

УДК 531.383

О. В. Збруцький, О. І. Нестеренко, О. В. Прохорчук

Науково-аналітичний центр критичних технологій навігаційного приладобудування при Національному технічному університеті України КПІ

Інтегрована система визначення координат і курсу судна для підвищення безпеки судноплавства

Розроблено та проведено дослідження інтегрованої системи визначення координат і курсу судна для підвищення безпеки судноплавства. Результати досліджень показали високі точнісні характеристики та надійність системи при складних умовах руху судна.

Однією з основних задач судноплавства є безпека плавання суден. Оскільки судноплавство, як і будь-яка область знань, еволюціонує, то постійно змінюється і критерій, за допомогою якого оцінюється рівень безпеки мореплавства. Зараз цей критерій встановлюється на міжнародному рівні міжнародною морською організацією ІМО. Цією організацією опублікована Резолюція А.529 «Стандарт точності судноплавства» [6], який визначає необхідну точність визначення місця судна не гірше 4 % від відстані до найближчої небезпеки.

Постійне підвищення вимог по точності та дискретності визначення місця судна стимулює пошуки нових методів вимірювання навігаційних параметрів судна, розробку високоточних та надійних навігаційних систем, засобів збереження та візуалізації навігаційної інформації.

Сучасний стан навігаційного обладнання переважної більшості рухомих об'єктів, у тому числі морських та річкових, базується на використанні різних за фізичним принципом дії датчиків навігаційної інформації, таких як гірокомпас, магнітний компас, інерціальні, радіотехнічні та супутникові навігаційні системи тощо. З огляду на те, що кожен датчик не є універсальним засобом, а має свої переваги та недоліки, давно виникнула потреба в раціональному використанні всієї сукупності навігаційної інформації, яка реалізується інтегруванням окремих навігаційних приладів у єдиний комплекс. При цьому однією з найбільш важливих задач є розробка ефективних алгоритмів інтеграції таких приладів.

У статті приводяться результати розробки та

дослідження інтегрованої навігаційної системи, яка вирішує найбільш важливі для морських та річкових рухомих об'єктів навігаційні задачі — визначення координат і курсу.

СТРУКТУРНА СХЕМА ТА АЛГОРИТМ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІСКК

Інтегрована система визначення координат і курсу (ІСКК) судна побудована на базі коректованого гірокомпаса (КГК), приймача сигналів супутникових навігаційних систем (СНС) і лага. Набір навігаційного обладнання вибраний типовим для переважної більшості морських та річкових рухомих об'єктів. Так, згідно з правилами морського Реєстру [5], гірокомпаси є основними навігаційними приладами, наявність яких обов'язкова на судах із водотоннажністю більше ніж 500 тонн. Лаг традиційно використовується борту судна для визначення його швидкості, а приймач сигналів СНС, який вже широко використовується в судноплавстві, найближчим часом теж має стати обов'язковим для використання на морських судах [4].

При виборі конкретних типів навігаційного обладнання орієнтацію було зроблено на прилади, які виробляються в Україні — малогабаритний коректований гірокомпас «Круїз» [1] та 14-канальний приймач СНС серії СН-3000, інтегрований для використання найбільш поширених супутникових систем ГЛОНАСС і GPS. Як вимірник відносної швидкості руху судна в ІСКК запропоновано використовувати індукційний лаг ІЕЛ-2М [3].

