

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ НАВІГАЦІЙНИХ РОЗРАХУНКІВ НА БОРТУ СУДНА В КРИТИЧНИХ СИТУАЦІЯХ

Носов П. С., к.т.н., доцент, завідувач кафедри суднових комп'ютерних систем і мереж, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, email: rason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5067-9766.

Сокол І. В., к.п.н., завідувач судноводійного відділення, Відокремлений структурний підрозділ «Морський фаховий коледж Херсонської державної морської академії», м. Херсон, Україна, email: kherson.sokol@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7324-1441.

Подобєда В. В., завідувач лабораторії, Відокремлений структурний підрозділ «Морський фаховий коледж Херсонської державної морської академії», м. Херсон, Україна, email: vladimirpodobieda@gmail.com, ORCID: 0009-0002-5987-5541.

У межах дослідження розроблено комплексний підхід до підвищення надійності навігаційних систем морських суден за умов відмов електронного навігаційного обладнання, кібератак та енергетичних blackout-сценаріїв. Запропоновано інноваційні алгоритмічні рішення, що забезпечують оперативний перехід від цифрових навігаційних технологій до альтернативних систем, заснованих на методах морехідної астрономії та принципів методу Dead Reckoning ECDIS.

Створено програмний інструмент для автоматизованого розрахунку координат судна за допомогою секстана. Цей інструмент враховує поправки, методи статистичної обробки серій даних, автоматично виявляє промахи та визначає середні значення з мінімальною сумарною похибкою. Визначення обсервованих координат реалізовано на підставі математичних моделей висотних ліній положення з урахуванням курсу, швидкості й часу між спостереженнями.

Крім того, розроблено автономну електронну картографічну систему на базі Python-бібліотек (folium, geopy, ipywidgets), що забезпечує інтерактивне введення координат маршрутних точок, побудову відрізків маршруту, обчислення швидкості й курсу судна, а також візуалізацію результатів на інтерактивних картах. Система може функціонувати локально без доступу до мережі Інтернет завдяки використанню web-орієнтованих картографічних даних, що забезпечує стабільність та надійність обсервації навіть у критичних умовах.

Експериментальна перевірка підтвердила високу точність розрахунків та ефективність запропонованих рішень у ситуаціях збоїв електронних навігаційних систем. У разі blackout розроблена система дає змогу екіпажу оперативно відновити навігаційні функції та гарантувати безпеку судна.

Практична значущість роботи полягає у створенні гнучкої, надійної навігаційної системи, здатної мінімізувати ризики під час технічних збоїв або цілеспрямованих кібератак. Перспективи подальших досліджень передбачають удосконалення алгоритмів для зниження похибок і адаптацію системи до реальних умов експлуатації на морських суднах за будь-яких умов плавання.

Ключові слова: традиційні методи навігації; морехідна астрономія; інтерактивні картографічні системи; альтернативні системи позиціонування; автономна навігація; секстан; візуалізація маршруту.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.122-138

Вступ. Останнім часом, галузь морського судноплавства стала надзвичайно залежною від електронних навігаційних систем, таких як ECDIS, GPS, AIS та GNSS. Ці технології забезпечують високу точність визначення місцеперебування судна та ефективне керування його рухом, водночас істотно спрощуючи планування маршрутів, контроль безпеки та оперативне прийняття рішень. Однак така залежність від електронних засобів навігації має й зворотний бік: уразливість до технічних збоїв, неточностей супутникових сигналів або часткової втрати електроживлення (blackout). Зокрема, відмови обладнання, маніпуляції даними (спуфінг GNSS, несанкціоновані втручання в AIS чи ECDIS) та вплив людського фактора можуть призвести до ситуацій, коли сучасні високоточні системи навігації стають недоступними або недостовірними.

У таких умовах важливого значення набуває застосування резервних, традиційних підходів до визначення місцеположення судна: астрономічні методи визначення місця судна, метод «Dead Reckoning» та інші методики, які не залежать від зовнішніх електронних

сигналів. Проте самі по собі традиційні методи, не інтегровані у загальний навігаційний комплекс, лише частково компенсують недоліки електронних систем.

Проблема дослідження. Відсутність чітких та комплексних алгоритмічних рішень та технічних засобів для оперативного переходу від цифрових до традиційних методів у реальному часі ускладнює створення по-справжньому стійкої навігаційної системи. Додатковою проблемою є брак цілісних моделей, здатних одночасно враховувати відмови обладнання та забезпечувати безперервність контролю за місцем судна.

Актуальність даного дослідження визначається нагальною потребою у розробці універсальних інтегрованих рішень, що поєднуюватимуть переваги сучасних електронних систем з надійністю та автономністю традиційних методів. Такий підхід не лише підвищить стійкість судна до технічних збоїв, а й надасть і алгоритмічну основу для швидкого перемикання між різними джерелами навігаційної інформації. Це дозволить забезпечити точну та безперервну навігацію, гарантувати безпеку екіпажу та зберегти економічну ефективність морських перевезень.

З метою визначення слабких та сильних сторін наявних підходів, проведемо критичний аналіз наукової літератури, що дозволить визначити стан наукового поля в питаннях забезпечення навігаційної безпеки суден, застосування традиційних і сучасних навігаційних методів, протистояння відмовам навігаційного обладнання.

Основні напрями наукового пошуку по тематиці дослідження є наступні:

1. Традиційні та резервні навігаційні методи. У роботі Урум Н. С. та ін. (2023) [1], а також Дакі О. А. (2021) [4], увагу зосереджено на історії та розвитку секстанта (1) та застосуванні методів морехідної астрономії. Ключовий внесок цих джерел – підкреслення важливості традиційних навігаційних інструментів як резервних методів визначення координат судна у разі відмови електронних систем. Сучасна навігація надто залежна від електронних рішень, проте дослідження показують: секстант, астрономічні розрахунки та інші автономні підходи можуть забезпечити стійкість та надійність у випадках збоїв. Недоліком цих досліджень є недостатнє висвітлення інтеграції традиційних методів із сучасними автоматизованими системами та відсутність адаптації цих рішень до умов кібератак або втрат електронної інфраструктури, негативного впливу фактору людини.

2. Інформаційна безпека та моделювання ризиків. У дослідженнях Вільського Г. Б., Надича М. М. (2011) [2], а також Мельника О.М. та ін. (2021) [6] мова іде про забезпечення інформаційної безпеки суден, моделювання ризиків та методів їх зниження. Ці роботи пропонують ймовірнісні моделі для виявлення зон небезпеки, підвищення стійкості навігаційних систем у складних умовах. Однак у цих джерелах бракує комплексної оцінки впливу кібератак та інформаційних маніпуляцій на роботу навігаційних систем, а також чіткого алгоритмічного базису для інтеграції з традиційними методами навігації.

3. Сучасні системи курсовказання та супутникова навігація. Роботи Мельника О. М. та ін. (2022) [3], а також Nguyen T. D. (2020) [8] і Маранова О. В. (2023) [7] аналізують сучасні супутникові системи навігації, їхню точність і надійність. Зокрема, супутникові компаси, GNSS та інші технології розглядаються як основа навігаційної безпеки. Проте ці дослідження вказують на уразливість електронних засобів до спуфінгу сигналів, зависання чи втрати точності. Недоліком є те, що вони недостатньо уваги приділяють комплексному сценарію, де GNSS може виявитися недоступним через кібератаки чи технічні збої. Також бракує чітких рекомендацій щодо використання альтернативних методів визначення місцеположення у моменти кризових ситуацій.

