристрою керованого мінування, що спрощує його встановлення та адаптацію до місцевості, а також забезпечує високий рівень маскування на місцевості, що є критично важливим для воєнного застосування. У подальших дослідженнях варто розглянути різноманітні типи давачів і їх використання в конкретних оперативних-тактичних випадках. Це дасть змогу виявити найбільш перспективні напрями для подальшого удосконалення модульної системи, збільшуючи її ефективність та адаптивність до змінних воєнних умов.

Ключові слова: радіомодуль; далекомір; мікроконтролер; точність вимірювання; фільтрація; радіозв'язок; озброєння.

Вступ / Introduction

У сучасному світі широкого застосування набувають бездротові технології, які дають змогу автоматизувати та контролювати різноманітні процеси на відстані. Особливої уваги заслуговують ультразвукові давачі, що мають високу точність та стабільність вимірювань, а також доступну вартість. Робота таких давачів базується на принципі використання ультразвукових хвиль для вимірювання відстані до об'єктів, тому їх широко застосовують у робототехніці, медицині, промисловості та інших сферах. Застосування безпроводних модулів дає змогу передавати дані від давача на відстань, що розширює можливості їхнього використання. Постійна потреба у бездротовому зв'язку визначає актуальність розроблення пристроїв, які об'єднують різні типи сенсорів і взаємодіють з іншими пристроями без фізичних

з'єднань.

У цьому дослідженні детально розглянуто будову та функціонал ультразвукових давачів, а також радіомодулів. Проаналізовано їхні характеристики, визначено переваги використання цих технологій у вимірюваннях і бездротовій комунікації. Далі, на підставі отриманих знань, розроблено ультразвуковий далекомір, а також пристрій керованого мінування з використанням радіомодуля.

Розроблений пристрій керованого мінування призначений для ефективного та безпечного встановлення мінних загороджень зі спрацюванням при наближенні противника у зону дії пристрою. Також управління може здійснювати безпосередньо сапер-оператор з безпечної відстані за допомогою дистанційного управління. Важливим моментом є забезпечення самоліквідації піс-

Інформація про авторів:

Симақ Ігор Анатолійович, студент, кафедра безпеки інформаційних технологій. Email: ihor.symak.kb.2020@lpnu.ua

Журавель Ігор Михайлович, д-р техн. наук, ст. наук. співробітник, завідувач кафедри безпеки інформаційних технологій.

Email: ihor.m.zhuravel@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-1114-0124>

Мичуда Леся Зіновівна, д-р техн. наук, доцент, заступник директора з науково-педагогічної роботи.

Email: lesia.z.mychuda@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-8266-1782>

Цитування за ДСТУ: Симақ І. А., Журавель І. М., Мичуда Л. З. Пристрій для дистанційного мінування на базі ультразвукових давачів з безпроводним каналом комунікації. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 4. С. 110–119.

Citation APA: Symak, I. A., Zhuravel, I. M., & Mychuda, L. Z. (2024). Remote mining system based on ultrasonic sensors with a wireless communication channel. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(4), 110–119. <https://doi.org/10.36930/40340414>

ля встановленого проміжку часу для дотримання Конвенції про конкретні види звичайної зброї [7, 21], а саме Протоколу II про заборону або обмеження застосування мін, мін-пасток та інших пристроїв. Протокол регулює, але не забороняє, наземні міни. Він забороняє: використання протипіхотних мін, що не виявляються, та їх передавання іншим; застосування несамознищувальних і несамопідричних мін за межами обгороджених, контрольованих та зазначених зон; встановлення мін та мін-пасток проти цивільних осіб; вимагає від сторін конфлікту знешкоджувати міни та міни-пастки після завершення конфлікту.

Об'єкт дослідження – проектування системи дистанційного мінування.

Предмет дослідження – методи й засоби визначення відстані до об'єкта, що дасть змогу розробити систему автоматичного спрацювання мінного загородження.

Мета роботи – розробити пристрій для дистанційного мінування на базі ультразвукових давачів з безпроводним каналом комунікації, що стане основою для розроблення системи автоматичного захисту периметра об'єктів з використанням мінних загороджень.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- розробити методику визначення відстаней до об'єкта із заданими метрологічними характеристиками, що дасть змогу підвищити точність дистанційного мінування, забезпечуючи ураження цілей з більшою ефективністю;
- розробити алгоритми дистанційного мінування пристроєм з використанням електричних схем, що дасть змогу автоматизувати процес мінування, зменшуючи час його проведення та ризик помилок, підвищити гнучкість системи мінування, дозволяючи створювати мінні поля різної конфігурації та складності;
- розробити прототип системи дистанційного управління мінним загородженням, що забезпечить можливість віддаленого управління мінним загородженням з безпечної відстані, підвищення оперативності реагування на зміну обстановки на полі бою та зниження ризику для життя та здоров'я особового складу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні дослідження в галузі інженерного забезпечення та мінно-вибухової безпеки демонструють істотне зростання зацікавленості до розроблення ефективних систем керованого мінування. Важливість цієї тематики зумовлена постійною потребою підвищення ефективності виконання бойових завдань і зменшення ризиків для особового складу.

Для аналізу актуальності і ролі мінної зброї використано дослідження Т. Л. Куртсеїтова, С. П. Мосова, М. П. Трембовецького та В. А. Ясько [11, 17]. Автори наголошують на значенні мінної зброї в контексті гібридних воєн, особливо для України, що воює у своєму південно-східному регіоні. Попри проблематичні особливості, пов'язані з міжнародними конвенціями, актуальність досліджень мінної зброї видається безсумнівною, особливо з огляду на технічний прогрес і можливості її застосування. У дослідженні зазначено, що міна зброя є значущим чинником, який впливає на стратегію ведення бойових дій. Дослідження [9] описує процес розроблення програмованого електронного детонатора з використанням напівпровідникового мосту SCB (англ. *Silicon Controlled Bridge*) як електровибуховий пристрій EED (англ. *Explosive Electrical Device*). Автори акцентують увагу на високій безпеці, низькій енергії запалю-

вання, швидкому часі запалювання та низькій вартості, а також на мініатюризації системи. Наголошено на важливості використання безпроводних технологій для управління процесами детонації, що може підвищити ефективність та безпеку військових операцій. Особливу увагу приділено безпеці використання мінної зброї, зокрема, захисту від несанкціонованого впливу та електростатичних розрядів.

Проаналізовано дослідження [16] щодо врахування умов детонації вибухових ініціаторів під дією зовнішнього джерела RF енергії. У публікації зазначено потенційні ризики та безпеку під час розроблення безпроводних систем управління вибуховими пристроями. Аналіз специфічних умов, за яких можлива детонація, та розроблення симуляційних моделей для оцінювання ймовірності настання детонації, є ключовими для розуміння взаємодії між пультами курування та вибуховими пристроями. Ця робота має велике значення для розуміння ризиків, пов'язаних із можливістю несанкціонованого або випадкового ініціювання вибухових пристроїв, а також для розроблення заходів з їх нейтралізації.