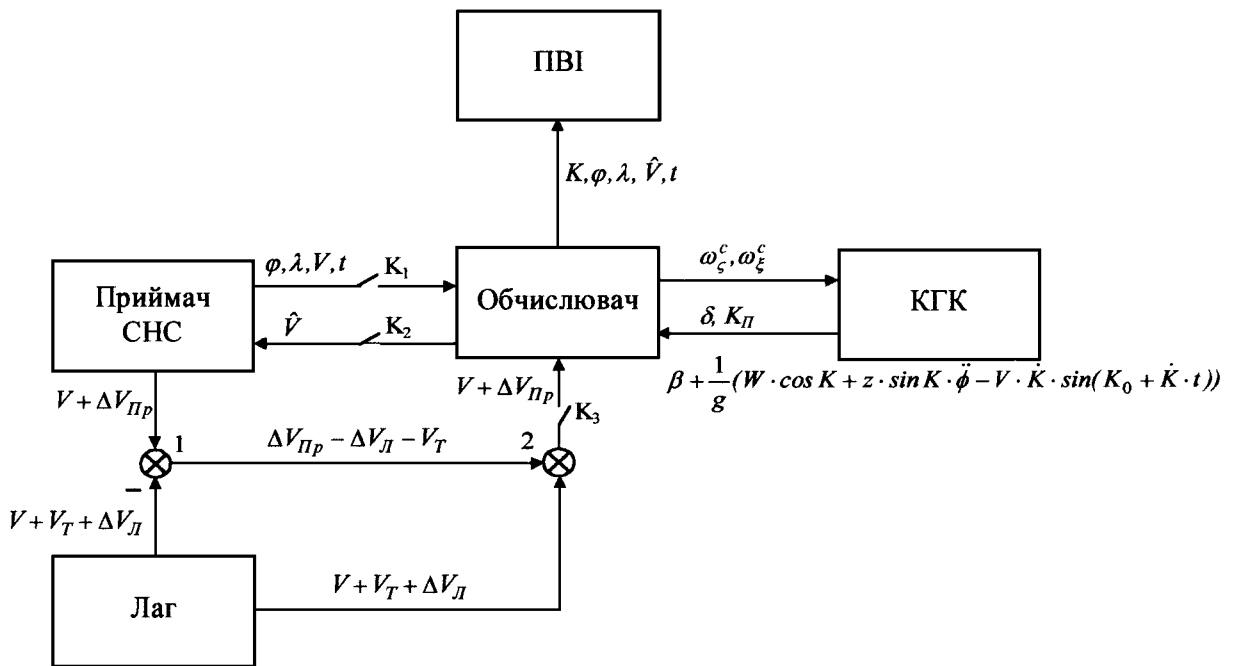


Рис. 1. Структурна схема ІСКК (див. текст)

На рис. 1 показано структурну схему ІСКК. Тут ПВІ — пристрій виводу інформації; K_1, K_2, K_3 — ключі; V_T — швидкість течії; ΔV_L — похибка визначення швидкості лагом; $\Delta V_{Пр}$ — похибка визначення швидкості приймачем СНС; φ і λ — широта і довгота об’єкта; $K, K_{П}$ — дійсне та приладове значення курсу судна; t — поточний час; β — кут відхилення платформи ГК від площини горизонту; δ — вихідний сигнал посилювача акселерометра; $\phi, \dot{\phi}$ — кут і кутова швидкість хитавиці відповідно; W — лінійне прискорення об’єкта; ω_x^c, ω_z^c — моменти корекції гіроскопа КГК, що усувають широтну та швидкісну девіації.

Пояснимо принцип дії ІСКК. ІСКК передбачає два режими функціонування — основний та аварійний.

Основним режимом функціонування ІСКК називається такий режим, коли приймач СНС працює коректно, передає користувачу навігаційну інформацію. В цьому випадку значення показника якості обсервації приймача СНС дорівнює або 1 (обсервація отримана), або 2 (обсервація отримана в диференціальному режимі), ключ K_1 замкнено, а ключі K_2 та K_3 розімкнено. Приймач СНС передає на обчислювач ІСКК інформацію про координати

φ, λ та швидкість судна V , а також точний час t .

