

УДК 621.317.37

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.90-99>С.О. Тишко<sup>1\*</sup>, О.О. Лаврут<sup>2</sup>, В.М. Заїка<sup>1</sup>, В.В. Пустоваров<sup>3</sup><sup>1</sup> Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки України, Черкаси<sup>2</sup> Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів<sup>3</sup> Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, Київ

## МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ТОЧНОСТІ СИНХРОНІЗАЦІЇ ШКАЛ ЧАСУ СТАНЦІЙ РАДІОНАВІГАЦІЙНОЇ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ БЕЗПЛОТНИХ КОМПЛЕКСІВ

Проведено аналіз відомих стратегій застосування наземних рухомих безпілотних систем, що знайшли найбільше розповсюдження на теперішній час. До найпоширенішої стратегії застосування віднесено виконання місії (задачі) індивідуально кожним рухомих виробом під керуванням оператора з використанням двосторонніх каналів зв'язку. Зі станції керування та контролю на рухомий об'єкт передаються сигнали керування, а в зворотному напрямку надходить телеметрична інформація і відеосигнал. Визначені недоліки, які суттєво впливають на технічні характеристики наземних безпілотних систем, обумовлені зазначеною стратегією застосування. Встановлено, що одним із факторів, який обмежує реалізацію стратегії автономного (напіваавтономного) застосування, є недостатній рівень завадозахищеності систем навігаційного забезпечення наземних рухомих безпілотних систем на базі використання глобальних супутникових радіонавігаційних систем. В якості альтернативного підходу для реалізації системи навігаційного забезпечення наземних рухомих безпілотних систем запропоновано використовувати локальні радіонавігаційні системи, що реалізують кодовий псевдододалекомірний метод визначення навігаційних характеристик. Запропонована мінімальна типова структура локальних радіонавігаційних систем. Як метод порівняння частот задаючих генераторів пропонується використовувати фазове підлаштування частоти. В якості метода визначення розходження фаз задаючих генераторів (стандартів) навігаційних станцій пропонується використати кореляційний метод вимірювання фазового зсуву двох гармонійних сигналів, в основі якого лежить порівняння форми сигналу, отриманого шляхом підсумування після проведення їх двонапівперіодного перетворення з набором еталонних функцій. Запропонована математична модель реалізації даного способу визначення фазового зсуву. Визначені подальші кроки вдосконалення існуючої системи навігаційного забезпечення наземних рухомих безпілотних об'єктів.

**Ключові слова:** наземна рухома безпілотна система, мережа навігаційного забезпечення, локальна радіонавігаційна система, фазовий зсув, двонапівперіодне перетворення.

### Постановка проблеми

На теперішній час розглядається можливість застосування рухомих безпілотних систем під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (виконання пошукових місій, ліквідація та попередження наслідків надзвичайних ситуацій, гасіння пожеж та інші), захисту громадського порядку (пошук, попередження та припинення протизаконної діяльності, пошук та вилучення з обігу заборонених речовин,

поліцейське переслідування), в медичній (для проведення догляду за хворими, діагностування і лікування хвороб), військовій сфері та багатьох інших [1].

На сьогодні найпоширенішою стратегією застосування рухомих безпілотних систем є система з одним рухомих виробом [2, 3]. Виконує місію індивідуально кожний рухомий виріб під керуванням оператора з використанням двосторонніх каналів зв'язку передачі сигналів керування на рухомий та

Article history: Income 06 October 2025; Revised 16 October 2025; Accepted 18 October 2025; Print 05 December 2025

Тишко С.О. ORCID ID: 0000-0003-3838-2027, Лаврут О.О. ORCID ID: 0000-0002-4909-6723

Заїка В.М. ORCID ID: 0000-0001-5965-0233, Пустоваров В.В. ORCID ID: 0000-0003-3944-5771

\* Corresponding author [Sergeytyshko57@gmail.com](mailto:Sergeytyshko57@gmail.com)

телеметричної інформації і відеопотоку з рухомого виробу до оператора, тобто реалізується метод наскрізного спілкування. Цей підхід має три суттєві недоліки:

1) якість зв'язку залежить від відстані та характеристик середовища, в якому виконує місію безпілотник, а також від рельєфу місцевості [4];

2) доволі великий час відгуку обмежує дрон у виконанні завдань, які потребують відносно великої відстані [5];

3) дрон не може оперативнo змінювати параметри руху, вчасно повідомляти про свій технічний стан та надавати телеметричну інформацію у випадку неможливості передавати інформацію існуючим каналом, а в певних випадках неможливість відпрацювати режим «повернення до дому» [6, 7].

Виходячи з вищенаведеного, найбільш перспективним напрямом реалізації способу застосування безпілотників є режим напіваавтономного або автономного виконання місій в групі або рої. Одною із головних умов реалізації вказаного принципу застосування безпілотних систем є забезпечення стійкого з потрібною точністю навігаційного забезпечення.

Найбільш поширеним джерелом отримання навігаційної інформації для сучасних безпілотних систем є комплексування інерційної навігаційної системи з приймачем глобальних супутникових радіонавігаційних систем. Цей спосіб отримання навігаційної інформації обумовлений тим, що методи, покладені в основу реалізації інерційних навігаційних системи визначення місця знаходження рухомих об'єктів, накопичують похибку з часом. Для проведення корекції інерційних навігаційних систем використовується навігаційна інформація від зовнішніх джерел, до яких відносяться глобальні супутникові навігаційні системи.

На теперішній час використовуються чотири глобальні супутникові радіонавігаційні системи, а саме Global Positioning System (GPS), ГЛОНАСС, GALILEO та BeiDou. Найбільш поширений підхід визначення навігаційних параметрів з використанням вказаних систем – це кодовий псевдодалекомірний метод.

Сутність псевдодалекомірного методу відповідно до [8] полягає у визначенні відстаней між навігаційними супутниками і споживачем з подальшим розрахунком координат споживача. Якщо координати споживача оцінюються за допомогою однієї супутникової навігаційної системи, то при одномоментних розрахунках трьох координат і оцінки розбіжності шкал часу супутника і приймача псевдодалекомірним методом необхідно знати відстані між споживачем і мінімум чотирма навігаційними супутниками. Ці відстані вимірюються між фазовими центрами передавальної антени навігаційного супутника і приймальної

антени споживача і застосовуються для формування чотирьох рівнянь, вирішення яких дає оцінку значень трьох координат і розбіжності шкал часу.