4. Машинне навчання та прогнозування відмов. У роботі Маранова О. В. (2023) [5] застосовано машинне навчання для прогнозування відмов навігаційних систем. Це перспективний напрям, що дозволяє превентивно виявляти потенційні несправності й планувати технічне обслуговування. Проте нинішні підходи зосереджені переважно на внутрішніх технічних проблемах обладнання, ігноруючи зовнішні впливи, такі як кібератаки або масовані помилки сигналів GNSS. Також відсутня інтеграція з традиційними методами навігації, які могли б слугувати резервом у разі недостовірності електронної інформації.

5. Управління ризиками blackout та резервні джерела енергії. DNV (2024) [9] та Utomo M. N. S. et al. (2024) [11] розглядають проблему blackout і роль аварійних генераторів. Чітко показано, що відмова електропостачання критично впливає на навігаційну безпеку, особливо поблизу портів чи у важких погодних умовах. Однак ці дослідження мало висвітлюють, як саме забезпечувати точне визначення положення судна під час таких аварійних ситуацій, коли основні системи навігації можуть бути недоступні. Відсутня повноцінна інтеграція між концепцією підтримки електроживлення та використанням альтернативних методів навігації.

6. Інтегровані системи навігації та електронна навігація. Робота Якусевича Ю. Г. та ін. (2021) [10] фокусується на побудові суднової навігаційної системи на основі сучасних ІТ-технологій. Хоча дослідження приділяє увагу стандартизації, інтеграції різних сенсорів і систем, воно майже не розглядає сценарії повних збоїв чи атак, коли неможливо довіряти електронним системам. Також бракує глибокого аналізу використання резервних способів навігації, які можна було б автоматично задіяти в кризових умовах.

Загалом аналіз літератури свідчить про значну фрагментарність підходів до проблеми надійного визначення положення судна у критичних ситуаціях. Є дослідження, присвячені традиційним методам (методи морехідної астрономії та класичної навігації), але вони не інтегровані з сучасними автоматизованими системами.

Проте, є ряд досліджень, які також стосуються забезпечення навігаційної безпеки суден, зокрема в умовах відмов навігаційного обладнання чи виникнення ситуацій blackout [12–14]. Представлені публікації присвячені теоретичним та практичним аспектам застосування традиційних і інноваційних методів навігації, використанню програмних інструментів для моделювання, а також резервних та автономних способів визначення положення судна, що відкривають новий погляд для аналізу та вирішення зазначеної проблеми.

1. Інтеграція математичних інструментів для навчання та симуляцій. Робота Kalinichenko Y. та співавторів (2023) [12, 13], суттєво акцентує увагу на використанні програмного середовища GeoGebra для навігаційних цілей. Зокрема, у працях «GeoGebra for navigational purposes» та «GeoGebra for navigation purposes: Theory and application» автори досліджують можливості цього інструмента для моделювання геометричних задач, пов'язаних із визначенням місця судна, розрахунком курсів, шляхів обходу перешкод, а також для виконання базових астрономічних та геодезичних розрахунків.

Цінність цього підходу полягає у створенні та візуалізації навчальних моделей: здобувачі освіти та фахівці можуть швидко опановувати базові принципи навігації, аналізуючи різноманітні сценарії без необхідності використання дорогого навігаційного обладнання. GeoGebra виступає інтерактивним середовищем, в якому можуть бути перевірені теоретичні припущення та алгоритми визначення місцеперебування судна. Однак застосування цього підходу в реальних умовах мореплавства має певні обмеження, оскільки GeoGebra не інтегрована безпосередньо з бортовими системами й не враховує в реальному часі зовнішні фактори (наприклад, сигнали навігаційних супутникових систем). Вона скоріше є допоміжним інструментом для навчання, тренування, теоретичних досліджень та попереднього моделювання.

2. Застосування методу «Dead Reckoning» як резервного інструмента навігації. Стаття «Застосування методу «Dead Reckoning» для забезпечення роботи ЕКНІС при відмові суднової станції GPS» (Калініченко Є. та ін., 2023) [14], зосереджується на практичному аспекті: як забезпечити безперебійне функціонування електронної картографічно-інформаційної системи (ЕКНІС) у випадках, коли GPS-сигнал відсутній, пошкоджений або спотворений. Запропонований підхід полягає у використанні методу «Dead Reckoning» (DR) – традиційної навігаційної методики [15], за якою визначення положення судна відбувається за останніми достовірними координатами, власним ходом (швидкістю), курсом та часом на маршруті.

Цей підхід має низку важливих переваг. По-перше, він не залежить від зовнішніх джерел сигналу (супутників, радіомаяків), отже залишається працездатним при

GPS-спуфінгу, збої енергосистеми чи кібератаках на навігаційне обладнання. По-друге, DR метод уже інтегрований у класичні навчальні програми судноводіїв, тому його застосування є інтуїтивно зрозумілим. Однак недоліком DR є поступове накопичення похибки, що обмежує тривалість використання цього методу без додаткової корекції. Застосування DR найбільш ефективне як проміжне рішення, поки екіпаж не відновить нормальну роботу систем або не отримає альтернативні дані для корекції курсу.

До того ж слід зазначити що ряд досліджень вже направлено на рішення схожої задачі. Так, у дослідженні [16], запропонована автоматизація демонструє суттєві переваги щодо точності та зручності обчислень, проте застосування її на практиці може бути обмеженим через специфіку вимог до обчислювальних ресурсів і чутливість до вихідних даних. Для досягнення більш широкого практичного застосування необхідна додаткова інтеграція алгоритмів у стандартні судові системи навігації. Зокрема, метод Ньютона чутливий до вибору початкової точки, і невірні початкові припущення можуть призвести до хибної конвергенції або потреби повторювати обчислення, що вимагає уважного налаштування параметрів. Аналітичний підхід, хоча й позбавлений ітерацій, у випадках великої кількості розрахункових точок значно збільшує обчислювальне навантаження через стрімке зростання кількості комбінацій. Крім того, округлення результатів у тривимірному просторі може спричинити похибки при високоточних розрахунках. Для реального застосування на судах методика потребує адаптації до систем ECDIS та інтеграції з наявними навігаційними платформами, оскільки наразі вона більше орієнтована на освітні цілі.

У статті [17], автори досліджують вплив розміру поля зору (FOV) автоматизованих систем небесної навігації на точність вимірювань та ймовірність успішної ідентифікації зірок для морських автономних надводних суден.

Запропоновані методики мають потенціал для покращення автоматизованої небесної навігації на морських автономних судах. Однак, їх впровадження супроводжується низкою складнощів, пов'язаних із необхідністю балансу між розміром FOV та точністю вимірювань, удосконаленням алгоритмів ідентифікації зірок, а також врахуванням впливу морського середовища та технічних обмежень обладнання, зокрема:

Збільшення поля зору (FOV) покращує ймовірність ідентифікації зірок, але водночас знижує точність вимірювань їхніх позицій, що може негативно вплинути на загальну точність навігації. Багато сучасних алгоритмів ідентифікації розраховані на обробку обмеженої кількості спостережуваних об'єктів, тому при ширшому FOV виникає потреба у розробці нових алгоритмів для ефективної обробки більшого обсягу даних. Крім того, фізичні перешкоди, такі як хмари або місяць, можуть закривати частину зірок, зменшуючи кількість доступних для спостереження об'єктів і ускладнюючи позиціонування. Збільшення FOV також може вимагати використання більш складних та дорогих оптичних систем, що не завжди прийнятно для різних типів суден.