Структурна схема системи побудована таким чином, щоб мати можливість усувати із сигналу лага як постійну складову похибки самого лага, так і наявність у вимірюваннях лага складової швидкості течії. Це дозволяє використовувати в ІСКК навіть лаги низької точності (вертушковий або гідродинамічний). Для цього на суматор 1 одночасно надходить інформація про швидкість судна з приймача СНС $V + \Delta V_{Пр}$ та лага $V + V_T + \Delta V_L$ зі знаком мінус. Дійсне значення швидкості судна V , яке є в кожному з сигналів, віднімається, таким чином на виході суматора 1 буде загальна похибка приймача СНС та лага, яка дорівнює $\Delta V_{Пр} - \Delta V_L - V_T$. Загальна похибка подається на суматор 2, туди ж надходить сигнал з лага $V + V_T + \Delta V_L$. Тоді на виході суматора 2 одержуємо сигнал $V + \Delta V_{Пр}$, тобто дійсне значення швидкості судна з похибкою приймача СНС.

ГК «Круїз» передає на обчислювач ІСКК інформацію про приладовий курс судна $K_{П}$, а також сигнали акселерометра $\beta + \frac{1}{g} [W \cos K + z \dot{\phi} \sin K - V \dot{K} (K_0 + K t)]$ та його підсилювача δ . Ця інформація використовується для оцінки похибок ІСКК

та для формування корекції похибок КГК.

Інформація про координати, швидкість, курс та кут зносу судна, а також точний час передається споживачам через пристрій візуалізації навігаційної інформації.

Аварійним режимом функціонування ІСКК називається такий режим, коли приймач СНС перестає передавати навігаційну інформацію у випадку зриву сигналу з навігаційного супутника Землі (НСЗ) (високий рівень радіоперешкод, затінення супутників, вихід з ладу НСЗ та ін.). В цьому випадку значення показника якості обсервації приймача СНС дорівнює нулю, ключ K_1 розімкнено, а ключі K_2 та K_3 замкнено. Лаг, який введено в структуру ІСКК для визначення швидкості судна в аварійних режимах роботи, буде продовжувати визначати швидкість судна, використовуючи останнє значення корекції показів лага $\Delta V_{\text{пр}} - \Delta V_{\text{л}} - V_{\text{т}}$, а на вхід обчислювача буде надходити сигнал вигляду $V + \Delta V_{\text{пр}}$.

Слід зазначити, що при переході від основного режиму функціонування до аварійного структура фільтра Калмана залишиться незмінною, зміняться лише значення коваріаційних матриць випадкових процесів з урахуванням того, що інструментальна похибка вимірювання швидкості лага типу ІЕЛ-2М дорівнює ± 0.5 м/с (для порівняння: у приймача СНС, який використовується в ІСКК, величина відповідної похибки ± 0.05 м/с).

Приймаючи до уваги те, що час поновлення роботи приймача СНС після зриву сигналу не перевищує кількох десятків секунд, будемо вважати, що похибка лага, обумовлена наявністю течії, залишається постійною на протязі аварійного режиму роботи ІСКК.

Таким чином, обчислювач буде продовжувати одержувати інформацію про швидкість руху судна, використовуючи вимірювання лага з урахуванням останньої корекції від приймача сигналів СНС, цим самим забезпечується визначення швидкості та координат судна у випадку зриву сигналу з приймача СНС. Інформація про швидкість (координати) судна передається на приймач СНС для прискорення процесу відновлення його працездатності.

Споживач продовжує отримувати навігаційну інформацію (координати, швидкість, курс судна) з урахуванням корекції.

Алгоритм функціонування ІСКК побудовано на основі модифікації дискретного оптимального фільтра Калмана (ФК) [3] шостого порядку, який враховує корельованість шумів вимірювань і випадкових вхідних впливів, а також наявність детермінованої функції часу у векторі вимірювання. В основу алгоритму ФК покладено рівняння руху

гірокомпаса, які доповнені моделями збурень — випадкової хитавиці та прискорення судна.