Для побудови ефективної автоматизованої системи керованого мінування важливо оцінити технології, можливості та виклики, пов'язані з використанням сучасних технологій у військовій сфері, що описані у роботах [8, 19]. Особливий інтерес викликають системи передачі даних, здатні об'єднувати мобільні об'єкти в єдину мережу, надаючи можливість додавати нові елементи та швидко адаптуватися до змін умов. Такі технології є особливо корисними для управління мінними полями, маючи можливість здійснювати їх встановлення, контроль та активацію дистанційно.

У дослідженнях О. Харуна [3, 7, 12, 18, 21] висвітлено проблематику подолання мінно-вибухових загороджень бойовими підрозділами Державної прикордонної служби України у сучасних умовах військових конфліктів. Ця проблематика є особливо актуальною в контексті розроблення систем управління мінуванням, оскільки потребує розроблення ефективних методів подолання мінних полів з мінімальними втратами та ризиками для особового складу. Зосереджено увагу на постійному зборі інформації про мінно-вибухові загородження та розвитку нових технологій для їх подолання.

Отже, тематика керованого мінування, особливо з урахуванням сучасних вимог до ефективності та безпеки воєнних операцій є надзвичайно актуальною та потребує нових рішень. Розроблення та вдосконалення технологій у цій галузі, зокрема застосування ультразвукових давачів і безпроводних каналів комунікації, відкриває перспективи для підвищення ефективності бойових дій та забезпечення вищого рівня безпеки особового складу. Удосконалення технологій у сфері керованого мінування потребує ґрунтовного розуміння взаємодії між технічними засобами та бойовими умовами. З цієї причини важливою особливістю є не тільки розроблення нових технічних рішень, але й адаптація цих рішень до специфіки бойових дій. У цьому контексті важливе значення має взаємодія між різними компонентами системи мінування. Наприклад, використання давачів для визначення відстані до противника або для активації мін у певних умовах відкриває широкі можливості для підвищення точності та ефективності мінування. Водночас інтеграція безпроводних каналів комунікації дає змогу управляти мінними полями на відстані, значно знижуючи ризики для особового складу.

Особливу увагу потрібно звернути на інтеграцію керування мінних систем із загальною інфраструктурою військового управління на полі бою. Це передбачає сумісність із системами командування та контролю, бойовими інформаційними системами, а також із засобами електронної війни. Інтеграція дасть змогу забезпечити оперативний обмін даними, синхронізацію дій різних підрозділів й адаптацію до мінливих умов бою в реальному часі. Також важливою особливістю є удосконалення адаптивних систем мінунання, які можна налаштувати на різні сценарії їх використання з урахуванням особливостей місцевості, характеру ворожих дій, а також власних тактичних задумів. Це передбачає розроблення мін з можливістю програмування часу детонації, типу вибуху (наприклад, спрямована детонація), а також інтеграцію з давачами для визначення цілей.

Матеріали та методи дослідження. Проведені у роботі теоретико-експериментальні дослідження ґрунтують на положеннях і методах оброблення сигналів, на основах радіоелектроніки та математичного моделювання. Результати теоретичних досліджень перевіряли способом імітаційного моделювання та на розробленому прототипі системи.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Принципи роботи ультразвукових давачів. Ультразвуковий давач працює за принципом вимірювання часу, за який звуковий сигнал відбито від об'єкта. Звуковий сигнал, який не натрапляє на перешкоди, поширюється в повітрі зі швидкістю 343,2 м/с. Якщо сигнал натрапляє на об'єкт, його відбито від нього назад і прийнято давачем. За часом, за який сигнал відправлено і прийнято, можна визначити відстань до об'єкта.

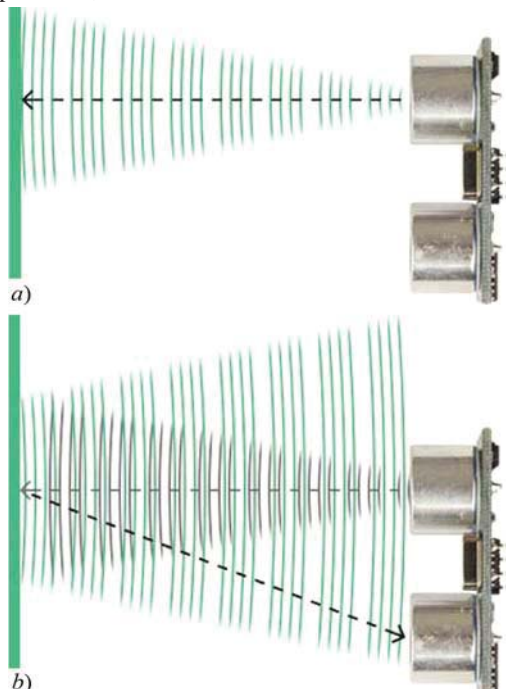


Рис. 1. Графічна ілюстрація роботи передавача та приймача /
Graphical illustration of transmitter and receiver operation

Ультразвукові давачі мають низку переваг перед іншими типами. Вони нечутливі до фонових перешкод, оскільки відстань визначається вимірюванням часу, а не інтенсивністю звуку. Ультразвуковий давач складається з двох частин: передавача і приймача. Переда-

вач випромінює звуковий сигнал, а приймач його отримує (рис. 1). Частота звукового сигналу, випромінюваного передавачем, зазвичай становить 40 кГц [1, 10, 13, 15, 20].

Коли ультразвуковий модуль потрапляє на перешкоду, він вимірює час, який потрібен сигналу, щоб бути відбитим від перешкоди і повернутися назад. Цей час становить відстань до перешкоди, розділений на швидкість звуку в повітрі. Тому, вимірявши тривалість проходження ультразвукового сигналу, можна визначити відстань до об'єкта за формулою

$$d = v \cdot t / 2,$$

де: d – відстань до об'єкта, м; v – швидкість поширення ультразвукових хвиль, м/с; t – тривалість проходження ультразвукового сигналу, с.

Розглянемо роботу ультразвукового давача HC-SR04 (рис. 2) з такими характеристиками:

- напруга живлення – 5 DC;
- струм споживання – 15 ма;
- робоча частота – 40 khz;
- діапазон вимірювання відстані – 2-500 см;
- роздільна здатність – 0.3 см;
- час відклику – 10 мкс;
- ефективний кут – $<15^\circ$.



Рис. 2. Ультразвуковий давач HC-SR04 / Ultrasonic sensor HC-SR04

Опис виводів:

- VCC – плюсовий контакт живлення +5 в;
- Trig (INPUT) – цифровий вхід. Для запуску вимірювання на цифровий вхід потрібно подати сигнал логічної одиниці тривалістю 10 мікросекунд. Наступне вимірювання рекомендується виконувати не раніше, ніж через 50 мс;
- Echo (OUTPUT) – цифровий вихід. Після завершення вимірювання на цифровий вихід буде подано сигнал логічної одиниці, тривалість якого буде пропорційна відстані до об'єкта;
- GND – мінусовий контакт живлення.

Для отримання результатів потрібно створити імпульс на вході Trig давача для початку вимірювання, і заміряти тривалість імпульсу на виході Echo, щоб потім обчислити дистанцію (рис. 3).