Передавана супутником інформація включає дві складові: псевдовипадковий далекомірний код («відмітка дальності»), за допомогою якого вимірюється дальність до супутника; навігаційне повідомлення, що містить необхідну споживачеві інформацію. Навігаційне повідомлення (його структура і склад дещо відрізняються для різних СРНС) включає в себе поточні координати супутника (ефемериди), дані про стан (справність) і елементи орбіт всіх супутників (так званий альманах), зсув шкал часу супутника від системного часу і системного часу від UTC (Coordinated Universal Time – координований всесвітній час), відміну випромінюваної частоти від номінальної тощо. Псевдовипадковий далекомірний код являє собою дуже довгу послідовність «імпульсів». Ця послідовність виглядає зовсім випадковою, але насправді формується за цілком певним законом. Цей закон і є кодом, без знання якого отримати інформацію зі супутника неможливо. Навігаційна апаратура споживачів складається з навігаційних приймачів і обчислювальних пристроїв, призначених для обробки навігаційних сигналів. Цією апаратурою виконуються беззапитні вимірювання псевдодальностей і радіальних швидкостей супутників, а також розрахунки, необхідні для отримання навігаційної інформації користувачами.

Однак суттєвим недоліком сучасних глобальних супутникових систем є неможливість доступу до їх інформації в певних умовах застосування безпілотних систем, наприклад, під час впливу засобів електромагнітного випромінювання, у міській забудові та лісовій місцевості.

## Мета досліджень

Запропонувати альтернативний метод проведення корегування показів інерційної навігаційної системи із застосуванням локальної радіонавігаційної мережі, яка може розгортатися на базі технічних засобів існуючої системи видачі диференційних поправок та корпоративних станцій LTE (Long Term Evolution – стандарт бездротового широкосмугового зв'язку) зв'язку. Використання цього підходу видачі поправок до інерційної навігаційної системи дозволить організовувати автоматичний (напіваавтоматичний) режим керування наземними безпілотними системами та знизить витрати на створення систем передачі сигналів керування та відеопотоку, організовувати більш віддалені місії на різних рельєфах місцевості, що приведе до зниження витрат на експлуатацію наземних безпілотних комплексів.

## Виклад основного матеріалу

В якості альтернативного підходу для організації навігаційного забезпечення безпілотних систем пропонується використання локальних наземних радіонавігаційних систем, що реалізують кодовий псевдодалекомірний метод визначення навігаційних характеристик руху. Локальні навігаційні системи пропонується розгортати з використанням існуючої мережі станцій видачі диференційних поправок з доопрацюванням можливості видачі навігаційних кодових повідомлень, яку доцільно доповнити додатковими локальними навігаційними станціями, наприклад, з використанням корпоративних станцій LTE зв'язку. Вибір даних засобів обумовлений наявністю в їхньому складі прецензійних квантових (цезієвих, рубідієвих) стандартів частоти. Наявних даних засобів у складі вищенаведених технічних систем дозволить організувати локальну радіонавігаційну систему.

Найбільш поширеним методом, що знайшов широке застосування в локальних системах видачі навігаційної інформації, є псевдодалекомірний метод. Сутність зазначеного методу полягає у визначенні відстаней між локальними навігаційними станціями і рухомим об'єктом безпілотного наземного комплексу з подальшим розрахунком координат об'єкта. Виходячи з того, що координати безпілотного апарату, оцінюються за допомогою однієї локальної корпоративної радіонавігаційної системи, то при одномоментних розрахунках трьох координат і оцінки розбіжності шкал часу локальної мережі і приймача псевдодалекомірним методом необхідно знати відстані між безпілотним апаратом і мінімум чотирма навігаційними станціями. Ці відстані вимірюються між фазовими центрами передавальної антени навігаційної станції і приймальної антени безпілотного апарата і застосовуються для формування чотирьох рівнянь, вирішення яких дає оцінку значень трьох координат і розбіжності шкал часу.

Як відомо, дальність є розрахунковою величиною і обчислюється як добуток швидкості поширення електромагнітних коливань і часу, протягом якого сигнал навігаційної станції за лінією «навігаційна станція – безпілотний апарат» досягне безпілотного апарата. Цей час вимірюється в апаратурі споживача радіонавігаційної системи на борту безпілотного апарата. Виміряне значення псевдодальності  $D_{meq\ i}$  від споживача до  $i$ -ї навігаційної станції визначається співвідношенням:

$$D_{meq\ i} = ct_i, \quad (1)$$

де  $t_i$  – час поширення сигналу за лінією «і-та навігаційна станція – безпілотний апарат» на момент проведення навігаційних визначень;

$c$  – швидкість поширення електромагнітних хвиль в просторі.

Вищенаведене співвідношення через відомі координати  $(X_i, Y_i, Z_i)$   $i$ -ї навігаційної станції можна записати і координати  $(X, Y, Z)$  безпілотного апарата:

$$D_{meq\ i} = [(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2]^{1/2} \quad (2)$$

Координати  $X, Y, Z$  споживача знаходяться шляхом розв'язання системи з мінімум трьох вищенаведених рівнянь для трьох навігаційних станцій при їхніх відомих координатах і виміряних псевдодальностях.

Оскільки шкали часу локальної навігаційної мережі і шкала часу на борту безпілотного апарата несинхронізовані, то при визначенні псевдодальностей буде похибка через розбіжності шкал часу.

З урахуванням одномоментності вимірювання псевдодальностей, а також синхронізації шкал часу навігаційних станцій між собою, розбіжність шкали часу станцій і споживача в момент визначення псевдодальностей можна вважати величиною постійною, але невідомою. З урахуванням розбіжності шкали часу, що призводить до помилки  $h_\tau$ , виміряну дальність можна записати

$$D_{meq\ i} = [(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2]^{1/2} + h_\tau \quad (3)$$

У цій системі чотири невідомих  $X, Y, Z$  та  $h_\tau$  для її вирішення вже необхідно чотири рівняння, тобто потрібно визначення псевдодальностей, принаймні до 4 навігаційних станцій. Обчислювач бортового приймача безперервно чисельно вирішує цю систему рівнянь, визначаючи прямокутні координати і поправку до бортових годинників. В результаті цього на борту об'єкта завжди відомий точний час локальної навігаційної системи.