У ФК оцінюються такі змінні: похибка курсовизначення КГК α , кут відхилення платформи ГК від площини горизонту β ; вихідний сигнал δ посилювача акселерометра; кут φ і кутова швидкість $\dot{\varphi}$ хитавиці; лінійне прискорення об'єкта W , які разом утворюють вектор стану [1]

$$\mathbf{X}(t) = [\alpha, \beta, \delta, \varphi, \dot{\varphi}, W]^T. \quad (1)$$

Для обчислення коефіцієнтів, що залежать від проекцій кутової швидкості обертання Землі використовуються дані про широту і швидкість рухомого об'єкта, які надходять із приймача СНС.

Вектор вимірювання ІСКК має вигляд

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{W}(t) + \mathbf{V}(t) + \mathbf{U}_y(t), \quad (2)$$

де

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \frac{z}{g} \sin(K) \cdot v^2 & \frac{z}{g} \sin(K) \cdot 2\mu & \frac{\cos(K)}{g} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

— матриця вимірювання;

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{z}{g} \sin(K) \sqrt{A\mu} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

— матриця зовнішніх збурень, що діють на виході системи;

$$\mathbf{V}(t) = \begin{bmatrix} \Delta\beta \\ \Delta\delta \\ \Delta W \end{bmatrix}$$

— вектор шумів вимірів ($\Delta\beta$, $\Delta\delta$, ΔW — шуми акселерометра, підсилювача і приймача СНС);

$$\mathbf{U}_y(t) = \begin{bmatrix} -\frac{V}{g} \dot{K} \sin(K_0 + \dot{K}t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

— детермінована функція часу, що діє на виході системи.

Вектор вимірювання $\mathbf{Y}(t)$ у виразі (2) містить не тільки шуми вимірів $\mathbf{V}(t)$, а й вектор вхідних шумів $\mathbf{W}(t)$, тобто сумарна адитивна похибка вимірів корельована з вхідним шумом системи. Тому для оцінки вектора стану системи (1) в обчислювачі реалізується алгоритм узагальненого дискретного

фільтра Калмана [3], який враховує корельованість шумів вимірів і випадкових вхідних впливів, а також наявність детермінованої функції часу $U_y(t)$ у векторі вимірювання $Y(t)$.

Використаний в ІСКК алгоритм калманівської фільтрації передбачає стробування обчислених за даними з приймача СНС значень прискорення перед визначенням чергової оцінки. Для цього перевіряється наступна нерівність

$$|W_o(k) - X_o(k/k-1)| \leq P^*(k), \quad (3)$$

де півстроби $P^*(k)$ обчислюються за правилом 3 σ :

$$P^*(k) = 3\sqrt{P_{66}[k/(k-1)] + \sigma_w^2},$$

а $P_{66}(k/(k-1))$ — елемент коваріаційної матриці похибок прогнозу.

При виконанні нерівності (3) у відповідності з алгоритмом ФК обчислюються оцінка і коваріаційна матриця похибки оцінки на k -му кроці, прогноз і коваріаційна матриця похибки прогнозу на $(k+1)$ -му кроці. При невиконанні нерівності (3) оцінці на k -му кроці привласнюється значення прогнозу на k -й крок за даними $(k-1)$ -го виміру, а коваріаційна матриця похибки оцінки на k -му кроці фільтрації приймається такою, ж як коваріаційна матриця похибки прогнозу на k -й крок виміру за даними $(k-1)$ -го виміру.

У результаті на виході обчислювального пристрою одержуємо оцінку поточної похибки курсовизначення $\hat{\alpha}(t)$, яка враховується при визначенні курсу судна гірокомпасом, а також координати, швидкість і вектор швидкості судна.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК ІСКК

Універсальним методом оцінки динамічних характеристик ІСКК є комп'ютерне моделювання. Для його проведення була розроблена програма, вихідний текст якої написаний на мові «Паскаль», а виконавчий модуль програми побудовано за допомогою компілятора «Borland Delphi IV» [2].