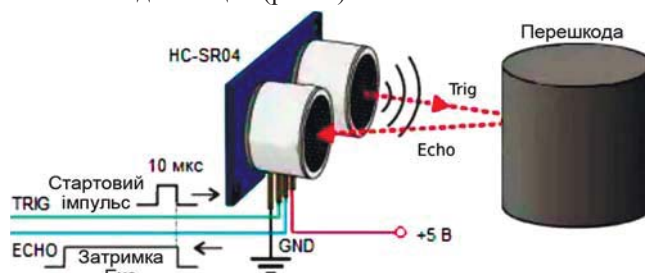


Рис. 3. Принцип роботи HC-SR04 / Working principle of HC-SR04

Оскільки час, витрачений імпульсом, насправді є рухом ультразвукових сигналів туди й назад, тоді як потрібно тільки його половину, а саме $t/2$.

Принципи роботи безпроводних модулів. Безпроводні модулі використовують для передачі даних між пристроями без використання провідних з'єднань. Вони можуть використовуватися в різних сферах, таких як промисловість, автоматизація, Інтернет речей (IoT) та інші.

Розглянемо радіомодуль nRF24L01 (рис. 4). Це популярний радіочастотний модуль, який працює в діапазоні 2,4 ГГц. Він має пропускну здатність до 2 Мбіт/с і дальність передачі до 100 м без використання зовнішньої антени. Модуль nRF24L01 є низькоенергетичним, що дає змогу йому працювати від акумуляторних батарей, також є можливість впровадження режиму енергозаощадження.

Характеристики модуля:

- напруга живлення – 1,9-3,6 в;
- інтерфейс обміну даними – spi;
- частота приймання та передавання – 2,4-2.4835 гтц;
- кількість каналів – 128 з кроком 1мгц;
- тип модуляції – gfsk;
- швидкість передачі даних: 250kbps, 1mbps і 2mbps;
- чутливість приймача – -82 dbm;
- відстань прийому/передачі даних без використання зовнішньої антени: 100 м – пряма видимість; 30 м – приміщення.



Рис. 4. Радіомодуль nRF24L01 / Radio module nRF24L01

Модуль використовує для під'єднання SPI-інтерфейс. Комунікація з мікроконтролером проходить за допомогою інформаційного пакета, наведеного на рис. 5.

Preamble	Address	Packet Control	Payload	CRC 1-2
1 byte	3-5 byte	Field 9 bit	0 - 32 byte	byte

Рис. 5. Формат інформаційного пакету радіомодуля nRF24L01 / Format of the information package of the radio module nRF24L01

Preamble – послідовність бітів, використані для синхронізації демодуляторів приймачів.

Address – Адреса приймача. Вона гарантує, що відправлений пакет отримає потрібний приймач.

Packet Control Field – контрольне поле. Містить: 6 біт, що визначають довжину пакета корисного навантаження; 2 біти PID, що використовують для визначення чи є пакет новим, чи пересланим повторно; 1 біт – прапор NO_ACK.

Payload – корисне навантаження. Тобто дані, передані від мікроконтролера. Містить 0-32 байт.

CRC – обов'язковий механізм виявлення помилок у пакеті. Довжина CRC – 1 або 2 байти і залежить від загальної довжини пакета.

Кожному передавачу присвоюється свій унікальний *Pipe ID*, а приймачу потрібно присвоїти всі ідентифікатори тих передавачів, від яких він прийматиме дані. На одній частоті або каналі можуть працювати 6 передавачів і 1 приймач [22].

Кожен ідентифікатор поданий числом, що містить 5 байт, та задають його певними правилами, а саме:

- на одному і тому самому каналі ідентифікатор кожного передавача повинен бути унікальним;
- щоб приймач міг приймати дані, йому потрібно вказати ідентифікатори конкретних передавачів;
- ідентифікатори Pipe0 і Pipe1 повинні відрізнятися всіма п'ятьма байтами, наприклад Pipe0 = 0xA1A1A3A4A5, а Pipe1 = 0xB1B2B3B4B5;
- ідентифікатори Pipe2 – Pipe5 повинні відрізнятися від Pipe1 тільки останнім байтом, наприклад Pipe1 = 0xB1B2B3B4F1, Pipe2 = 0xB1B2B3B4D1, Pipe3 = 0xB1B2B3B4A3 і т.д.

Проектування електричної схеми під'єднання ультразвукового далекоміра. Для реалізації прототипу пристрою використаємо мікроконтролер Arduino Uno. На рис. 6,а зображено принципову схему під'єднання.

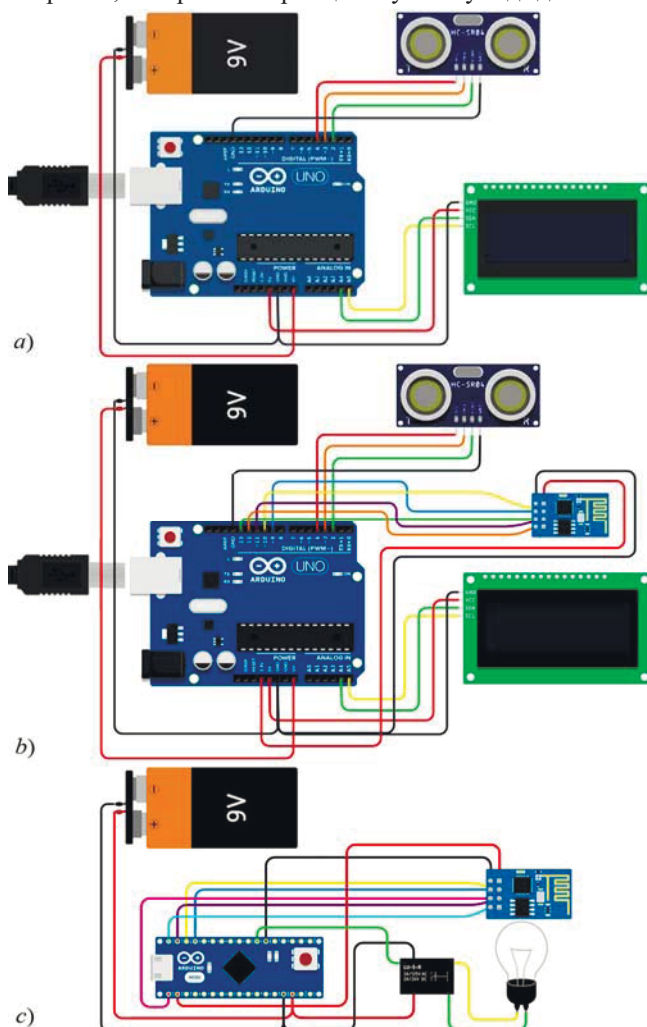


Рис. 6. Принципова схема / Schematic diagram of the: під'єднання модулів / modules connection (a); передавача / transmitter (b); приймача / receiver (c)

Ультразвуковий давач HC-SR04 під'єднують до мікроконтролера Arduino Uno за допомогою двох цифрових портів. Порт D3 використовують для генерації ультразвукового сигналу, а порт D2 – для прийому відбитого сигналу. Дисплей LCD 1602 з модулем I2C/IIC під'єднують до мікроконтролера за допомогою інтерфейсу I2C. Порти SCL і SDA дисплея під'єднують до портів SCL і SDA (A5, A4).