Наукові підходи, проаналізовані у наведених роботах [1–17], вказують на перспективність поєднання традиційних навігаційних методів (зокрема, використання методів морехідної астрономії для визначення місця судна) з інноваційними інструментами та спеціалізованими програмними середовищами. Така інтеграція забезпечить надійність та безперервність навігації у випадках, коли судно втрачає доступ до глобальних навігаційних систем.

Однак, цей напрям потребуватиме розробки автоматизованих і інтуїтивно-зрозумілих засобів, зручних та швидких у використанні, що дозволять створити комплекс: секстан – автоматизовані розрахунки – альтернативна візуалізація на інтерактивній web-карті.

Такий комплексний підхід сприятиме підвищенню безпеки мореплавства та ефективності управління судном у критичних ситуаціях.

Основною метою дослідження є розробка та обґрунтування інтегрованого підходу до забезпечення безперервного та надійного визначення місцеположення судна в умовах збоїв навігаційного обладнання, blackout та негативного фактора людини.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити наступні завдання:

1. Розробити та впровадити систему розрахунків що передбачає інтеграцію традиційних навігаційних методів зокрема, методів морехідної астрономії з альтернативними та незалежними автоматизованими системами розрахунку положення судна. Впровадити алгоритмічні рішення для автоматичного переходу на резервні методи визначення координат у разі компрометації або недоступності електронних сигналів.

2. Розробити програмний засіб альтернативної електронної картографії на прикладі методу «Dead Reckoning», але повністю незалежної від ECDIS та GPS, з можливістю візуалізації дійсного положення судна на інтерактивній web-карті.

Основний матеріал дослідження. Задля виконання першого завдання дослідження слід побудувати систему розрахунків на основі методів морехідної астрономії.

Забезпечення виконання першого завдання дослідження фактично передбачає розв'язок класичної задачі на визначення місця судна за різночасними спостереженнями Сонця. Внесення даних для перших і других спостережень організовано на різних аркушах (рис. 1). Спостерігач особисто вносить до програми наступні дані:

- гринвіцьку дату і час спостережень;
- швидкість судна;
- істинний курс судна;
- відлік лагу на момент перших і других спостережень;
- зчислимі координати;
- висоту ока спостерігача над рівнем моря, атмосферний тиск, температуру повітря на момент перших і других спостережень;
- визначену поправку індексу секстана;
- значення гринвіцького годинного кута та схилення з Nautical Almanac.

Для зручності використання, температуру повітря та атмосферний тиск можна вносити у тих одиницях у яких показують прилади на судні.

Програма побудована таким чином, що дозволяє опрацювати спостереження виконанні за допомогою секстана.

Перші спостереження			
Гринвіцька дата спостережень	14 травня 2024		
Швидкість судна	12,0	уз	
Істинний курс судна	273,0	°	
Відлік лагу	12,4	мили	
Зчислима широта	Lat =	42 ° 47,0 ' N	
Зчислима довгота	Long =	27 ° 16,0 ' W	
Обробка спостережень	Гринвіцький час		відлік секстану
	15 h 38 m 01 s		56 ° 08,5 '
	15 h 39 m 28 s		55 ° 55,3 '
	15 h 40 m 58 s		55 ° 40,9 '
	15 h 41 m 34 s		55 ° 25,0 '
	15 h 43 m 02 s		55 ° 12,5 '
Середній відлік секстану		55 ° 41,4 '	
Середній час	15 h 40 m 36 s		
Висота ока спостерігача	eye =	12,0 m	
Атмосферний тиск	pressure =	1000 mb	
		mb	
		105 Pa	
		750 mmHg	
		inHg	
Температура	temperature =	10 ° C	
		10 ° C	
		° F	
Поправка індексу секстана	I =	0 ° 02,4 '	
Показання GHA Sun на UT	15 h	45 ° 54,7 '	
Показання GHA Sun на UT	16 h	60 ° 54,7 '	
Показання Dec Sun на UT	15 h	18 ° 50,8 ' N	
Показання Dec Sun на UT	16 h	18 ° 51,3 ' N	

Другі спостереження			
Гринвіцька дата спостережень	14 травня 2024		
Відлік лагу	48,8	мили	
Зчислима широта	Lat =	42 ° 49,0 ' N	
Зчислима довгота	Long =	28 ° 08,4 ' W	
Обробка спостережень	Гринвіцький час		відлік секстану
	18 h 50 m 35 s		23 ° 10,2 '
	18 h 52 m 18 s		22 ° 51,8 '
	18 h 53 m 46 s		22 ° 29,0 '
	18 h 55 m 20 s		22 ° 16,8 '
	18 h 56 m 58 s		21 ° 53,1 '
Середній відлік секстану		22 ° 32,2 '	
Середній час	18 h 53 m 47 s		
Висота ока спостерігача	eye =	12,0 m	
Атмосферний тиск	pressure =	994,6 mb	
		mb	
		105 Pa	
		746 mmHg	
		inHg	
Температура	temperature =	9 ° C	
		9 ° C	
		° F	
Поправка індексу секстана	I =	0 ° 02,4 '	
Показання GHA Sun на UT	18	90 ° 54,7 '	
Показання GHA Sun на UT	19	105 ° 54,6 '	
Показання Dec Sun на UT	18	18 ° 52,5 ' N	
Показання Dec Sun на UT	19	18 ° 53,1 ' N	

Рисунок 1 – Загальний вигляд аркушів внесення даних

Спостерігач вносить для перших і других спостережень значення кожного відліку секстана та момент гринвіцького часу. Вважається, що спостерігач робить серію з п'яти спостережень за Сонцем під час перших і других спостережень. Програма спочатку визначає середній час спостережень і до визначеного середнього часу приводить висоти, що були виміряні за допомогою секстана з урахуванням руху судна (рис. 2). Зміна висоти для кожного окремого спостереження визначається формулою:

$$\Delta H' = -0,25 \cdot \cos Lat \cdot \sin Z \cdot \Delta T + v \cdot \cos(Lat - TC), \quad (1)$$

де Lat – значення широти, Z – азимут на світило, ΔT – проміжок часу між середнім часом серії спостережень і часом конкретного спостереження у серії, v – швидкість судна, TC – істинний курс судна. Відповідно приведена висота буде визначатися формулою:

$$H_{\text{привед}} = H_s + \Delta H', \quad (2)$$

де H_s – відлік секстану на світило.

перші спостереження									
обробка спостережень									
	GT	HS	Проміжки від середнього моменту часу	DN	Приведена висота	(приведена Hsi - середнє Hs)2	m	середнє квадратич	3m
4	15,63361111	56,14166667	0,043222222	155,6 s	23,6223426	56,53537238	0,7419623713	0,642846	0,2874895181
5	15,65777778	55,92166667	0,019055555	68,6 s	10,41447752	56,09524129	0,1774442261		
6	15,68277778	55,68166667	-0,005944444	-21,4 s	-3,24883118	55,62751948	0,002160438709		
7	15,69277778	55,41666667	-0,015944444	-57,4 s	-8,714154661	55,27143076	0,1620619965		
8	15,71722222	55,20833333	-0,040388888	-145,4 s	-17,33418185	54,9194303	0,56993754283		
9	середні значення	15,6783333	55,674		55,68979884				
10	кількість вимірів	5							
другі спостереження									
обробка спостережень									
	GT	HS	Проміжки від середнього моменту часу	DN	Приведена висота	(приведена Hsi - середнє Hs)2	m	середнє квадратич	3m
16	18,84305556	23,17	0,053444444	192,4 s	35,13699845	23,75561664	1,486651784	0,955788	0,4274414965
17	18,87166667	22,86333333	0,024833333	89,4 s	16,32665105	23,13544418	0,3589338116		
18	18,89611111	22,48333333	0,000388888	1,4 s	0,2556746249	22,48759458	0,002375466361		
19	18,92222222	22,28	-0,025722222	-92,6 s	-16,91105019	21,99814916	0,2896422007		
20	18,94944444	21,885	-0,052944444	-190,6 s	-34,80827394	21,3048621	1,516521396		
21	середні значення	18,8965	22,53633333		22,53633333				
22	кількість вимірів	5							