Моделювання роботи інтегрованої системи ІСКК проводилося як напівнатурне: за допомогою комп'ютера моделювалася робота КГК «Круїз» та індукційного лага ІЕЛ-2М, а за навігаційні вимірювання, вироблені за допомогою приймача сигналів СНС, слугували реальні дані з 14-канального інтегрованого GPS/ГЛОНАСС приймача серії СН-3000, встановленого на нерухомій основі з точно відомими координатами. При цьому дані про швидкість і широту об'єкта використовувалися у програмі як помилки вимірювання швидкості і коорди-

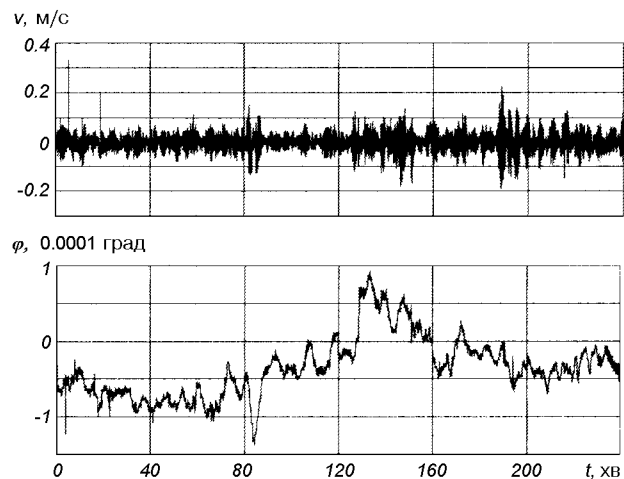


Рис. 2. Похибка визначення лінійної швидкості і широти об'єкта приймачем СНС

нат рухомого об'єкта приймачем СНС.

Отримані при роботі 14-канального інтегрованого GPS/ГЛОНАСС приймача серії СН-3000 результати визначення лінійної швидкості і широти об'єкта приведені на рис. 2.

Середнє квадратичне відхилення (СКВ) помилок визначення швидкості σ_v і широти σ_ϕ при цьому склали [6]:

$$\begin{aligned} \sigma_\phi &= 2.9 \cdot 10^{-5} \text{ град;} \\ \sigma_v &= 0.05286 \text{ м/с.} \end{aligned} \quad (4)$$

Під час проведення напівнатурного моделювання використовувалися чисельні значення параметрів ГК «Круїз» [1] і задавалися такі параметри збурень:

— моделі швидкості V і прискорення W об'єкта задавалися як відомі функції часу:

$$\begin{aligned} V(t) &= \begin{cases} 0.05t, & 0 \leq t \leq 180 \text{ с,} \\ 9 \text{ м/с,} & t > 180 \text{ с,} \end{cases} \\ W(t) &= \begin{cases} 0.05 \text{ м/с}^2, & 0 \leq t \leq 180 \text{ с,} \\ 0, & t > 180 \text{ с;} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

— нерегулярна хитавиця рухомого об'єкта $\varphi(t)$ апроксимувалася випадковим процесом із кореляційною функцією виду

$$K_\varphi(\tau) = D_\varphi e^{-\mu|\tau|} \left(\cos\nu\tau + \frac{\mu}{\nu} \sin\nu|\tau| \right), \quad (6)$$

де D_φ , — дисперсія; ν — переважна частота випадкових коливань; μ — коефіцієнт нерегулярності хитавиці.