Програмна реалізація. Комунікацію з модулями на мікроконтролері Arduino Uno реалізовано за допомогою готових бібліотек. Для роботи з дисплеєм LCD 1602 з

модулем I2C/PS можна використовувати бібліотеку LiquidCrystal_I2C. Вона містить функції для ініціалізації дисплея, виведення тексту і цифр на дисплей, управління курсором і т.ін. Для роботи з ультразвуковим датчиком HC-SR04 використано бібліотеку NewPing, що містить функції для генерації ультразвукового сигналу, прийому відбитого сигналу і обчислення відстані до об'єкта.

Завантажуємо прошивку на мікроконтролер. Відкриваємо Serial Monitor в Arduino IDE та підносимо об'єкт в поле зору датчика. Як можна бачити на рис. 7,а і рис. 8,а, все працює справно та відображена дистанція до об'єкта.

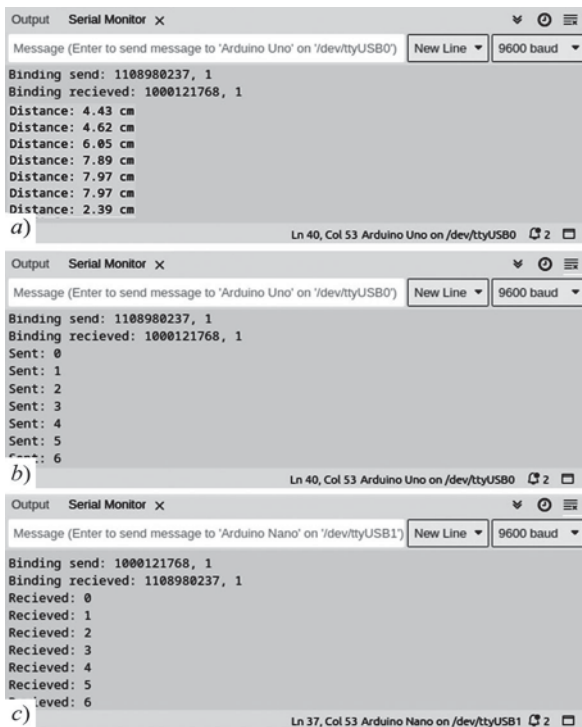


Рис. 7. Вміст вікна Serial Monitor / Contents of the Serial Monitor window (a); Binding process (b, c)

Вибір та реалізація методів оброблення сигналу для підвищення точності вимірювання. Для підвищення точності вимірювання відстані за допомогою ультразвукового датчика можна використовувати різні методи оброблення сигналу. Одним з найпростіших і ефективних методів є фільтрація. Реалізуємо медіанний фільтр та середнє зважене для підвищення точності результатів вимірювання.

Медіанний фільтр з трьох – це метод фільтрації низьких частот, який замінює вимірне значення медіаною трьох останніх вимірів. Медіана – це середнє значення, яке не залежить від порядку елементів масиву [10, 13]. Цей метод є ефективним за наявності шумів високої і низької частоти, а також простий у реалізації і швидко виконується. Розглянемо, як працює цей метод на прикладі. Нехай виміряно відстань до об'єкта тричі й отримано такі значення: $dist_1 = 100$ см; $dist_2 = 101$ см; $dist_3 = 102$ см. Медіана цих трьох вимірів буде становити: $dist_{filtered} = 101$ см. Отже, медіанний фільтр з трьох замінює вимірне значення 102 см значенням 101 см.

Середнє зважене – це метод фільтрації, який замінює вимірне значення середнім значенням кількох вимірів з урахуванням їх ваги [20]. Вага кожного виміру визначає, наскільки значно він буде впливати на результат фільтрації. Цей метод дає змогу налаштувати

вплив кожного виміру на результат фільтрації, що може бути корисно в деяких випадках.

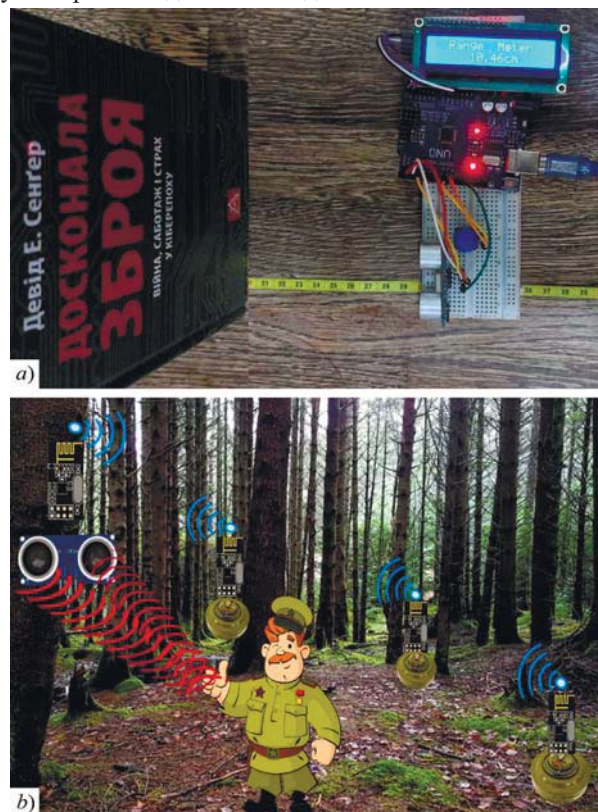


Рис. 8. Процедура вимірювання відстані до об'єкта, розташованого на 10 см (без алгоритму фільтрації) / The process of measuring the distance to an object located 10 cm away (without a filtering algorithm) (a); графічна ілюстрація використання системи / Graphical illustration of the system usage (b)

Наприклад, нехай виміряно відстань до об'єкта тричі і отримано такі значення: $dist_1 = 100$ см; $dist_2 = 101$ см; $dist_3 = 102$ см. Існує можливість встановити, щоб значення першого виміру мало найбільший вплив на результат фільтрації, а значення третього виміру – найменший. У цьому випадку можна використовувати такі ваги: $w_1 = 2$; $w_2 = 1$; $w_3 = 0,5$. Середнє зважене значення цих трьох вимірів буде становити

$$dist_{filtered} = \sum_{j=1}^3 dist_j \cdot w_j = 101,33 \text{ см.}$$

Отже, фільтр замінює вимірне значення 102 см значенням 101,33 см.

Програмно реалізовано два типи фільтрів для оброблення сигналу від ультразвукового датчика:

1. Медіанний фільтр із трьох – приймає величину трьох останніх вимірювань і повертає опрацьоване значення, не залежне від порядку чисел.
2. Зважене середнє з коефіцієнтом:
 - а) після застосування медіанного фільтра код використовує зважене середнє для подальшого оброблення сигналу;
 - б) коефіцієнт k визначає, який вплив матиме поточне вимірне значення на відфільтроване значення;
 - в) якщо різниця між поточним і попереднім відфільтрованим значенням велика ($\Delta > 1$), то k буде близьким до 0,7. Це означає, що поточне вимірне значення матиме істотний вплив на результат фільтрації;
 - г) якщо ж різниця між поточним і попереднім відфільтрованими значеннями мала, то k буде близьким до 0,1. Це означає, що поточне вимірне значення матиме слабкий вплив на результат фільтрації.

Отже, код адаптивно регулює вплив нового вимірювання на відфільтроване значення, що дає змогу згладити сигнал і зменшити його коливання.