Розбіжність шкал часу мережі навігаційних станцій і апаратури споживача не є єдиним джерелом помилок при визначенні псевдодальностей. Тому доцільно проводити врахування похибок частотно-часового забезпечення, похибок через багатопромінене поширення сигналів навігаційних станцій в місці прийому, шумів приймального каналу апаратури споживача, що встановлена на борту безпілотного апарата і похибок через природні та навмисні завади.

Аналіз сучасних приймачів навігаційних сигналів показує, що завдання зменшення похибок, обумовлених багатопроміненістю поширення сигналів

навігаційних станцій в місці прийому, шумів приймального каналу апаратури споживача, що встановлена на борту безпілотної апаратури і похибок через природні та навмисні завади, вирішена з використанням як алгоритмічних, так і апаратних рішень.

У випадку роботи локальної корпоративної радіонавігаційної мережі в режимі без доступу до зовнішніх джерел еталонних частот, з метою забезпечення встановленого рівня точності синхронізації шкали часу навігаційних станцій, пропонується організувати групову міру частоти і часу на базі прецензійних квантових стандартів частоти, що, як правило, входять до складу технічних засобів станцій, які пропонуються до обслуговування певної ділянки місцевості.

Тоді виходячи з вищенаведеного, пропонується наступна схема проведення визначення координат наземного безпілотної комплексу, з системою синхронізації базових станцій (рис. 1).

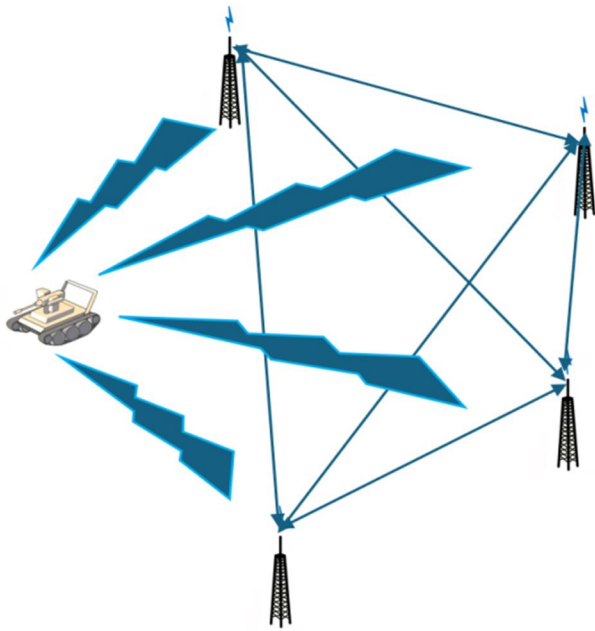


Рис. 1. Структурна схема локальної навігаційної мережі

В якості методу порівняння частот задаючих генераторів пропонується використовувати фазове підлаштування частоти. В якості метода визначення розходження фаз задаючих генераторів (стандартів) навігаційних станцій пропонується використати кореляційний метод вимірювання фазового зсуву двох гармонійних сигналів, в основі якого лежить порівняння форми сигналу отриманого шляхом підсумування

після проведення їх двонапівперіодного перетворення з набором еталонних функцій, який наведений в [9].

Вибір цього способу визначення фазового зсуву обумовлений тим, що найбільш поширеним способом модуляції у цифрових засобах зв'язку є фазова модуляція або використання її з іншими видами модуляції. Застосування цього підходу для визначення фазового зсуву дозволить збільшити точність вимірювання при застосуванні несучих інформаційних сигналів, зменшити час на проведення вимірювання.

Для вирішення зазначеної задачі запропонована математична модель реалізації цього способу визначення фазового зсуву. При синтезі моделі використовується математичний апарат теорії обробки результатів факторного експерименту, математичної статистики, графів, численних методів пошуку екстремумів. Графічне представлення математичної моделі визначення фазового зсуву двох гармонійних сигналів, в основі якого лежить порівняння форми сигналу, отриманого шляхом підсумування після проведення їх двонапівперіодного перетворення з набором еталонних функцій з використанням в якості критерію збіг вказаних функцій максимум коефіцієнт кореляції, наведена на рис. 2.

Розглянемо більш детально порядок вирішення зазначеної вимірювальної задачі. На вхідний пристрій 1 надходить сигнал  $u_{in1}(t)$  та вхідний пристрій 2 надходить сигнал  $u_{in2}(t)$ . Вказані сигнали складаються з гармонічного сигналу, що несе навігаційну інформацію, та набору випадкових шумових сигналів. Смуга пропускання фільтрів налаштована на частоту гармонічного сигналу, що несе навігаційну інформацію. Після виконання операції фільтрації отримуємо на виходах фільтру 1 сигнал  $u_{f1}(t)$  та фільтру 2 сигнал  $u_{f2}(t)$ .

З метою досягнення збільшення точності вимірювання, за рахунок покращення чутливості вимірювання величини фазового зсуву вхідних гармонічних сигналів, сигнали  $u_{f1}(t)$  та  $u_{f2}(t)$  надходять на входи підсилювача 1 та підсилювача 2. На виходах зазначених пристроїв отримуємо сигнали  $u_1(t)$  та  $u_2(t)$ , амплітуди вказаних сигналів відрізняється не більш ніж на 20 відсотків.

Після проведення вищевказаних операцій, можна стверджувати, що існує два гармонічних сигнали  $u_1(t)$  і  $u_2(t)$ , які мають фазовий зсув один щодо іншого, рівний  $\Delta\varphi$ , який належить інтервалу від 0 до  $2\pi$ .