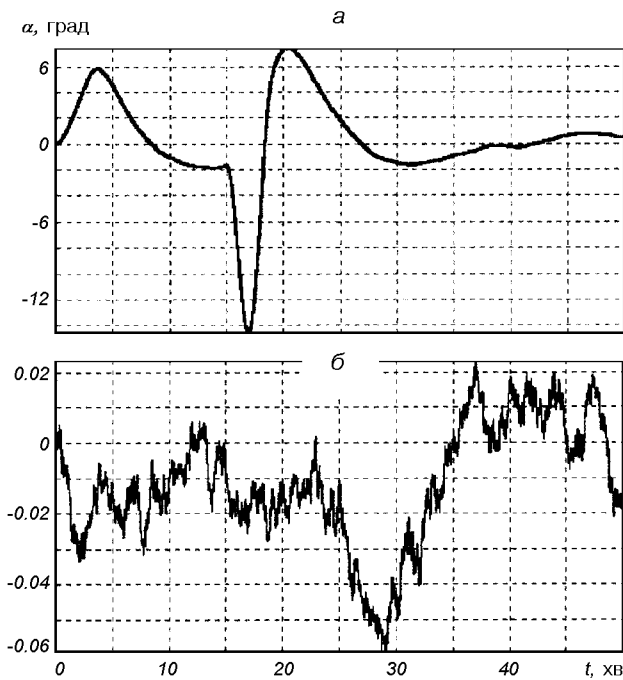


Рис. 3. Похибка визначення курсу КГК «Круїз» (а) та ІСКК (б)

При моделюванні використовувалися такі значення параметрів нерегулярної хитавиці: $D_\varphi = 0.12 \text{ рад}^2$, $\nu = 0.6 \text{ рад}$ та $\mu = 0.01 \text{ рад/с}$; — моделювалася повна циркуляція судна з 15 по 19 хв, тобто $T_{\text{ц}} = 240 \text{ с}$; — задавалася відстань від центра мас судна до місця кріплення ГК: $z = 3 \text{ м}$.

На рис. 3, а приводяться результати моделювання руху гірокомпаса, які показують, що при заданих умовах хитавиці і маневрування об'єкта похибка визначення кута курсу гірокомпасом може перевищувати 14° .

У розробленій ІСКК похибка курсовизначення зменшилася до розміру помилки оцінки похибки ГК фільтром Калмана і склала $\sigma_\alpha = 0.045^\circ$ (рис. 3, б).

Значення прискорення, отримане при диференціюванні даних з приймача СНС про швидкість судна, приведені на рис. 4, а, при цьому СКВ помилки визначення прискорення $\sigma_{\dot{v}}$ склало 0.019 м/с^2 . На рис. 4, б показані результати оцінки прискорення об'єкта за допомогою фільтра Калмана в ІСКК.

Завдяки згладжувальним властивостям фільтра Калмана СКВ помилки визначення прискорення

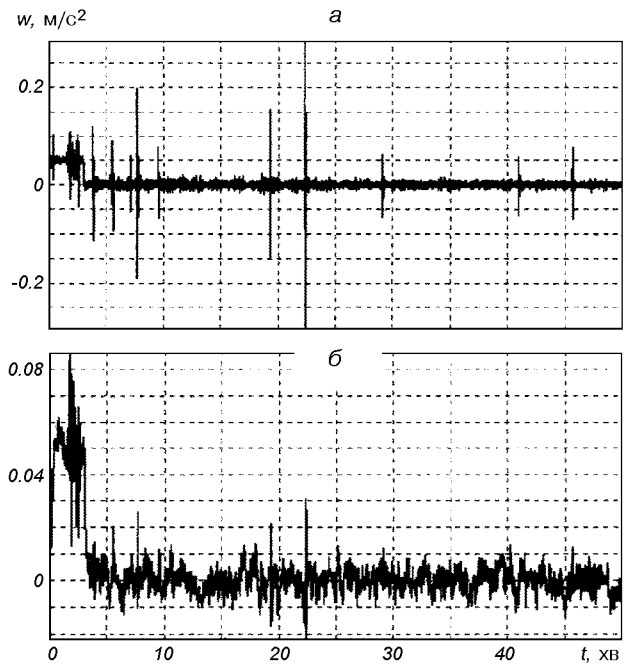


Рис. 4. Прискорення судна: а — обчислене за даними з приймача СНС, б — оцінене за допомогою фільтра Калмана в ІСКК

знизилося з $\sigma_{\dot{v}} = 0.019$ до $8.538 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$.