Рисунок 2 – Аркуш обробки спостережень висот світила

Після приведення кожної висоти в серії спостережень, програма визначає чи є промахи у спостереженнях. Промах визначається як значення більше чи менше за потрійне значення середнього квадратичного відхилення:

$$H_{\min}^{\max} = \bar{H}_{\text{привед}} \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{i \text{ привед}} - \bar{H})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

де $\bar{H}_{\text{привед}}$ – середня приведена висота з серії спостережень, $\bar{H}$ – середня висота серії спостережень, $H_{i \text{ привед}}$ – кожна приведена висота в серії спостережень.

Сповіднення про наявність промаху у серії спостережень відображається на аркуші внесення даних (рис. 3).

11	Обробка спостережень			Гринвіцький час			відлік секстану		
12				15 h	38 m	01 s	56 °	08,5 '	промах
13				15 h	39 m	28 s	55 °	50,3 '	
14				15 h	40 m	58 s	55 °	40,9 '	
15				15 h	41 m	34 s	55 °	25,0 '	
16				15 h	43 m	02 s	55 °	12,5 '	
17									

Рисунок 3 – Сповіднення про наявність промаху у серії спостережень

Визначення зчислимих висоти й азимуту відбувається для кожного спостереження окремо за формулами

$$\cos H_c = \frac{\sin LHA \cdot \cos Dec}{\sin Z}; \quad (4)$$

$$\tan Z = \frac{\sin LHA}{(\tan Dec - \tan Lat \cdot \cos LHA) \cos Lat}; \quad (5)$$

де *LHA* та *Dec* – відповідно місцевий годинний кут та схилення Сонця на час спостережень. Визначення місцевого годинного кута та схилення Сонця відбуваються на окремому аркуші за відомою схемою наведеною у *Nautical Almanac* (рис. 4).

1	Перше спостереження			Друге спостереження		
2						
3	UT	15 h	40 m 36 s	18 h	53 m	47 s
5	GHA Sun		45 ° 54,7 ' 1		90 °	54,7 ' 1
6	GHA Sun inc		10		13	26,7
8	Sum GHA Sum		56 ° 3,7 ' 1		104 °	21,4 ' 1
9	Long	W	27	W	28	08,4
11	LHA Sun	W	28 ° 47,7 ' 1	W	76 °	13,0 ' 1
13	LHA Sun	W	28 ° 47,7 ' 1	W	76 °	13,0 ' 1
15	LHA Sun	W	28 ° 47,7 ' 1	W	76 °	13,0 ' 1
17	Dec Sun	N	18 ° 50,8 ' 1	N	18 °	52,5 ' 1
18	Dec Sun corr		0 ° 0,3 ' 1		0 °	0,5 ' 1
20	Sum Dec Sun	N	18 ° 51,1 ' 1	N	18 °	53,0 ' 1

Рисунок 4 – Визначення місцевого годинного кута та схилення Сонця

Визначення місцевого годинного кута та схилення Сонця на середній гринвіцький час спостережень відбувається за тією ж схемою, що наводяться у *Nautical Almanac*, що в свою чергу, дозволяло контролювати правильність розрахунків екваторіальних координат програмою (рис. 5).

Перші спостереження						
	Lat =	42 ° 47,0 ' N	42,78333			
	Dec =	18 ° 51,1 ' N	18,85231			
	LHA Sun =	28 ° 47,7 ' W	28,79500			
	tanZc =	-1,39760				
Зчислимий азимут	Zc =	125 ° 35,1 ' N W	-54,41580	125,5841		234,415
	cosHc =	0,56047				
Зчислима висота	Hc =	55 ° 54,7 ' 1		55,91194		
Другі спостереження						
	Lat =	42 ° 49,0 ' N	42,81667			
	Dec =	18 ° 53,0 ' N	18,88396			
	LHA Sun =	76 ° 13,0 ' W	76,21601			
	tanZc =	10,91791				
Зчислимий азимут	Zc =	84 ° 46,0 ' N W	84,76673	84,76673		275,233
	cosHc =	0,92277				
Зчислима висота	Hc =	22 ° 39,9 ' 1		22,66535		

Рисунок 5 – Визначення висоти й азимута світила на момент спостережень

Виправлення висот Сонця відбувались з урахуванням поправки індексу секстана, нахилення горизонту, атмосферної рефракції з урахуванням температури повітря і атмосферного тиску, паралаксу та півдіаметру Сонця на день спостережень (рис. 6).

1	Перші спостереження				перший день року			
2	Відлік секстану	HS =	55 ° 41,4 ' 1		день	місяць	рік	
3	Поправка індексу	I =	02,4		1	1	2024	
4	Нахилена горизонту	D =	-6,1	55,62816				
5	Атмосферна рефракція з урахуванням тиску і температури	R =	-0,6	90°- HS = 34,31020	1/1/2024			133 - кількість днів від початку року
6	Паралакс	HP =	0,1					
7	Півдіаметр	SD =	15,8					
10	Обсервована висота світила	Ho =	55 ° 52,9 ' 1	55,88215				
11								
12	Другі спостереження				перший день року			
13	Відлік секстану	HS =	22 ° 32,2 ' 1		день	місяць	рік	
14	Поправка індексу	I =	02,4		1	1	2024	
15	Нахилена горизонту	D =	-6,1	22,47470				
16	Атмосферна рефракція з урахуванням тиску і температури	R =	-2,2	90°- HS = 67,46366	1/1/2024			133 - кількість днів від початку року
17	Паралакс	HP =	0,1					
18	Півдіаметр	SD =	15,8					
21	Обсервована висота світила	Ho =	22 ° 42,2 ' 1	22,70276				
22								

Рисунок 6 – Виправлення висоти Сонця

Нахилення видимого горизонту визначається за формулою

$$D = -1,7603\sqrt{eye}, \quad (6)$$

де eye – висота ока спостерігача над рівнем моря.

Атмосферна рефракція з урахуванням атмосферного тиску і температури повітря –

$$R = -\frac{57,085}{60} \cdot \tan(90^\circ - H_s) - \frac{0,0666}{60} \cdot \tan^3(90^\circ - H_s) \cdot \frac{0,28 \cdot pressure}{273^\circ + temperature}. \quad (7)$$

Паралакс –

$$HP = 0,0024 \cdot 60 \cdot \cos(H_s + I + D), \quad (8)$$

де I – поправка індексу секстана.

Значення півдіаметру Сонця визначається за таблицею.

Таблиця 1 – Значення півдіаметру Сонця від кількості днів від початку року

Кількість днів від початку року		Півдіаметр Сонця
0 – 33	331 – 365	16,3'
34 – 63	302 – 330	16,2'
64 – 86	280 – 301	16,1'
87 – 107	258 – 279	16,0'
108 – 132	234 – 257	15,9'
133 – 233		15,8'

Визначення переносу для кожного спостереження визначається на окремому аркуші (рис. 7).