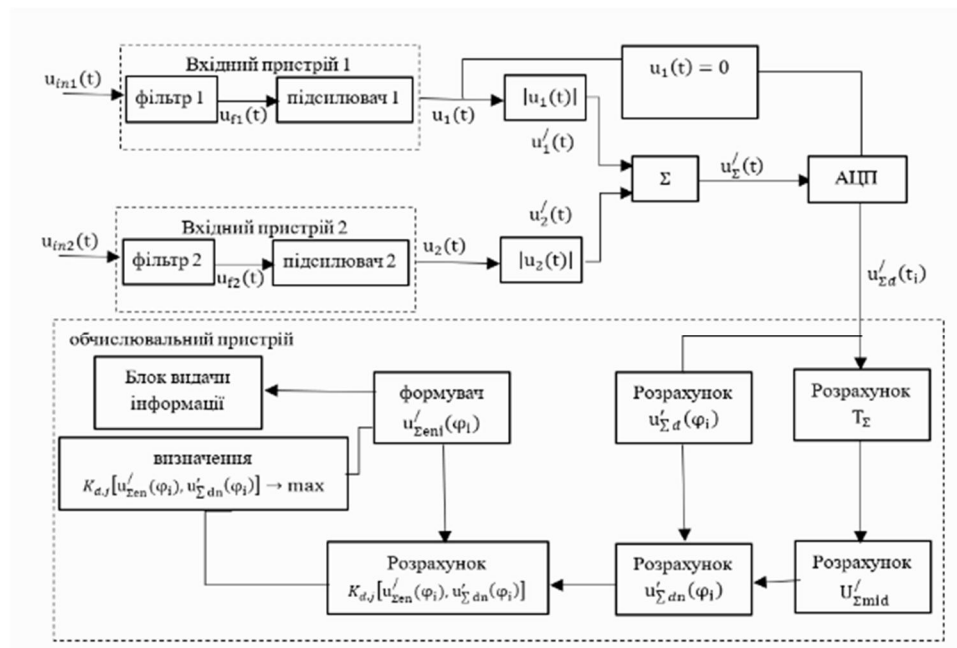


Рис. 2. Графічне подання математичної моделі визначення фазового зсуву двох гармонічних сигналів

Виходячи з того, що вимірювання фазового зсуву відносяться до відносних вимірювань, напишемо зміни сигналів  $u_1(t)$  і  $u_2(t)$ , у вигляді:

$$u_1(t) = U_{m1} \cos(2\pi ft), \quad (4)$$

$$u_2(t) = U_{m2} \cos(2\pi ft + \Delta\varphi) \quad (5)$$

де  $U_{m1}$ ,  $U_{m2}$  – амплітуда сигналів  $u_1(t)$  та  $u_2(t)$  відповідно;

$f = \frac{1}{T}$  – частота сигналів;

$T$  – період слідування сигналів.

Відповідно до (4) та (5), часові діаграми для даних сигналів  $u_1(t)$  і  $u_2(t)$ , що мають певний фазовий зсув один щодо іншого, на кут, значення якого дорівнює  $\Delta\varphi$ , наведена на рис. За та рис. 3б.

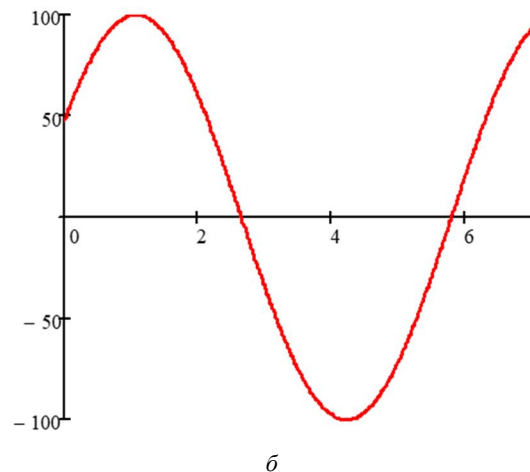


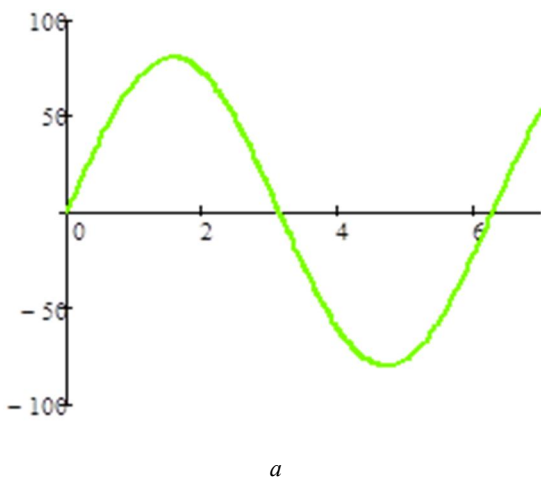
Рис. 3. Часова діаграма сигналу;  
а –  $u_1(t)$ ; б –  $u_2(t)$

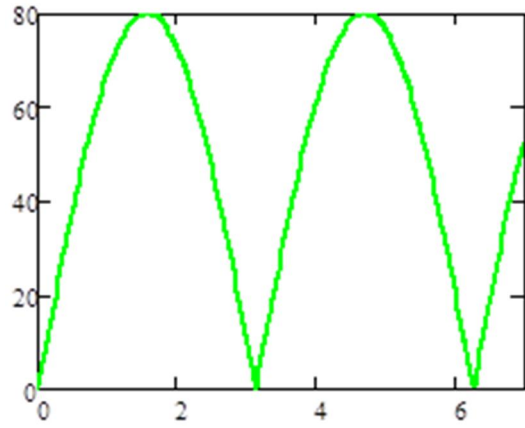
Після виконання вищезазначених операцій сигнали  $u_1(t)$  і  $u_2(t)$  надходять до двонапівперіодних перетворювачів. На виходах перетворювачів отримуємо сигнали:

$$u'_1(t) = |u_1(t)| = |U_{m1} \cos(2\pi ft)| \quad (6)$$

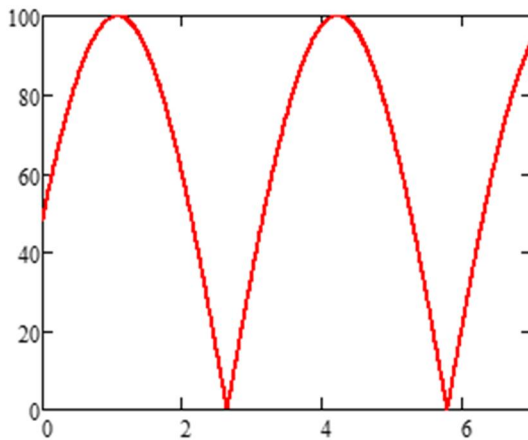
$$u'_2(t) = |u_2(t)| = |U_{m2} \cos(2\pi ft + \Delta\varphi)| \quad (7)$$

Часова діаграма для даних сигналів наведена на рис. 4 а та 4 б.