Приведені вище результати напівнатурного моделювання показують високі точнісні характеристики розробленої інтегрованої системи ІСКК при складних умовах руху об'єкта. При заданні різних значень параметрів збурень визначаються максимально можливі похибки ІСКК. Так, при використанні у ході моделювання параметрів випадкової хитавиці і маневрування об'єкта максимально можливі похибки ІСКК склали:

— визначення кута курсу $\Delta K_{\text{max}} = 0.25^\circ$;

— по визначенню прискорення об'єкта $\Delta W_{\text{max}} = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$.

Зазначені похибки досить низькі навіть для спокійних умов плавання. Згідно з вимогами морського Реєстру похибка курсовизначення при плаванні прямим курсом без хитавиці не повинна перевищувати $\pm 0.75^\circ \text{sec}(\varphi)$, а при хитавиці і маневруванні — $2...3^\circ$. Похибка визначення прискорення об'єкта за допомогою ІСКК взагалі близька до порогу чутливості навігаційних акселерометрів середньої точності.

Помилки виміру поточних координат об'єкта зберігаються на рівні помилок використовуваного в ІСКК приймача СНС СН-3102. При зриві сигналу

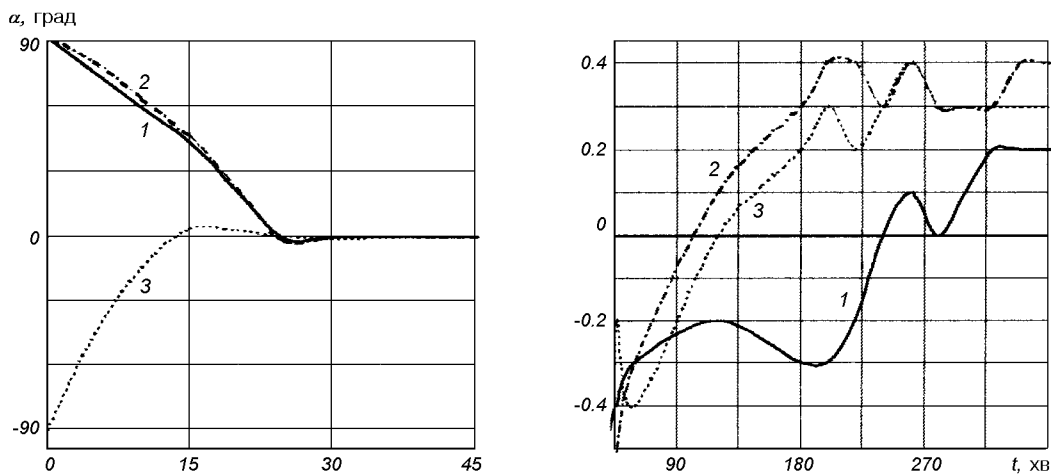


Рис. 5. Результати стендового випробування гірокомпаса «Круїз» при трьох пусках приладу

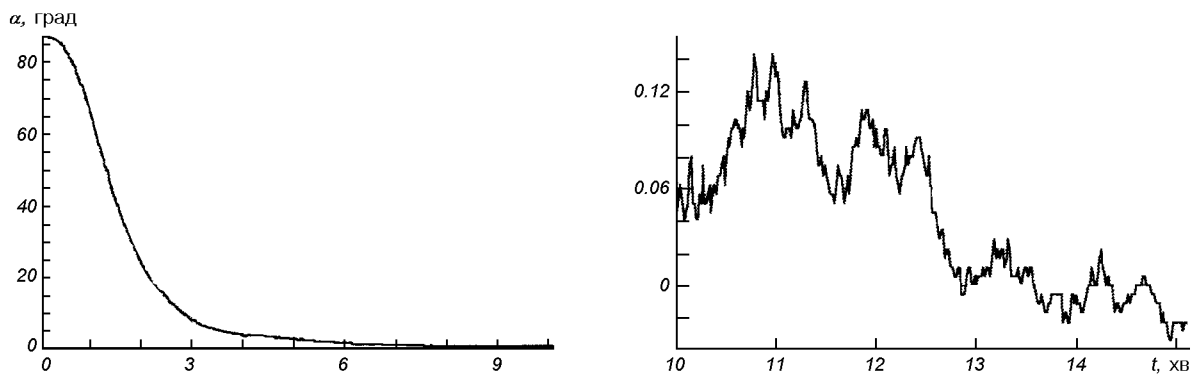


Рис. 6. Результати стендового випробування ІСКК

СНС завдяки оцінці в ІСКК швидкості об'єкта скорочується час поновлення працездатності приймача.