Графічне подання пристрою дистанційного мінування. Концептуально схема буде складатися із головного пристрою з ультразвуковим давачем відстані, який встановлюють на прогнозованому шляху підходу противника, а також приймачів з електродетонаторами, що монтується безпосередньо на мінних пристроях.

До головного пристрою можна під'єднати до 6 підвивників напряду та до $5^5 = 3125$ при використанні топології, що об'єднує усі приймачі в мережу.

На рис. 8,б графічно зображено концепцію використання пристрою дистанційного мінування.

Підбір модулів і компонентів. Для реалізації прототипу використаємо мікроконтролер Arduino Uno для основного пристрою-передавача та Arduino Nano для приймача, а також такі модулі та компоненти:

- ультразвуковий давач HC-SR04. Використовують для вимірювання відстані до об'єктів;
- дисплей LCD 1602 з модулем I2C/ПС. Дає змогу виводити текст і цифри на екран (для зручності відлагодження);
- радіопередавач NRF24L01 в кількості двох одиниць, для забезпечення зв'язку між пристроями;
- модуль реле, для комутації корисного навантаження (електродетонатора).

Проектування електричної схеми під'єднання. Проектуємо схему під'єднання передавача та приймача (рис. 6,б,с і рис. 9).

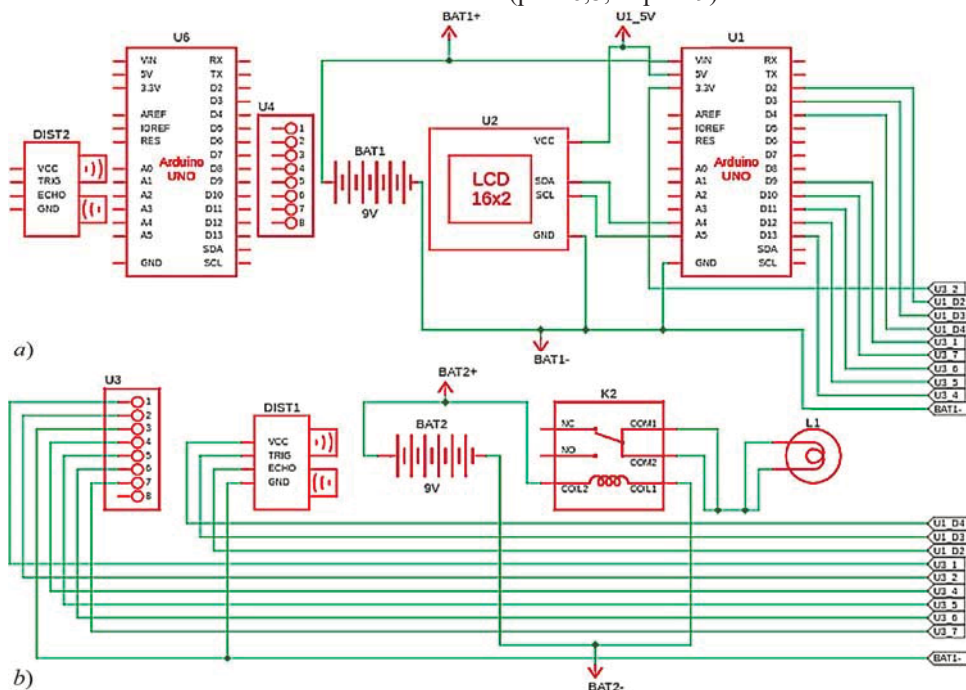


Рис. 9. Електрична схема системи / Electrical circuit of the system

Програмна реалізація. Для роботи з радіомодулем nRF24L01 використано бібліотеку nRF24L01.h. Вона містить функції для ініціалізації, налаштування та управління радіомодулем. Бібліотека RF24.h є надбудовою над nRF24L01.h та містить додаткові функції та можливості, які спрощують роботу з радіомодулем.

Загальний принцип роботи програми передавача:

- виконує процедуру зв'язування з приймачем радіосигналу способом надсилання пакетів з випадковим ідентифікатором;
- вимірює відстань за допомогою ультразвукового сенсора кожні 50 мс;
- фільтрує виміряні значення за допомогою медіанного фільтра та поточного середнього для точнішого оцінювання відстані;
- відображає відфільтровані значення на LCD-дисплеї;
- передає дані про відстань радіоканалом, якщо відстань менша за встановлену контрольну дистанцію.

Загальний принцип роботи програми приймача:

- приймає команди радіоканалом;
- звіряє ідентифікатор передавача та передає команду для управління реле;
- надсилає підтвердження про виконання команд;
- має функцію самознищення через певний час.

Binding процес та обмін ідентифікаторами. Після увімкнення передавач виконує процедуру зв'язування з приймачем радіосигналу способом надсилання пакетів

з випадково згенерованим ідентифікатором до отримання відповіді. Водночас, приймач після увімкнення, очікує, приймає цей пакет та відправляє у відповідь свій ідентифікатор. Це потрібно для того, щоб зафіксувати комунікацію між двома радіомодулями та виконувати команди тільки після перевірки, що вони надійшли з довіреного джерела. На рис. 7,б продемонстровано результати виведення монітору послідовного порта з процесом обміну ідентифікаторами.

Відпрацювання порогу контрольованої відстані.

На рис. 10 зображено результати відпрацювання спроектованої системи. Подаємо живлення на обидві схеми. Проходить Binding процес, а на дисплеї передавача відображено вимірювану відстань. Після перетину порогу встановленої дистанції 10 см, відправлено команду на приймач, який водночас вмикає реле та подає живлення на mp3 модуль, під'єднаний для демонстрації (червоний індикатор на реле та mp3 модулі).

Аналіз отриманих результатів дослідження. Останніми роками велику увагу як з боку українських науковців, так і закордонних учених приділяють проблемі ефективного встановлення мінних загороджень та дистанційного управління підливом через загострення військових протистоянь. У лютому 2022 р. Збройні сили України стикнулися із серйозними викликами під час знищення ворожих колон техніки. Оскільки застарі-

лі засоби встановлення та управління мінними загородами були мало ефективними, а сучасних зразків цих систем було обмаль.

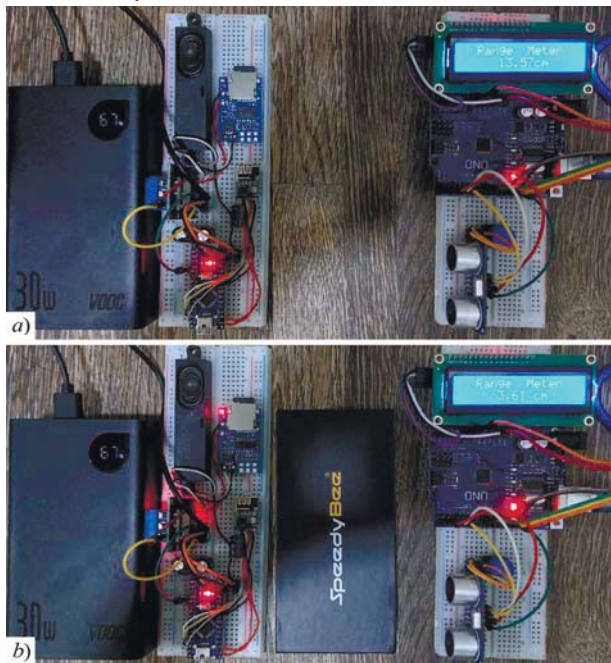


Рис. 10. Система у стані очікування / System in standby mode (a); спрацювання порогу наближення / Proximity threshold activation (b)

З 1970-х років на озброєнні перебуває безконтактний підривний пристрій НВУ-П "Охота" [18]. При встановленні, кожна міна з'єднується з приладом за допомогою двожильного мікрокабелю. Поруч з пристроєм в землю вкопується сейсмічний сенсор, що з'єднаний з приладом. У разі виявлення рухомих об'єктів (транспортних засобів, людей) в зоні дії, сейсмічний сенсор передає на прилад зареєстровані коливання ґрунту, який водночас активується у бойовий режим. На рис. 11 зображено комплектацію пристрою.