а



б

Рис. 4. Часова діаграма сигналів:  
а –  $u_1(t)$ ; б –  $u_2(t)$

З виходів двонапівперіодних перетворювачів сигнали  $u_1'(t)$  і  $u_2'(t)$  надходять на входи суматора, на виході суматора отримаємо сигнал  $u_\Sigma'(t)$ , часова діаграма якого наведена на рис. 5

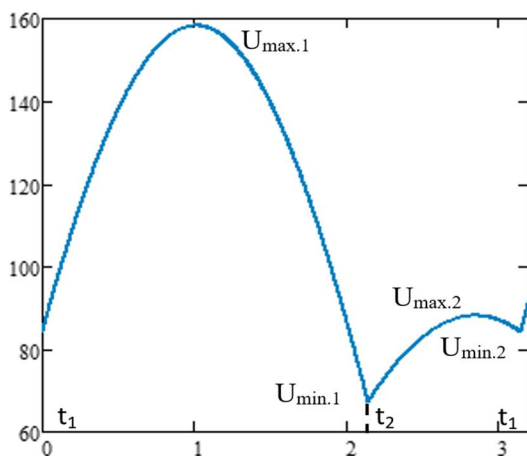


Рис. 5. Часова діаграма сигналів  $u_\Sigma'(t)$

Та описується наступним співвідношенням:

$$u_\Sigma'(t) = \begin{cases} U_{1\min} + \frac{U_{1\min} - U_{2\min}}{t_{1.2}} t + \\ + \left( U_{1\max}' - \frac{U_{1\min} + U_{2\min}}{2} \right) \times \\ \times \sin(f_{1.2} t) \\ \text{для } t_1 \leq t < t_2 \\ U_{2\min} + \frac{U_{2\min} - U_{1\min}}{t_{2.1}} t + \\ + \left( U_{2\max}' - \frac{U_{2\min} + U_{1\min}}{2} \right) \times \\ \times \sin(f_{2.1} t) \\ \text{для } t_2 \leq t < t_1 \end{cases} \quad (8)$$

де  $U_{1\min}$  і  $U_{2\min}$  – точки розриву функції на інтервалі від 0 до  $\frac{T}{2}$ ;

$U_{1\max}' = (U_{m1} + U_{m2}) \cos \frac{\Delta\varphi}{2}$  – локальний максимум на інтервалі часу  $t_1 \leq t < t_2$ ;

$U_{2\max}' = (U_{m1} + U_{m2}) \sin \frac{\Delta\varphi}{2}$  – локальний максимум на інтервалі часу  $t_2 \leq t < t_1$ .

Сигнал  $u_\Sigma'(t)$  надходить на вхід аналогово-цифрового перетворювача. На вхід запуску перетворювача надходить сигнал початку аналогово-цифрового перетворення за умови  $u_1(t) = 0$  при переході від від'ємного значення до позитивного значення. Операція аналогово-цифрового перетворення закінчується за умови  $u_1(t) = 0$  при переході від позитивного значення до від'ємного. Відповідно до [10], отримаємо вектором миттєвих значень  $u_{\Sigma d}'(t_i)$ .

$$u_{\Sigma d}'(t_i) = (U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n), \quad (9)$$

де  $U_i$  – миттєві значення сигналу  $u_\Sigma'(t)$  в  $i$ -й момент часу;

$n$  – кількість відліків, отриманих при проведенні аналогово-цифрового перетворення сигналу  $u_\Sigma'(t)$  на інтервалі від 0 до  $\frac{T}{2}$ .

Вектор  $u_{\Sigma d}'(t_i)$  надходить у обчислювальний пристрій, де по відомих значеннях частоти дискретизації  $f_d$  та кількості відліків  $n$  обчислюється період сигналу  $u_\Sigma'(t)$  наступним співвідношенням

$$T_\Sigma = \frac{T}{2} = \frac{n}{f_d} = n\Delta t. \quad (10)$$

З метою спрощення процедури визначення  $\Delta\varphi$  проводиться перехід від вектора  $u_{\Sigma d}'(t_i)$  до вектора відліків по фазі  $u_{\Sigma d}'(\varphi_i)$ , для чого визначається крок дискретизації по фазі  $\Delta\varphi_D$ , за відомих значенням  $T_\Sigma$  з використанням наступного співвідношення

$$\Delta\varphi_D = \frac{\Delta t \cdot 2\pi}{T} \quad (11)$$

Для зменшення методичної складової похибки вимірювання проводиться нормування миттєвих значень вектора  $u_{\Sigma d}'(\varphi_i)$  до середнього значення  $U_{\Sigma mid}'$ , яке розраховується з використанням співвідношення

$$U_{\Sigma mid}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (12)$$



Тоді нормована функція  $u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i)$  буде мати вигляд

$$u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i) = \left( \frac{U_1}{U'_{\Sigma \text{mid}}}, \dots, \frac{U_i}{U'_{\Sigma \text{mid}}}, \dots, \frac{U_n}{U'_{\Sigma \text{mid}}} \right) \quad (13)$$

$$= (U_{1.n}, U_{2.n}, \dots, U_{i.n}, \dots, U_{n.n})$$

Амплітуди сигналів  $u_1(t)$  і  $u_2(t)$  близькі, тоді у якості еталонного вектора  $u'_{\Sigma e}(\varphi_i)$  пропонується використати функцію сумарного сигналу, отриманого після проведення напівдвоперіодного перетворення за умови рівності амплітуд  $U_{\text{me}}$ , відповідно до віддіків по фазі. Для розрахунку елементів еталонного вектора  $u'_{\Sigma e}(\varphi_i)$  розраховується з використанням виразу

$$u'_{\Sigma e}(\varphi_i) = \begin{cases} U_{e.\text{min}} + (U_{e1\text{max}} - U_{e.\text{min}}) \times \\ \times \sin\left(\left(1 - \frac{\Delta\varphi}{\pi}\right)^{-1} \varphi_i\right) \\ \text{для } 0 \leq \varphi_i < \pi - \Delta\varphi \\ U_{e.\text{min}} + (U_{e2\text{max}} - U_{e.\text{min}}) \times \\ \times \sin\left(\left(\frac{\Delta\varphi}{\pi}\right)^{-1} (\varphi_i - (\pi - \Delta\varphi))\right) \\ \text{для } \pi - \Delta\varphi \leq \varphi_i < \pi \end{cases} \quad (14)$$

де  $U_{e.\text{min}} = U_{\text{me}} \sin \Delta\varphi$  – значення точки розриву еталонної функції на інтервалі від 0 до  $\pi$ ;

$U_{e1\text{max}} = 2U_{\text{me}} \cos(2\Delta\varphi)$  – максимальне значення еталонної функції на інтервалі  $0 \leq \varphi_i < \pi - \Delta\varphi$ ;

$U_{e2\text{max}} = 2U_{\text{me}} \sin(2\Delta\varphi)$  – максимальне значення еталонної функції на інтервалі  $\pi - \Delta\varphi \leq \varphi_i < \pi$ .