СТЕНДОВІ ВИПРОБУВАННЯ ІСКК

З метою перевірки теоретичних результатів та напівнатурного моделювання роботи ІСКК були проведені стендові випробування макета інтегрованої навігаційної системи у складі коректованого гірокомпаса «Круїз», приймача сигналів СНС СН-3002 «Бриз» та ПЕОМ, яка використовувалася для поєднання приладів в єдину систему, обробки інформації та візуалізації результатів роботи.

В ході стендових випробуваннях на час готовності ІСКК центральний прилад КГК «Круїз» роз-

міщався на спеціальному стенді і виставлявся в площину географічного меридіана з помилкою не більше $\pm 0.1^\circ$. Потім платформа гірокомпаса вручну поверталася на кут 90° або -90° і включалася система. По ТУ на гірокомпас «Круїз» вважається, що гірокомпас прийшов у площину меридіана, якщо на приладі керування засвітився світлодіод «READY» і наступні після цього відліки курсу знаходяться у межах $\pm 0.1^\circ$. При цьому приймач сигналів СНС СН-3002 «Бриз» видавав навігаційну інформацію, яка використовувалася в обчислювальному пристрої для реалізації алгоритмів, представлених вище.

На рис. 5 приведені результати випробування гірокомпаса «Круїз» при трьох пусках приладу. Середній час готовності гірокомпаса до роботи склав 47 хв.

На рис. 6 показані результати стендових випробувань ІСКК. Середній час готовності ІСКК до роботи склав 8 хв. Слід зазначити, що починаючи з 10 хв СКО оцінки похибки курсовизначення в ІСКК не перевищувало 0.08° .

1. Збруцький А. В., Нестеренко О. І., Старицький Л. П. Разработка малогабаритных корректируемых гироскопических // Третья Санкт-Петербургская международная науч.-техн. конф. по интегрированным навигационным системам. — С.-Петербург, 1996.—С. 193—199.
2. Збруцький О. В., Нестеренко О. І., Прохорчук О. В. Оцінка динамічних похибок інтегрованої навігаційної системи визначення координат і курсу рухомого об'єкта // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів: Зб. Наук. пр. — Київ, УТУ, ТАУ.—1999.—Вип. 8.—С. 23—27.
3. Збруцький О. В., Нестеренко О. І., Прохорчук О. В. Визначення координат і курсу рухомого об'єкта інтегрованою навігаційною системою // Наукові вісті НТУУ

КП. —2000.—№ 2.—С. 79—83.

4. Кошевий А. А. Сучасні техніко-експлуатаційні вимоги до засобів навігації та судноводіння // Механіка гіроскопічних систем.—1997.—Вип. 14.—С. 119—127.
5. Правила по конвенционному оборудованию морских судов // В кн.: Регистр СССР-1990 г.—Л.: Транспорт. 1989.—С. 45—213.
6. IMO Resolution A.529 (13). Accuracy standards for navigation. — (Adopted on 17 Nov. 1983).

INTEGRATED SYSTEM FOR VESSEL COORDINATES AND HEADING DETERMINATION FOR IMPROVEMENT OF ACCIDENT PREVENTION OF SHIPPING

O. V. Zbruts'kyi, O. I. Nesterenko, O. V. Prokhorchuk

Integrated system for vessel coordinates and heading determination for improvement of navigation accident prevention was developed and investigated. The results of investigations showed a high accuracy and system reliability during the difficult condition of vessel motion.