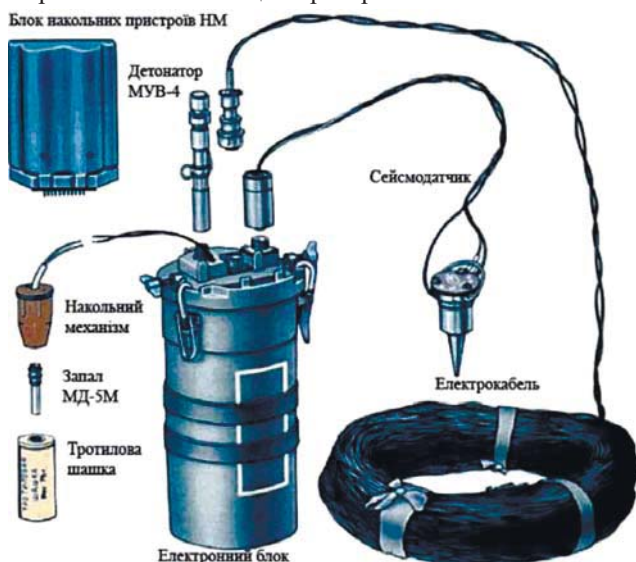


Рис. 11. Комплектація пристрою НВУ-П "Охота" / Complete set of the device NVU-P "Okhota"

Основні недоліки цього пристрою:

- складність експлуатації: НВУ-П "Охота" потребує спеціальних знань та навичок для установки та налаштування;
- відсутність самоліквідації: пристрій не має самоліквідації, що може призвести до нещасних випадків після завершення бойових дій;

- складність маскування: оскільки система складається з великої кількості елементів і використовує провідне з'єднання, ефективне маскування буде тривалим;
- максимальна дальність: довжина лінії управління становить 100-200 м, залежно від способу встановлення;
- габарити: 155×362 мм;
- вага: 4,2 кг.

Варто зазначити, що оборонний комплекс так званої РФ розпочав удосконалення цього пристрою та поставив на озброєння "новітній" НВУ-П2 "Охота-2".

Із сучасних видів цих пристроїв варто розглянути інженерно-саперну систему ПК-8 (рис. 12,а). Її основне призначення – бездротове дистанційне управління мінними полями та поодинокими зарядами. ПК-8 підтримує до 8 пристроїв-підривачів, прив'язаних до пульта управління. Дальність роботи становить 1-4 км. Вартість системи доволі велика і становить приблизно 50 тис. грн. На лютий 2023 р. виготовлено 35 таких комплектів [12].



Рис. 12. Комплектація / Complete set of: інженерно-саперної системи ПК-8 / engineering sapper system PK-8 (a); дистанційного підривача RF v1.0 / remote detonator RF v1.0 (b)

Також виготовляють зразки дистанційного підривача RF v1.0 (рис. 12,б). RF складається зі спеціальних модулів, які з'єднують з підривачами та встановлюються безпосередньо біля вибухових пристроїв [3]. До комплекту входить пульт, за допомогою якого оператор може моніторити ситуацію на безпечній відстані, та дистанційно підривати міну.

Проведений аналіз функціоналу цих пристроїв показав, що вони можуть працювати у двох режимах: автоматичному, де встановлюють таймер для спрацювання, та ручному, коли оператор активує приймач у необхідний момент. Доречно відзначити, що спрацювання через вказаний проміжок часу не завжди є ефективним, а залученість оператора в ручному режимі потребує постійного візуального контролю за ділянкою встановлення мінних загороджень. Вдалим рішенням є розширен-

ня функціоналу роботи даних пристроїв, що дасть змогу управляти підривом в автоматичному режимі. Для цього можна використовувати різноманітні давачі, що реагуватимуть на певні зміни ділянки встановлення загороджень та подаватимуть сигнал на підривачі. Це можуть бути давачі положення, вібрації, визначення відстані чи відеокамери з розпізнаванням об'єктів.

Потрібно визнати, що сфера розроблення та застосування подібних інженерно-саперних систем виникла відносно недавно, проте є доволі потрібною. З огляду на інтенсивну активність бойових дій, обмежену кількість подібних розробок та недостатню кількість виготовлених систем, надзвичайно актуальним є проведення досліджень з цієї проблеми та розроблення нових пристроїв керованого мінування з розширеним функціоналом.

Унаслідок проведеного дослідження спроектовано автоматизовану систему керованого мінування з удосконаленням практичності наявних засобів. Доведено, що ультразвукові давачі та радіомодулі є надзвичайно ефективними інструментами для вимірювання відстаней та передачі даних бездротовим шляхом. Вони демонструють високу точність та стабільність вимірювань, що робить їх особливо привабливими для застосування у різних галузях.

У процесі дослідження реалізовано методи оброблення сигналу для підвищення точності вимірювання ультразвуковим давачем. Для визначення точності вимірювання без алгоритму оброблення та з ним, проведено по 5 вимірювань відстані до одного і того самого об'єкта, розташованого на відстані 10 см. Для кожного вимірювання зафіксовано виміряні і дійсні відстані (таблиця).

Таблиця. Точність вимірювання до та після впровадження методів оброблення сигналу / Measurement accuracy before and after implementing signal processing methods

Виміряна відстань, см	Дійсна відстань, см	Похибка, см	Точність, %
Без алгоритму оброблення сигналу			
10,46	10	0,46	4,6
10,42	10	0,42	4,2
10,39	10	0,39	3,9
10,44	10	0,44	4,4
10,38	10	0,38	3,8
З алгоритмом оброблення сигналу			
10,06	10	0,06	0,6
10,11	10	0,11	1,1
10,09	10	0,09	0,9
10,10	10	0,10	1,0
10,09	10	0,09	0,9

Отже, за результатами п'яти вимірювань без алгоритму оброблення сигналу, було отримано середню похибку 0,418 см та точність 4,18 % і середню похибку 0,09 см та точність 0,9 % після впровадження фільтрів.

Розроблена система автоматичного захисту периметра об'єктів з використанням мінних загороджень має низку переваг, таких як:

- **висока точність і стабільність вимірювань:** завдяки використанню ультразвукового далекоміра система може точно визначати відстань до об'єкта;
- **безпеку:** система може управлятися з безпечної відстані, що мінімізує ризики для оператора;
- **ефективність:** система може використовуватися для захисту периметра об'єктів від несанкціонованого проникнення;

- **вартість:** розроблення та виготовлення системи не потребує великих коштів.