Провівши розрахунок до вищевказаного виразу для кожного значення  $\varphi_i$ , при певному значенні фазового зсуву  $\Delta\varphi$  та виконавши нормування до середнього значення  $j$ -ї еталонної функції, яке визначається співвідношенням

$$\bar{U}_{\text{mid } e.j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{i.e.j}, \quad (15)$$

отримаємо вектор нормованої еталонної функції

$$u'_{\Sigma \text{enj}}(\varphi_i) = (U_{1.e.j}, U_{2.e.j}, \dots, U_{i.e.j}, \dots, U_{n.e.j}) \quad (16)$$

Тоді з урахуванням вище викладеного постановку задачі визначення фазового зсуву гармонічних сигналів  $u_1(t)$  і  $u_2(t)$  сформулюємо наступним чином: зі всієї множини нормованих еталонних функцій  $u'_{\Sigma \text{en}}(\varphi_i)$  вибрати таку,  $j$ -ту функцію,  $u'_{\Sigma \text{enj}}(\varphi_i) = (U_{1.e.j}, U_{2.e.j}, \dots, U_{i.e.j}, \dots, U_{n.e.j})$ , яка найбільш повно відповідає нормованому сигналу  $u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i) = (U_{1.n}, U_{2.n}, \dots, U_{i.n}, \dots, U_{n.n})$ .

В якості показника ступеня збігу декількох дискретних функцій знаходить широке застосування така величина, як коефіцієнт кореляції. Співвідношення для

визначення вказаної величини для векторів  $u'_{\Sigma \text{en}}(\varphi_i)$  та  $u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i)$  буде мати вигляд

$$K_{d.j}[u'_{\Sigma \text{en}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i)] = \frac{\sum_{i=1}^n (U_{i.e.j} - \bar{U}_{\text{mid } e.j}) \cdot (U_{i.n} - \bar{U}_{\Sigma \text{mid}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{i.e.j} - \bar{U}_{\text{mid } e.j})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{i.n} - \bar{U}_{\Sigma \text{mid}})^2}}$$

З урахуванням вищевикладеного зауваження вимірювальну задачу визначення фазового зсуву  $\Delta\varphi$  сигналів  $u_1(t)$  та  $u_2(t)$  сформулюємо наступним чином: з усієї множини еталонних функцій фазового зсуву виберемо таку  $j$ -ту функцію  $u'_{\Sigma \text{enj}}(\varphi_i)$ , яка забезпечить максимальне значення коефіцієнта кореляції між дискретним нормованим сигналом  $u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i)$  і нею, тобто

$$K_{d.j}[u'_{\Sigma \text{enj}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i)] \rightarrow \max$$

Пошук максимального значення коефіцієнта кореляції проводити з використанням метода золотого перетину.

Алгоритм знаходження максимуму коефіцієнта кореляції методом золотого перетину має наступний вигляд:

Попередній етап.

Визначення допустимої кінцевої довжини невизначеності  $l$ .

Вибір мінімального значення даного показника передбачається проводити виходячи з вимог до похибки рішення задачі вимірювання фазового зсуву, враховуючи точнісні характеристики технічних засобів, які задіяні в процесі проведення аналогово-цифрового перетворення сигналу та додаткових операцій, похибками округлення при проведенні обчислювань.

Як видно з умови проведення вимірювання фазового зсуву і переліку операцій перетворення вхідних гармонічних сигналів  $u_1(t)$  і  $u_2(t)$ , початковим інтервалом невизначеності є інтервал, рівний  $[0, \pi[$  радіан.

Довжину нового інтервалу невизначеності для першої ітерації визначимо з використанням співвідношень, наведених в [11]:

$$\Delta\varphi_{\lambda 1} = (1 - \alpha) \cdot \pi \quad (17)$$

$$\Delta\varphi_{\mu 1} = \alpha \cdot \pi \quad (18)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт, який лежить в інтервалі  $0 < \alpha < 1$ .

Для проведення розрахунків рекомендують  $\alpha = 0,618$ .

Провести розрахунок значення коефіцієнта кореляції  $K_{\lambda 1}[u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\lambda 1}(\varphi_i)]$  між вектором  $u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i)$  та еталонною функцією  $u'_{\Sigma \text{en}\lambda 1}(\varphi_i)$  за умови, що фазовий зсув дорівнює  $\Delta\varphi_{\lambda 1}$ , та значення  $K_{\mu 1}[u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\mu 1}(\varphi_i)]$ , за умови, що фазовий зсув дорівнює  $\Delta\varphi_{\mu 1}$  з використанням співвідношення (11) і (14).

Обчислимо  $K_{\lambda 1}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\lambda 1}(\varphi_i)]$  та  $K_{\mu 1}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\mu 1}(\varphi_i)]$ , покладемо, що  $k = 1$ , та перейдемо до основного етапу.

Основний етап.

Крок 1. Якщо  $\Delta\varphi_{b,k} - \Delta\varphi_{a,k} \leq l$ , то зупинитися і прийняти, що значення фазового зсуву дорівнює

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\varphi_{b,k} - \Delta\varphi_{a,k}}{2}, \quad (19)$$

де  $\Delta\varphi_{a,k}$  – початок інтервалу невизначеності на  $k$ -й ітерації;

$\Delta\varphi_{b,k}$  – кінець інтервалу невизначеності на  $k$ -й ітерації.

В іншому випадку, якщо

$$K_{\lambda 1}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\lambda 1}(\varphi_i)] > K_{\mu 1}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\mu 1}(\varphi_i)] \quad (20)$$

то перейти до кроку 3, якщо

$$K_{\lambda 1}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\lambda 1}(\varphi_i)] \leq K_{\mu 1}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\mu 1}(\varphi_i)] \quad (21)$$

то перейти до кроку 2.

Крок 2. Визначити:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{a,(k+1)} &= \Delta\varphi_{\lambda,k}, \\ \Delta\varphi_{b,(k+1)} &= \Delta\varphi_{b,k}, \\ \Delta\varphi_{\lambda,(k+1)} &= \Delta\varphi_{\mu,k}, \\ \Delta\varphi_{\mu,(k+1)} &= \Delta\varphi_{a,k} + \alpha(\Delta\varphi_{b,(k+1)} - \Delta\varphi_{a,(k+1)}). \end{aligned} \quad (22)$$

Обрахувати  $K_{\mu(k+1)}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\mu(k+1)}(\varphi_i)]$  та перейти до кроку 4.