1	Перші спостереження				
2		Но =	55 °	52,9 '	
3		Нс =	55 °	54,7 '	
5		Но - Нс =	0 °	-1,8 '	
6					
7	Другі спостереження				
8		Но =	22 °	42,2 '	
9		Нс =	22 °	39,9 '	
11		Но - Нс =	0 °	2,2 '	
12					

Рисунок 7 – Визначення переносу

Обсервоване місце судна визначається на гринвіцький момент других спостережень за наступними формулами:

$$Lat_o = Lat_c + DifLat; \quad (9)$$

$$Long_o = Long_c + DifLong. \quad (10)$$

де $DifLat$ та $DifLong$ визначаються з наступної системи, де кожне рівняння уявляє собою висотну лінію положення.

$$\begin{cases} DifLat = -\tan Z_1 \cdot DifLong + \frac{(H_o - H_c)_1}{\cos Z_1}; \\ DifLat = -\tan Z_2 \cdot DifLong + \frac{(H_o - H_c)_2}{\cos Z_2}. \end{cases} \quad (11)$$

Для врахування всіх можливих ситуацій розташування висотних ліній положення складено 64 системи рівнянь, а саме для таких випадків.

Таблиця 2 – Ситуації у розташуванні висотних ліній спостереження

Перша висотна лінія положення	Друга висотна лінія положення
$0^\circ < Z < 90^\circ; H_o - H_c < 0$	$0^\circ < Z < 90^\circ; H_o - H_c < 0$
	$90^\circ < Z < 180^\circ; H_o - H_c < 0$
	$180^\circ < Z < 270^\circ; H_o - H_c < 0$
	$270^\circ < Z < 360^\circ; H_o - H_c < 0$
	$0^\circ < Z < 90^\circ; H_o - H_c > 0$
	$90^\circ < Z < 180^\circ; H_o - H_c > 0$
	$180^\circ < Z < 270^\circ; H_o - H_c > 0$
	$270^\circ < Z < 360^\circ; H_o - H_c > 0$
...	...
$270^\circ < Z < 360^\circ; H_o - H_c >$	$0^\circ < Z < 90^\circ; H_o - H_c < 0$
	$90^\circ < Z < 180^\circ; H_o - H_c < 0$
	$180^\circ < Z < 270^\circ; H_o - H_c < 0$
	$270^\circ < Z < 360^\circ; H_o - H_c < 0$
	$0^\circ < Z < 90^\circ; H_o - H_c > 0$
	$90^\circ < Z < 180^\circ; H_o - H_c > 0$
	$180^\circ < Z < 270^\circ; H_o - H_c > 0$
	$270^\circ < Z < 360^\circ; H_o - H_c >$

Із метою оцінки точності визначення місця обсервованої точки місця судна визначався радіус кола середньої квадратичної похибки

$$R = \frac{\sqrt{2m^2 + m_c^2}}{\sin(Z_2 - Z_1)}, \quad (12)$$

де m – середня квадратична похибка у визначенні висотної лінії положення (приймалася така, що дорівнює $0,5'$), m_c – середня квадратична похибка зчислення між першою та другою висотними лініями положення

$$m_c = \pm \sqrt{\left(\frac{S \cdot m_k}{57,3^\circ}\right)^2 \sin^2(Z_1 - TC) + \left(\frac{S \cdot m_l}{100}\right)^2 \cos^2(Z_1 - TC)}, \quad (13)$$

де m_k – середня квадратична похибка у визначенні курсу судна (приймалася така, що дорівнює $\pm 0,5^\circ$), m_l – середня квадратична похибка у визначенні поправки лага (приймалася така, що дорівнює $\pm 0,2\%$), S – плавання, TC – істинний курс судна.

Впровадження запропонованих алгоритмічних рішень для автоматичного переходу на резервні методи визначення координат у разі недоступності сигналів GPS, запропонований метод розрахунків, дозволяє у лічені хвилини отримати результат.

Розрахована відповідь наводилась на окремому аркуші (рис. 8).

Обсервовані координати				
Гринвіцький час	GT =	18 h	53 m	47 s
Обсервована широта	lat =	42 °	54,51 '	N
Обсервована довгота	long =	28 °	10,78 '	W
Радіус кола погрішності місця точки	R =	1,13 '		

Рисунок 8 – Обсервовані координати місця судна

Перевірка математичної моделі здійснювалась за допомогою розв'язання задач на визначення місця судна за різночасними спостереженнями Сонця із збірника [20], і показала, що визначення обсервованих координат за допомогою розробленої програми потрапляє в 95% коло обсервованої точки місця судна при визначенні класичним зчислимо-обсервованим методом координат місця судна.

Після отримання результатів розрахунків з'являється можливість їх застосування у незалежній інтерактивній картографічній системі.

Отже, задля другого завдання дослідження, слід розробити засіб альтернативної електронної картографії на прикладі методу «Dead Reckoning», такий, що є незалежним від ECDIS та GPS, із можливістю візуалізації дійсного положення судна на інтерактивній web-карті.

Отже, у рамках завдання, представлено інтерактивний програмний засіб, що надає можливість судноводієві вводити географічні координати суднових позицій, автоматично візуалізувати їх у вигляді маркерів на цифровій карті, будувати відрізки маршруту між точками та обчислювати ключові навігаційні параметри (швидкість руху судна у вузлах та курс у градусах). Програма побудована на основі відкритих бібліотек Python, таких як folium, геору та ipywidgets, що забезпечують доступність, гнучкість і можливість автономної роботи. Система є потенційно корисною в умовах непередбачуваних комунікаційних обмежень, зокрема під час «blackout» або обмеженого доступу до інтернет-мережі, оскільки може бути розгорнута локально на пристроях із попередньо підготовленими картографічними даними.

Геоінформаційні системи (ГІС) та навігаційні програмні продукти традиційно залежать від постійного доступу до мережі інтернет, онлайн-сервісів картографування та актуалізації даних про місцеперебування об'єктів. Проте в сучасних реаліях все частіше виникають ситуації, коли забезпечення безперервної роботи електронних навігаційних засобів може бути ускладненим через відсутність електроенергії (blackout), відсутність стійкого мережевого з'єднання або логістичні перешкоди щодо оновлення даних. Відтак виникає потреба у програмних інструментах, здатних функціонувати з використанням мінімальних ресурсів та забезпечувати основні навігаційні функції локально, без залежності від зовнішніх джерел інформації.

Отже, розробка програмного засобу дозволить:

1. Інтерактивно вводити координати морських маршрутних точок.
2. Візуалізувати ці точки та з'єднувати їх відрізками маршруту.
3. Автоматично розраховувати та відображати швидкість судна та орієнтовний курс руху.

Програмний засіб реалізовано мовою програмування Python. Основними компонентами є:

1. folium – бібліотека Python, що інтегрує можливості leaflet.js для побудови динамічних, інтерактивних мап у середовищі Jupyter Notebook або автономних HTML-файлах.

2. ipywidgets – бібліотека для створення інтерактивних елементів інтерфейсу (поля введення, кнопки) безпосередньо у середовищі Jupyter Notebook. Це дозволяє користувачеві оперативно взаємодіяти з програмою без необхідності розробляти окремий графічний застосунок.

3. геору – інструмент для географічних обчислень, зокрема розрахунку відстаней між точками за допомогою формули великого кола. На основі цих даних здійснюється конвертація в морські милі та визначається швидкість, а також обчислюється азимутальний кут (курс).

Архітектурно програмний засіб складається з модулів (рис. 9):

1. Модуль введення даних: забезпечує отримання широти та довготи від судноводія через елементи інтерфейсу ipywidgets.