Розроблені алгоритми роботи системи були реалізовані на підставі мікроконтролера. Система має два режими роботи:

- **автоматичний режим:** у цьому режимі система автоматично активує мінне загородження, коли об'єкт наближається до нього на задану відстань;
- **ручний режим:** у цьому режимі управління виконується оператором за допомогою пульта.

Обговорення результатів дослідження. У роботі запропоновано прототип системи автоматичного захисту периметра об'єктів з використанням мінних загороджень. Потреба у розробленні подібного роду систем стала особливо актуальною в період повномасштабної війни. Досі комплексних досліджень з розроблення автоматизованих мінних загороджень практично не проводили. Більшість робіт цього напрямку мали цивільне спрямування, зокрема, для дистанційного підриву породи під час видобування корисних копалин, для дистанційних підривів під час виконання будівельних робіт тощо.

Прикладом може бути дистанційна вибухо-детонаційна система [14]. Ця система складається з передавача і щонайменше одного приймача, що має детонатор. Передавач передає електромагнітний сигнал, що має ідентифікаційний код передавача, який може бути прийнятий приймачем. Приймач ініціює детонатор, якщо ідентифікаційний код передавача збігається із внутрішнім ідентифікаційним кодом, збереженим у приймачі.

Ще один приклад подібної розробки цивільного призначення описано в патенті "Дистанційний підрип зарядів" [4]. Суть запропонованої розробки полягає в тому, що заряди вибухових речовин підриваються за допомогою дистанційного управління в середовищах із високим рівнем сторонньої електричної та електромагнітної енергії. Для кожного заряду вибухових речовин є свій окремий блок управління. Він приймає закодовані команди, передані по радіо з блоку управління, і, якщо ці команди відповідають попередньо встановленим критеріям, блок управління детонує заряд. Кожен блок управління з'єднаний зі своїм відповідним зарядом вибухової речовини за допомогою електричних або оптичних провідників, що забезпечує достатнє відокремлення, щоб дозволити блоку управління витримати детонацію заряду без пошкоджень.

Дослідження систем дистанційного управління підземної детонації здійснено у роботі [5], зокрема розглянуто програмно-технічне забезпечення блоку управління підземною і наземною детонацією, спосіб реалізації зв'язку в разі підземної і наземної детонації, технологію шифрування безпеки мережі дистанційної бездротової детонації та проектування системи безпеки. Під передумовою забезпечення безпеки розуміють реалізацію дистанційного управління вибуховими роботами, що має велике значення для розвитку технології підземних безпilotних вибухових робіт.

У роботі [2] досліджено можливість використання мережевої технології для детонації вибухових речовин малої потужності в підземних шахтах. Використання вибухівки під землею є потенційно небезпечною діяльністю, яку гірничодобувні компанії прагнуть зробити безпечнішою, прибравши персонал поблизу місця детонації. Наразі детонацію зазвичай здійснюють за допо-

могою відрізків мідного кабелю або інфрачервоного випромінювання, обидва з яких обмежують відстань між ініціатором і вибухівкою. Запропонована бездротова технологія є привабливою альтернативою, оскільки має набагато більший діапазон передачі, ніж інфрачервона передача та інші бездротові технології, такі як WiFi і ZigBee. Система використовує передачу повідомлень з кількома стрибками від ініціатора до детонатора через кілька ретрансляторів. Описано способи боротьби з шумами шляхом повторної передачі повідомлень. Усе забезпечує надійність та простоту запропонованої системи. За результатами дослідження також встановлено, що підземна бездротова передача зазнає серйозних спотворень без прямої видимості, але там, де ця лінія видимості є під землею, сигнал поширюється на великі відстані.

У роботі [6] зазначено, що для обмеження здійснення маневру військ противника, порушення запланованої діяльності його об'єктів, нанесення йому втрат мінно-вибуховими загородженнями й створення сприятливих умов для його ефективного ураження іншими вогневи-ми засобами застосовується дистанційне мінування. Дистанційне встановлення мінних полів здійснюється з використанням різноманітних прийомів та способів мінування, які залежать від тактики дій частин і підрозділів авіації ракетних військ і артилерії та підрозділів інженерних військ під час виконання бойових завдань. У публікації описано роботу системи управління мінування, яка буде використовуватися на мінних загороджувачах вітчизняних зразків, та спосіб покращення управління мінуванням. Результатами цієї роботи є використання комп'ютерних систем в управлінні та контролі дистанційного мінування.

Системи дистанційного управління детонацією, які наведені вище, здебільшого застосовують на цивільних об'єктах та не враховують особливостей їх застосування під час воєнних дій. Серед таких особливостей варто відзначити підвищені метрологічні характеристики. На цю вимогу зроблено акцент у роботі. Оскільки сигнали управління передаються безпроводним каналом, то другою вимогою є потреба стабільної роботи за умов дії електромагнітних завад. Саме ця вимога і визначає напрям подальших досліджень запропонованого пристрою керованого мінування на основі ультразвукових давачів.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вперше розроблено систему управління мінними загородженнями, на підставі застосування ультразвукових давачів з покращеними метрологічними характеристиками, що дає змогу виявляти цілі та виконувати підриг без потреби втручання оператора.

Практична значущість результатів дослідження – на підставі запропонованих моделей і методів розроблено прототип, який розширює та створює нові можливості управління мінними полями, що підвищить ефективність ураження та використання боєприпасів, а також забезпечить автоматичне спрацювання в разі виявлення цілі.

Висновки / Conclusions

Розроблено пристрій для дистанційного мінування на базі ультразвукових давачів з безпроводним каналом

комунікації, що дає змогу запровадити систему автоматичного спрацювання мінного загородження. За результатами дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Детально проаналізовано характеристики та потенціал ультразвукових давачів і радіомодулів у контексті вимірювань та бездротового зв'язку. Це дослідження спрямоване на створення та випробування прототипу системи автоматичного захисту периметра за допомогою мінних загороджень із вдосконаленим функціоналом.
2. Запропоновано систему дистанційного управління мінним загородженням, яка демонструє високу ефективність у лабораторних умовах і має великий потенціал для застосування у захисті стратегічних об'єктів, військових баз, складів, а також цивільних об'єктів. Особливістю запропонованого підходу є те, що система може функціонувати в автоматичному режимі та управлятися оператором з безпечної відстані.
3. Розроблено методику для точного визначення відстаней до об'єктів. Експериментально встановлено, що точність вимірювань відстані з використанням ультразвукових давачів становить 0.9 %. Застосування бездротових радіомодулів значно розширило функціональні можливості системи, надаючи можливість передавати критичні дані на значні відстані, підвищило безпеку операторів і зменшило ризики, пов'язані з мінуванням.
4. Результати дослідження підтверджують можливість успішного використання ультразвукових технологій у створенні систем автоматичного захисту периметра об'єктів з використанням мінних загороджень. Розроблені прототипи показують потенціал цих технологій у підвищенні безпеки та ефективності військових і цивільних об'єктів.
5. Результати цього дослідження мають значний теоретичний та прикладний потенціал, що дає можливість їх подальшого використання під час розроблення вдосконалених систем автоматичного захисту, створення нових моделей мінних загороджень з дистанційним управлінням, а також адаптації наявних систем до умов сучасної боротьби. Окрім цього, отримані дані є основою для розроблення нових технологій у галузі безпеки та оборони.