Крок 3. Визначити:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{a,(k+1)} &= \Delta\varphi_{a,k}, \\ \Delta\varphi_{b,(k+1)} &= \Delta\varphi_{\mu,k}, \\ \Delta\varphi_{\mu,(k+1)} &= \Delta\varphi_{\lambda,k}, \\ \Delta\varphi_{\lambda,(k+1)} &= \Delta\varphi_{a,(k+1)} + (1 - \alpha)(\Delta\varphi_{b,(k+1)} - \Delta\varphi_{a,(k+1)}). \end{aligned} \quad (23)$$

Обрахувати  $K_{\lambda(k+1)}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\lambda(k+1)}(\varphi_i)]$  та перейти до кроку 4.

Крок 4. Замінити  $k$  на  $k + 1$  та перейти до кроку 1.

Запропонований метод, на відміну від показаного в [9], дозволяє знизити часові та фінансові витрати, збільшити показники точності, а також мінімізувати розміри еталонної міри фазового зсуву та нуль індикатора, за рахунок реалізації їх у віртуальному вигляді. Так виходячи з характеристик відомих пакетів, що знайшли широке застосування для

моделювання Mathcad, MATLAB, Electronics Workbench відомо, що можливо провести розрахунки з точністю до 16-го знака.

Адитивний спосіб обробки напруг сигналів, мультиплікативний спосіб обробки сигналів, фазометри з перетворенням Гільберта передбачають операцію автопідлаштування рівнів сигналів по кожному з вимірювальних каналів. Наявність зазначеної операції приводить до суттєвого ускладнення вимірювальних каналів, а відповідно і складової похибки, яка спричинена фазовою асиметрією каналів передачі сигналів, а також необхідністю синхронізації операції аналогово-цифрового перетворення.

До недоліків запропонованого способу реалізації компенсаційного методу вимірювання слід віднести, що діапазон вимірювання фазового зсуву знаходиться в межах  $[0, \pi[$  радіан, обмеженість частотного діапазону, яка буде обумовлена характеристиками двонапівперіодного перетворювача. Але цей факт суттєво не впливає на вирішення вимірювальної задачі у порівнянні з отриманим позитивним ефектом. Ці недоліки характерні для більшості відомих методів вимірювання цієї величини.

## Висновки

На підставі проведеного аналізу існуючих систем навігаційного забезпечення, що знайшли широке застосування в наземних безпілотних системах, було встановлено, що до їх складу входить безплатформна інерційна навігаційна система, комплексована з приймачем глобальних супутникових радіонавігаційних систем. Ця конфігурація навігаційного забезпечення наземних безпілотних систем не дозволяє забезпечити організацію режимів напівавтономного або автономного виконання місій в групі або рої в усіх можливих умовах їх застосування. В якості альтернативного підходу в організації навігаційного забезпечення наземних безпілотних систем запропоновано використовувати локальні радіонавігаційні системи, що будуються з використанням існуючої мережі станцій видачі диференційних поправок з доопрацюванням можливості видачі навігаційних кодових повідомлень, яку доцільно доповнити додатковими локальними навігаційними станціями, наприклад, з використанням корпоративних станцій LTE зв'язку, в основу даних мереж пропонується покласти кодовий псевдо-далекомірний метод.

Для зменшення складової похибки визначення координат, обумовленої розбіжністю шкал часу навігаційних станцій, пропонується організувати групову міру частоти і часу на базі прецензійних квантових стандартів частоти, що входять до складу технічних засобів станцій, які пропонуються до обслуговування певної ділянки місцевості. Для вирішення даної задачі запропонована математична модель визначення



фазового зсуву двох гармонічних сигналів, в основі якого лежить порівняння форми сигналу, отриманого шляхом підсумування після проведення їх двонапів-періодного перетворення з набором еталонних функцій з використанням в якості критерію збігу вказаних функцій максимуму коефіцієнта кореляції.

Застосування запропонованого методу дозволить збільшити точність вимірювання при застосуванні несучих інформаційних сигналів, зменшити час на проведення вимірювання. Також запропонований метод визначення різниці фазового зсуву дозволить знизити часові та фінансові витрати на реалізацію групової міри частоти та забезпечить потрібний рівень синхронізації внутрішніх шкал часу базових станцій.

Напрямом подальших досліджень є технічна реалізація та впровадження вказаних підходів у навігаційне забезпечення безпілотних наземних систем для можливості виконання функції планування і виконання місій в автономному режимі роботи, що дозволить платформам забезпечувати групове та ройове їх застосування.

### Список літератури

1. Стругинський В.Б., Гуржій А.М. Наземні роботи-зовані комплекси: монографія. Житомир: ПП "Рута", 2023. 524 с.
2. Zhang L., Morton Y. GPS Carrier Phase Spectrum Estimation for Ionospheric Scintillation Studies. *Navigation*. 2013. Vol. 60. ISS. 2, pp. 113-122. DOI: 10.1002/navi.33
3. Autonomous Military Robotics: Risk, Ethics and Design [Електронний ресурс]. US Department of Navy, Office of Naval Research. December, 20. 2008. 112 p. URL: [https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=phil\\_fac](https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=phil_fac).
4. Шугуров О.С. Розвиток військових наземних роботизованих систем в контексті нових концепцій управління: перспективи України. URL: <http://sp.niss.gov.ua/content/articles/files/27-1445867323.pdf>
5. Чепков І.Б., Довгополий А.С., Гусяков О.М. Концептуальні засади створення вітчизняних ударнорозвідувальних наземних роботизованих комплексів важкого класу. *Озброєння та військова техніка*. Київ: ЦНДІ ОВТ. 2019. № 3 (23). С. 16–25.
6. S. Tyshko, O. Lavrut, V. Vysotska, O. Markiv, O. Zabula, Y. Chemichenko, T. Lavrut. Compensatory Method for Measuring Phase Shift Using Signals Bisemiperiodic Conversion in Diagnostic Intelligence Systems. *MoMLeT+DS 2022: 4<sup>th</sup> International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science*, November, 25-26, 2022, Leiden-Lviv, The Netherlands-Ukraine. P. 144-154.
7. Vasyl Lytvyn, Victoria Vysotska, Sergiy Tyshko, Oleksandr Lavrut, Tetiana Lavrut and Mariia Nazarkevych. Diagnostic Method Development when Weapons Characteristics Measuring Based on Spectral Analysis for Signals Phase Shift Determination. *MoDaST 2024 Modern Data Science Technologies Workshop 2024*, May, 31 - June, 1, 2024, Lviv, Ukraine. P. 42-58. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3723/paper3.pdf>.