2. Модуль обробки координат: зберігає послідовність точок, опрацьовує їх при кожному оновленні.

3. Модуль обчислень: використовує функціонал геору для визначення відстані та внутрішньо реалізовані формули для обчислення курсу.

4. Модуль візуалізації: генерує карту за допомогою folium, розміщує маркери, відрізки маршруту та текстові позначення швидкості й курсу.

5. Модуль автономності: передбачає можливість попереднього кешування картографічних тайлів або використання локальних даних про місцевість, що забезпечить роботу застосунку в офлайн-режимі.

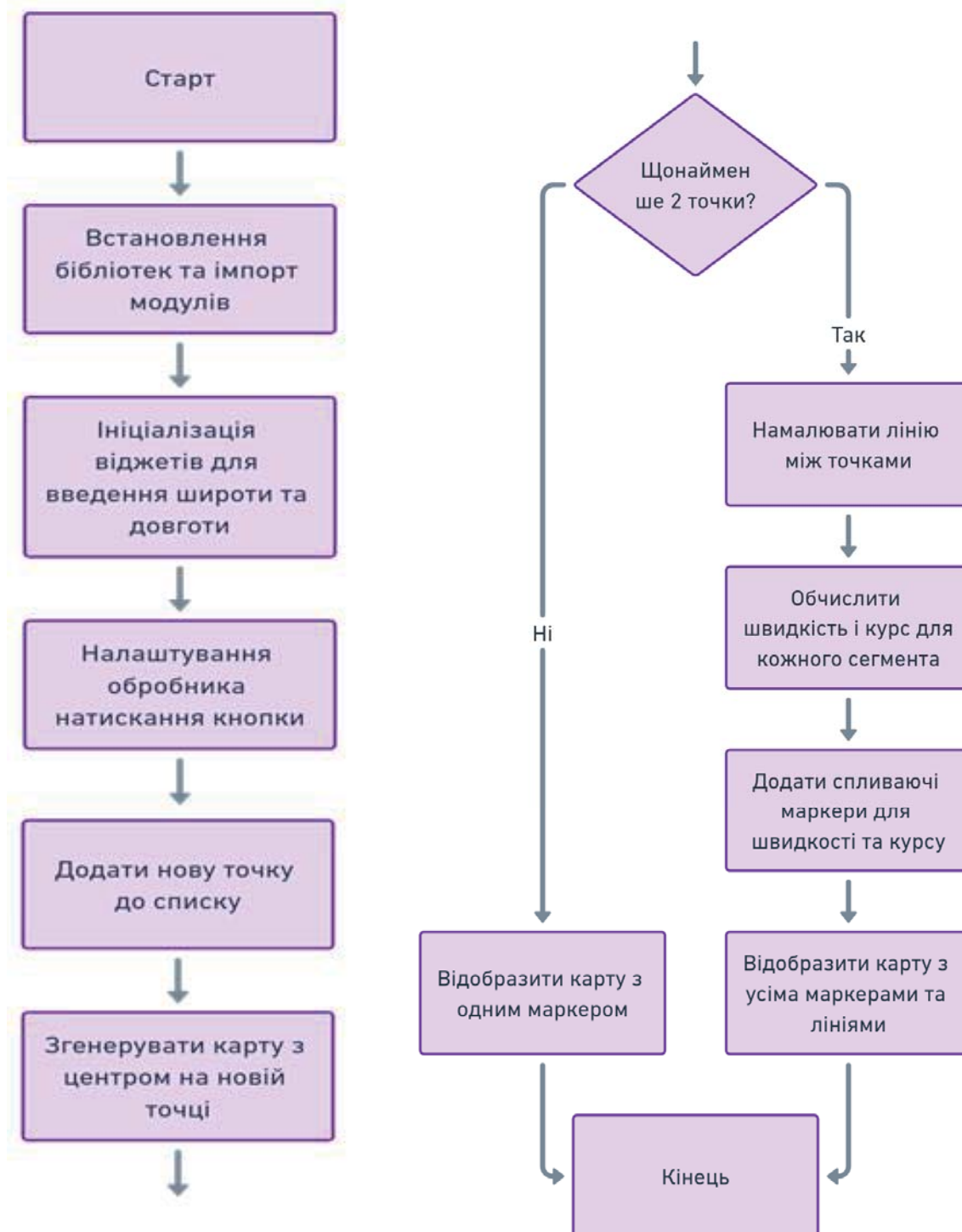


Рисунок 9 – Блок-схема роботи програмного засобу

Реалізація та лабораторне тестування.

1. Інтерактивне додавання нових точок: Судноводій вводить широту та довготу, після чого натискає кнопку оновлення. Маркер нової точки з'являється на карті, а маршрут оновлюється, якщо це не перша точка (рис. 10, 11).

Requirement already satisfied: geopy in c:\users\pavel\anaconda3\lib\site-packages (2.4.1)
Requirement already satisfied: geographiclib<3,>=1.52 in c:\users\pavel\anaconda3\lib\site-packages (from geopy) (2.0)

Latitude:

Longitude:

✓ Electronic navig...

Click to add point and update map

Рисунок 10 – Введення першої координати у діалогове вікно програмного засобу

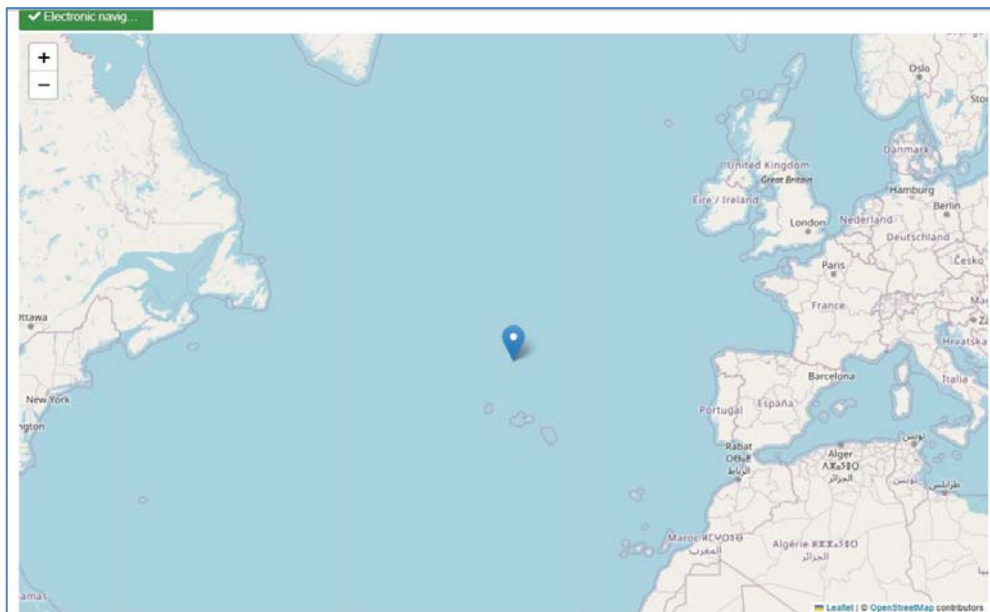


Рисунок 11 – Автоматичне встановлення маркера на інтерактивній карті

2. Автоматична побудова маршруту (рис. 12): При кожному додаванні координати програма будує лінійну секцію між новою та попередньою точкою.

Latitude:

Longitude:

✓ Electronic navig...