References

1. Badamasi, Y. A. (2014). The working principle of an Arduino. *The 11th international conference on electronics, computer and computation (ICECCO)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICECCO.2014.6997578>
2. Branch, P., & Cricenti, T. (2020). A LoRa Relay Based System for Detonating Explosives in Underground Mines. *International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 259–264. <https://doi.org/10.1109/ICIT45562.2020.9067213>
3. Brave Inventors. (2022). *Remote detonator RF v1.0*. URL: <https://braveinventors.com/en/invention/dystancijnyj-pidryvach-rf-v1-0/>
4. Carl, N. (1989). Guerrieri. Remote detonation of explosive charges. *Patent United States 4(884)*, 506. URL: <https://patents.google.com/patent/US4884506/en>
5. Chi Hong-peng (2020). Research on Underground Remote Control Detonation System. *International Conference on Machine Learning and Computer Application Journal of Physics: Conference Series*, 1682 p. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1682/1/012076>
6. Golushko, S., Pozigun, S., Malinovskiy, N., & Pryshchepa, O. (2021). Substantiation of the work of the automated mining control system. *Collection of scientific works of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Series: Military and Technical Sciences*, 84(1), 139–152. <https://doi.org/10.32453/3.v84i1.808>
7. Harun, O. (2023). Research of methods of overcoming mine blast barriers by battle units of the state border guard service of Ukra-

- ine with limited resources. *Collection of scientific papers of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Series: Military and Technical Sciences*, 93(4), 149–157. <https://doi.org/10.32453/3.v93i4.1474>
8. Huslyakov, O. M. (2012). Analysis of world experience of application and progress of military robotic systems tendencies. *Military-Technical Digest*, 6, 120–127. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.6.2012.120-127>
 9. Jadhav, P. Y., & Rajendrakumar, A. P. (2016). Mechanism of Electronic Delay Device for Detonator. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5(5), 8640–8651. <https://doi.org/10.15680/IJRSET.2016.0505289>
 10. Justusson, B. I. (2006). Median filtering: Statistical properties. *Two-Dimensional Digital Signal Processing II: Transforms and Median Filters*, 161–196. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85040209193&origin=inward&txGid=23ea8622f6e3a02a77996576e905ae16>
 11. Kurtseitov, T. L., Mosov, S. P., Trembovetsky, M. P., & Yasko, V. A. (2020). Mine weapons in the focus of modern wars and armed conflicts. *Collection of scientific papers of the Center for Military Strategic Studies of the Ivan Chernyakhovsky National University*, 116–121. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2020-2-69/116-121>
 12. Militarnyi. (2023). *Ukrainian Territorial Defense received PK-8 sapper systems*. URL: <https://armyinform.com.ua/2023/02/22/pid-rozdily-syl-tro-zsu-otrymaly-innovacijnu-sapernu-systemu-pk-8/>
 13. Muzayyanah, E., Megananda, A., Darmayanti, H. P., & Priana, Z. I. (2021). Development of digital distance measurement instrument based on Arduino Uno for physics practicum. *Impulse: Journal of Research and Innovation in Physics Education*, 1(2), 80–88. <https://doi.org/10.14421/impulse.2021.12-03>
 14. Plummer, Brady A., Fisherlan, Delmer D., Knopf, A., Plummer, Robert W., GalantiJoe, Benjamin J., Lewis, L., Marion, J. R., & Hensley, P. (2008). Remote Explosion Detonation System. *Patent US20110174181A1 United States*. URL: <https://patents.google.com/patent/US20110174181A1/en>
 15. Ramesh, P., Sudheera, S., & Reddy, D. V. (2021). Distance measurement using ultrasonic sensor and Arduino. *Journal of Advanced Research in Technology and Management Sciences (JARTMS)*, 3(2), 1–5. URL: http://jartms.org/view_issue.php?title=Distance-Measurement-Using-Ultrasonic-Sensor-and-Arduino
 16. Rawle, W. D. (2005). Conditions for remote detonation of explosive initiators using RF energy. *Technical report, Smiths Aerospace*, 32–37. URL: http://www.summittechmedia.com/highfrequency/Oct05/1005_Rawle.pdf
 17. Roskladka, A., Roskladka, N., & Romanyuk, O. (2022). System Analysis of the Internal and External Migration Processes in Ukraine. *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision Making, ISDMCI*, 149, 302–319. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16203-9_18
 18. Sappers. (2022). *Non-contact explosive device NVU-P "Okhota"*. URL: <https://sappers.com.ua/dovidnyk/miny/protypihotni-kero-vanoyi-diyi/nvu-p-okhota>
 19. Strutinsky, V. B., & Gurzhiy, A. M. (2023). *Ground robotic systems*. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57111>
 20. Tirado, P., & Valero, O. (2009). The average running time of an algorithm as a midpoint between fuzzy sets. *Mathematical and computer modelling*, 49(9-10), 1852–1868. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.08.003>
 21. United Nations. (2001). The Convention on Certain Conventional Weapons. *Office for Disarmament Affairs*. URL: <https://disarmament.unoda.org/the-convention-on-certain-conventional-weapons/>
 22. Zhurong, Chen, et al. (2008). Protocol architecture for wireless body area network based on nRF24L01. *International Conference on Automation and Logistics*, 3050–3054. <https://doi.org/10.1109/ICAL.2008.4636702>

I. A. Symak, I. M. Zhuravel, L. Z. Mychuda

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

REMOTE MINING SYSTEM BASED ON ULTRASONIC SENSORS WITH A WIRELESS COMMUNICATION CHANNEL

The structure and functionality of ultrasonic sensors and wireless modules are investigated. The efficiency and accuracy of the results of distance measurement using ultrasound are evaluated. During the military confrontations on the territory of Ukraine, it will be relevant to use these technologies for the installation of minefields with the possibility of remote control and modernization of existing engineering systems, which provides new prospects for increasing the efficiency and safety of military operations. Modern engineering systems are thoroughly analyzed, their key characteristics and modes of operation are determined. Based on theoretical studies, a prototype of an ultrasonic distance finder was developed, which became the basis for the creation of an automated controlled mining device. To ensure that the development complies with regulations, the relevant legal framework, namely the Convention on Prohibitions or Restrictions on the Use of Certain Conventional Weapons Which May Be Deemed to Be Excessively Injurious or to Have Indiscriminate Effects, was carefully studied. Signal processing methods that allowed significant improving the accuracy of measuring distances to objects using an ultrasonic sensor played an important role in the research. The development and implementation of the hardware and software components of the guided minefield device was based on an in-depth analysis of the needs of modern engineering systems and considering the specific conditions of their application. Due to the careful development and testing of the prototype, the research confirmed the high efficiency and potential of ultrasonic technologies in the field of military engineering solutions, which opens the way for further innovations and improvements in this area. The main result of the research is the development of a prototype of a guided mine device that will simplify its installation and operation, as well as provide a high level of camouflage on the ground, which is critical for military use. Further research should consider different types of sensors and their use in specific operational and tactical cases. This will help identify the most promising areas for further improvement of the modular system, increasing its efficiency and adaptability to changing military conditions.

Keywords: radio module; rangefinder; microcontroller; measurement accuracy; filtering; radio communication; weapons.