8. Skolnik. M.I. Radar Handbook. Third Edition. The McGraw-Hill Companies. 2008. 1328 p. ISBN: 9780071485470

9. Hemapala M.U. Robots for Humanitarian Demining: open access peer-reviewed chapter. *IntechOpen*. 2017. 21 p. DOI: <http://doi.org/10.5772/intechopen.70246>

10. Cazina D., Brautb S., Božić Ž., Žigulić R. Low cycle fatigue life prediction of the demining tiller tool. *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 111.104457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104457>

11. V. Isaiev, "Method of measuring the angle of phase shift between two voltages using a precision meter of the voltage". *Ukrainian Metrological Journal*. 2017. No. 2, PP. 3–7. DOI: 10.24027/2306-7039.2.2017.109620.

### References

1. Strutyns'kyi V.B. and Hurzhiy A.M. (2023), "Nazemni robotyzovani kompleksi: monohrafiya" [Ground robotic complexes: monograph]. Zhytomyr: PP "Ruta". 524 p. [in Ukrainian].
2. Zhang L. and Morton Y. (2013), GPS Carrier Phase Spectrum Estimation for Ionospheric Scintillation Studies. *Navigation*. Vol. 60. ISS. 2. PP. 113-122. DOI: 10.1002/navi.33
3. Autonomous Military Robotics: Risk, Ethics and Design. US Department of Navy (2008), Office of Naval Research. December, 20 2008. 112 p. URL: [https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=phil\\_fac](https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=phil_fac)
4. Shuhurov O. S. (2025), "Rozvytok viys'kovykh nazemnykh robotyzovanykh system v konteksti novykh kontseptsii upravlinnya: perspektyvy Ukrainy" [Development of military ground robotic systems in the context of new management concepts: prospects for Ukraine]. URL: <http://sp.niss.gov.ua/content/articles/files/27-1445867323.pdf> [in Ukrainian].
5. Chepikov I.B., Dovhopolyi A.S. and Huslyakov O.M. (2019), Kontseptual'ni zasady stvorennia vitchyznyanykh udarnorozvidual'nykh nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv vazhkoho klasu [Conceptual principles for the creation of domestic heavy-class strike reconnaissance ground robotic complexes]. *Armaments and military equipment*. Kyiv: TSNDI OVT. № 3 (23). pp. 16–25. [in Ukrainian].
6. S. Tyshko, O. Lavrut, V. Vysotska, O. Markiv, O. Zabula, Y. Chemichenko and T. Lavrut (2022), Compensatory Method for Measuring Phase Shift Using Signals Bisemiperiodic Conversion in Diagnostic Intelligence Systems. *MoMLeT+DS 2022: 4<sup>th</sup> International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science*, November, 25-26 2022. Leiden-Lviv, The Netherlands-Ukraine. P.144-154.
7. Vasyl Lytvyn, Victoria Vysotska, Sergiy Tyshko, Oleksandr Lavrut, Tetiana Lavrut and Mariia Nazarkevych (2024), Diagnostic Method Development when Weapons Characteristics Measuring Based on Spectral Analysis for Signals Phase Shift Determination. *MoDaST 2024 Modern Data Science Technologies Workshop 2024*, May, 31 - June, 1, 2024, Lviv, Ukraine. P. 42-58. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3723/paper3.pdf>
8. Skolnik. M.I. (2008), Radar Handbook. Third Edition. The McGraw-Hill Companies, 1328 p. ISBN: 9780071485470

9. Hemapala M.U. (2017), Robots for Humanitarian Demining: open access peer-reviewed chapter. *IntechOpen*. 21 p. DOI: <http://doi.org/10.5772/intechopen.70246>  
10. Cazina D., Brautb S., Božić Ž. and Žigulić R. (2020), Low cycle fatigue life prediction of the demining tiller tool. *Engineering Failure Analysis*. Vol. 111.104457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104457>

11. Isaiev V. (2017), "Method of measuring the angle of phase shift between two voltages using a precision meter of the voltage". *Ukrainian Metrological Journal*. No. 2. pp. 3–7. DOI: 10.24027/2306-7039.2.2017.109620

#### SYNTHESIS OF A LOCAL NETWORK FOR NAVIGATION SUPPORT OF GROUND UNMANNED COMPLEXES BASED ON A CODE PSEUDOREMOTE METHOD

Sergiy Tyshko, Oleksandr Lavrut, Vasyl Zaika, Volodymyr Pustovarov

An analysis of known strategies for the use of ground-based mobile unmanned systems, which have found the greatest distribution at the present time, has been carried out. The most widespread strategy of application includes the execution of a mission individually by each mobile product under the control of an operator using two-way communication channels. Control signals are transmitted from the command and control station to the mobile object, and telemetric information and a video signal are received in the reverse direction. The shortcomings that significantly affect the technical characteristics of ground-based unmanned systems are determined and are due to the specified application strategy. It has been established that one of the factors limiting the implementation of the strategy of autonomous (semi-autonomous) application is the insufficient level of interference protection of navigation support systems of ground-based mobile unmanned systems based on the use of global satellite radio navigation systems. As an alternative approach to implementing a navigation support system for ground-based mobile unmanned systems, it is proposed to use local radio navigation systems that implement a coded pseudo-range-finding method for determining navigation characteristics. The minimum typical structure of local radio navigation systems is proposed. As a method for comparing the frequencies of the master generators, it is proposed to use frequency phase interpolation. As a method for determining the phase difference of the master generators (standards) of navigation stations, it is proposed to use a correlation method for measuring the phase shift of two harmonic signals, which is based on comparing the waveform obtained by summing after their two-half-period transformation with a set of reference functions. A mathematical model for implementing this method for determining the phase shift is proposed. Further steps for improving the existing navigation support system for ground-based mobile unmanned objects are determined.

**Keywords:** ground-based mobile unmanned system, network-navigation support, local radionavigation system, phase shift, two-half-wavelength conversion.