+

-

Швидкість:
9.70
вузлів

Курс:
150.01°

Рисунок 12 – Автоматичне додавання другої точки маршруту

3. Розрахунок швидкості та курсу: Відстань між останніми двома точками перетворюється у морські милі, а при заданому часовому інтервалі між фіксаціями точок отримана величина використовується як наближена швидкість (у вузлах). Паралельно обчислюється азимутальний курс руху. Ці дані візуалізовано на карті у вигляді текстових міток (рис. 13).



Рисунок 13 – Додавання нових точок і параметрів руху судна на інтерактивну карту

Реалізація програмного засобу на судні буде зручним інструментом для:

1. Штурманів та мореплавців, які бажають оперативно візуалізувати свій маршрут у випадках обмеженого доступу до спеціалізованих навігаційних систем.
2. Рятувальних операцій та експедиційних груп, коли стабільний зв'язок відсутній або тимчасово недоступний, але необхідно швидко оцінювати пройдену відстань та орієнтуватися в просторі.
3. Навчальних цілей, для студентів та курсантів морських навчальних закладів, які можуть досліджувати основи навігації в режимі локальної роботи з картою.

Таким чином, перевагами розробленої системи є:

1. Автономність: можливість роботи на ноутбуках та портативних пристроях з попередньо встановленим ПЗ та кешованими картами.
2. Простота використання та гнучкість: дружній інтерфейс, розширюваність коду та використання відкритих інструментів дозволяє швидко адаптувати рішення під конкретні завдання.
3. Незалежність від постійного інтернет-з'єднання: програма може функціонувати за умови наявності лише електроживлення пристрою (чи тимчасової автономії батареї), без запиту до віддалених серверів.

Актуальність під час блекауту. Умови блекауту характеризуються відсутністю стабільного енергопостачання та можливими проблемами з інтернет-підключенням. У свою чергу, запропонований інструмент дозволяє:

- використовувати попередньо згенеровані або локальні дані карти;
- продовжувати відображення та планування маршруту судна без онлайн-сервісів;
- оцінювати швидкість та напрямок руху під час екстремальних умов, що може відіграти важливу роль у прийнятті навігаційних рішень або пошуково-рятувальних операціях.

Отже, розроблений програмний інструмент демонструє практичний підхід до побудови інтерактивної навігаційної системи, здатної працювати автономним чином, без

безперервного доступу до інтернет-ресурсів. Завдяки відкритій архітектурі та використанню доступних бібліотек Python, систему можна легко адаптувати та розширювати під специфічні потреби користувача. Такий підхід є актуальним у контексті зростаючих викликів стабільності енергопостачання та інфраструктурного забезпечення навігаційних технологій.

Висновки. У дослідженні проаналізовано проблему залежності сучасного морського судноплавства від електронних навігаційних систем та запропоновано інноваційний підхід до забезпечення безпеки мореплавства в умовах технічних збоїв. Науковий внесок полягає у створенні алгоритмічної моделі, яка дозволяє швидко переходити від цифрових систем навігації до традиційних методів та астрономічних спостережень. Використання інтегрованої системи розрахунків, а також розробка програмного забезпечення для візуалізації траєкторії судна на інтерактивній карті дозволяє забезпечити автономну та надійну навігацію навіть у складних умовах. Розроблені рішення є практично орієнтованими та можуть бути використані для підвищення стійкості навігаційних систем до зовнішніх загроз і технічних обмежень.

Окрім автоматизованого переходу на резервні методи, важливим є впровадження програмного інструменту на базі відкритих бібліотек Python (folium, geopy, ipywidgets), що забезпечує можливість локальної роботи без доступу до глобальних систем картографування. Запропонований інструмент дозволяє інтерактивним шляхом вводити координати, будувати маршрут. Це надає екіпажу гнучкий і надійний інструмент для навігації у критичних ситуаціях, мінімізуючи ризики відхилення від маршруту та забезпечуючи оперативну обробку даних у реальному часі.

Загалом, прискорення розрахунків засобами автоматизації й інтерактивної візуалізації дозволяє виконати обчислення упродовж 7–11 хвилин.

Перспективні напрямки дослідження. Перспективи подальшого розвитку зосереджуються на кількох ключових напрямках. Удосконалення алгоритмів адаптивного перемикання між традиційними та сучасними методами з урахуванням, технічних збоїв та людського фактора. Апробація системи на реальних суднах та впровадження навчальних модулів для підготовки судноводіїв сприятиме підвищенню кваліфікації екіпажу та стійкості навігаційних процесів до зовнішніх викликів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Урум Н. С., Майданевич С. Б., Іваненко В. М., & Трофименко І. В. Морський секстан: історія виникнення, етапи і шляхи розвитку, кращі технічні рішення. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2023. 34(2), 221–234. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/37>.
2. Вільський Г. Б., & Надич М. М. Моделювання інформаційної безпеки судна. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2011. (4), 149–153.
3. Мельник О. М., Щербина О. В., Корякін К. С., & Бурлаченко Д. А. Огляд та перспективи використання сучасних систем курсовказання на морських суднах для забезпечення навігаційної безпеки. Судноводіння, 2022. 21(1), 13–22. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-13>.
4. Дакі О. А., Урум Н. С., Федунів В. М., & Бажак О. В. Методи морехідної астрономії в сучасності. Системи управління, навігації та зв'язку, 2021. 3(65), 24–29. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.3.024>.
5. Маранов О. В. Прогнозування відмов судових навігаційних систем з використанням методів машинного навчання. Системи управління, навігації та зв'язку, 2023. 3(65), 37–46. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.037>.
6. Мельник О. М., Онищенко С. П., Логінов О. В., Окулов В. І., & Пуляєв І. О. Актуальні проблеми морської безпеки та сучасні шляхи забезпечення охорони судна. Комунальне господарство міст, 2021. 6(166), 204–210. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210>.

7. Маранов О. В. Метод моніторингу та підвищення характеристик точності суднового супутникового навігаційного обладнання. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки, 2023. 46, 158–165. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288185>.
8. Nguyen T. D. Applying the least square method to calculate the non-simultaneous errors of ship's position determined by global positioning system (GPS). Journal of Physics: 2020. Conference Series, 1679, 052015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052015>.
9. DNV. Managing the Risks of Blackout for Passenger Ship Owners and Operators. DNV Guidance Paper. 2024. <https://www.dnv.com>.
10. Якусевич Ю. Г., Тришин В. В., & Дорофєєва З. Я. Побудова навігаційної системи судна на основі сучасних інформаційних технологій. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 2021. 4(70), 83–92. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.70.12>.
11. Utomo M. N. S., Wiweko A., Siregar M. S., David M., & Nurmala E. The Role of Emergency Generator during Black-Out on the MV. Kelud. Jurnal Transportasi dan Bahari, 2024. 1(1), 9–20. <https://jurnal.atristar.com/index.php/altair>.
12. Kalinichenko Y., Tomchakovsky G., Adamchuk M., Koliesnik O., & Khlebnikov S. GeoGebra for navigational purposes. Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference, Tokyo, Japan, 2023. 389–392. Retrieved from <https://isg-konf.com/innovative-approaches-to-solving-scientific-problems/>.
13. Kalinichenko Y., Adamchuk M., Tomchakovsky G., Koliesnik O., & Oberto Santana L. GeoGebra for navigation purposes: Theory and application. Innovative Approaches to Solving Scientific Problems. 2023. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-7\(21\)-230-243](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-7(21)-230-243).
14. Калініченко Є., Томчаковський Г., Приходько В., Оберто Сантана Л., & Пічков В. Застосування методу "Dead Reckoning" для забезпечення роботи ЕКНІС при відмові суднової станції GPS. Технічні науки: Інноваційні наукові дослідження: теорія та практика, 2023. 490–493. Retrieved from <https://radionavlab.ae.utexas.edu/images/stories/files/papers/yacht.pdf>.
15. Збірник задач з морехідної астрономії / ред. В. А. Сеняєва. Одеса, 2002. 184 с.
16. Tsai, K.-C., Tseng, W.-K., Chen, C.-L., & Sun, Y.-J. (2022). A Novel Analytical Solution Method for Celestial Positioning. Journal of Marine Science and Engineering, 10(6), 771. <https://doi.org/10.3390/jmse10060771>.
17. Wakita, K., Hane, F., Sekiguchi, T., Shimizu, S., Mitani, S., Akimoto, Y., & Maki, A. (2024). Conceptual design on the field of view of celestial navigation systems for maritime autonomous surface ships. arXiv preprint arXiv:2408.15765. <https://arxiv.org/abs/2408.15765>.

REFERENCES

1. Urum, N. S., Maidanevych, S. B., Ivanenko, V. M., & Trofymenko, I. V. (2023). Morskyi sekstan: istoriia vynyknennia, etapy i shliakhy rozvytku, krashchi tekhnichni rishennia. Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seria: Tekhnichni nauky, 34(2), 221–234. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/37>.
2. Vilskyi, H. B., & Nadych, M. M. (2011). Modeliuvannia informatsiinoi bezpeky sudna. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu, (4), 149–153.
3. Melnyk, O. M., Shcherbyna, O. V., Koriakin, K. S., & Burlachenko, D. A. (2022). Ohliad ta perspektyvy vykorystannia suchasnykh system kursovkazannia na morskykh sudnakh dlia zabezpechennia navihatsiinoi bezpeky. Sudnovodinnia. 21(1), 13–22. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-13>.
4. Daki, O. A., Urum, N. S., Fedunov, V. M., & Bazhak, O. V. (2021). Metody morekhidnoi astronomii v suchasnosti. Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku, 3(65), 24–29. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.3.024>.
5. Maranov, O. V. (2023). Prohnozuvannia vidmov sudnovykh navihatsiinykh system z vykorystanniam metodiv mashynnoho navchannia. Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku,

3(65), 37–46. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.037>.

6. Melnyk, O. M., Onyshchenko, S. P., Lohinov, O. V., Okulov, V. I., & Puliaiev, I. O. (2021). Aktualni problemy morskoi bezpeky ta suchasni shliakhy zabezpechennia okhorony sudna. Komunalne hospodarstvo mist, 6(166), 204–210. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210>.

7. Maranov, O. V. (2023). Metod monitorynhu ta pidvyshchennia kharakterystyk tochnosti sudnovoho suputnykovoho navihatsiinoho obladnannia. Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky, 46, 158–165. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288185>.

8. Nguyen, T. D. (2020). Applying the least square method to calculate the non-simultaneous errors of ship's position determined by global positioning system (GPS). Journal of Physics: Conference Series, 1679, 052015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052015>.

9. DNV (2024). Managing the Risks of Blackout for Passenger Ship Owners and Operators. DNV Guidance Paper. <https://www.dnv.com>.

10. Yakusevych, Yu. H., Tryshyn, V. V., & Dorofieieva, Z. Ya. (2021). Pobudova navihatsiinoi systemy sudna na osnovi suchasnykh informatsiinykh tekhnolohii. Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl, 4(70), 83–92. <https://doi.org/10.30748 /zhups.2021.70.12>.

11. Utomo, M. N. S., Wiweko, A., Siregar, M. S., David, M., & Nurmala, E. (2024). The Role of Emergency Generator during Black-Out on the MV. Kelud. Jurnal Transportasi dan Bahari, 1(1), 9–20. <https://jurnal.atristar.com/index.php/altair>.

12. Kalinichenko, Y., Tomchakovsky, G., Adamchuk, M., Koliesnik, O., & Khlebnikov, S. (2023). GeoGebra for navigational purposes. Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference, Tokyo, Japan, 389–392. Retrieved from <https://isg-konf.com/innovative-approaches-to-solving-scientific-problems/>.

13. Kalinichenko, Y., Adamchuk, M., Tomchakovsky, G., Koliesnik, O., & Oberto Santana, L. (2023). GeoGebra for navigation purposes: Theory and application. Innovative Approaches to Solving Scientific Problems. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-7\(21\)-230-243](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-7(21)-230-243).

14. Kalinichenko, Ye., Tomchakovskiy, H., Prykhodko, V., Oberto Santana, L., & Pichkov, V. (2023). Zastosuvannia metodu "Dead Reckoning" dlia zabezpechennia roboty EKNIS pry vidmovi sudnovoi stantsii GPS. Tekhnichni nauky: Innovatsiini naukovi doslidzhennia: teoriia ta praktyka, 490–493. Retrieved from <https://radionavlab.ae.utexas.edu/images/stories/files/papers/yacht.pdf>.

15. Zbirnyk zadach z morekhidnoi astronomii (2002). / red. V. A. Seniaieva. Odesa, 184 s.

16. Tsai, K.-C., Tseng, W.-K., Chen, C.-L., & Sun, Y.-J. (2022). A Novel Analytical Solution Method for Celestial Positioning. Journal of Marine Science and Engineering, 10(6), 771. <https://doi.org/10.3390/jmse10060771>.

17. Wakita, K., Hane, F., Sekiguchi, T., Shimizu, S., Mitani, S., Akimoto, Y., & Maki, A. (2024). Conceptual design on the field of view of celestial navigation systems for maritime autonomous surface ships. arXiv preprint arXiv:2408.15765. <https://arxiv.org/abs/2408.15765>.

Nosov P., Sokol I., Podobieda V. DEVELOPMENT OF METHODS AND MEANS FOR AUTOMATING ONBOARD NAVIGATION CALCULATIONS IN CRITICAL SITUATIONS

The research developed a comprehensive approach to improve the reliability of marine navigation systems in situation of electronic navigation equipment failures, cyber-attacks and blackout conditions. Innovative algorithmic solutions are proposed to ensure a rapid transition from digital navigation technologies to alternative systems based on the methods of marine astronomy and principles of the Dead Reckoning ECDIS method.

The software tool has been created for the automated calculation of vessel coordinates using a sextan. This tool takes corrections into account, methods of statistical processing of data series, automatically detects misses and determines average values with a minimum total error. Determination of observed coordinates is implemented based on mathematical models of altitude lines of position taking into account course, speed and time between observations.

In addition, an autonomous electronic mapping system based on Python libraries (folium, geopy, ipywidgets) has been developed, which provides interactive input of route points coordinates, construction of route segments, calculation of vessel's speed and course, as well as visualization of results on interactive maps. The system can function locally without access to the Internet due to the use of web-oriented map data, which ensures stability and reliability of observation even in extreme conditions.

Experimental testing has confirmed high accuracy of calculations and effectiveness of proposed solutions in situations of electronic navigation system failures. In case of blackout, the developed system allows to restore navigation functions and ensure vessel's safety.

The practical value of the work is to create a flexible, reliable navigation system that minimizes risks in case of technical failures or targeted cyberattacks. Prospects for further research include improving algorithms to reduce errors and adapting the system to real-world operating conditions on vessels in any navigation conditions.

Key words: traditional methods of navigation; navigational astronomy; interactive mapping systems; alternative positioning systems; autonomous navigation; sextant; route visualization.

© Носов П. С., Сокол І. В., Подобєда В. В.

Статтю прийнято до редакції 04.12.2024