

Определены теоретические предпосылки влияния конструкционных параметров барабанных сушилок с периодическим воздействием тепловой энергии на объект сушки на их технологические параметры.

Сушка, технологические и конструкционные параметры, сушильный барабан.

Certainly theoretical pre-conditions of influence of construction parameters of glaciars with periodic influence of thermal energy on object of drying on its technological parameters.

Drying, technological and construction parameters, drying drum.

УДК 631.315:629.783

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЇ ОБРОБКИ НАВІГАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ УПРАВЛІННІ РУХОМ МТА

***Л.В. Аніскевич, доктор технічних наук
Д.Г. Войтюк, кандидат технічних наук,
член-кореспондент НААН України
В.І. Кравчук, доктор технічних наук,
член-кореспондент НААН України***

Запропоновано неінваріантну компенсаційну з модулем нелінійної регресії методика обробки навігаційної інформації при управлінні рухом МТА по заданій траєкторії, яка може бути застосована для інтегрованих комплексів на базі супутникової та курсо-швидкісної навігаційних підсистем із використанням датчиків з невисокими показниками точності без погіршення показників точності роботи комплексу в цілому. Розроблено методика імітаційного моделювання процесів навігації та управління рухом МТА.

Польова машина, навігаційний комплекс, ітераційний алгоритм, нелінійна регресія, корекція та екстраполяція оцінок координат.

Постановка проблеми. Для реалізації складних технологічних операцій, що їх виконують рухомі польові машини, необхідно мати достовірну навігаційну інформацію. На сьогодні існують широкі

технічні можливості проведення операцій навігації транспортних засобів наземного базування [1]. Для ефективного використання цих технічних можливостей, а також для розробки нових програмно-апаратних комплексів для визначення координат МТА в полі важливо обґрунтувати раціональні моделі, алгоритми та методи обробки навігаційної інформації, що надходить від спеціалізованого обладнання, а також мати інструментарій аналізу потенційних можливостей як простих (однокомпонентних), так і комплексних (багатокомпонентних) навігаційних систем [2,3].

Аналіз останніх досліджень. Як правило, до складу навігаційного комплексу польової машини входить основна система автономного обчислення координат та допоміжна (наприклад, супутникова навігаційна системи - СНС). Основна система автономного обчислення координат МТА в полі забезпечується використанням курсо-швидкісної навігаційної системи (КШНС), або інерціальної. В якості допоміжної використовується диференціальна супутникова навігаційна система (ДСНС), яка відрізняється достатньою (у межах до декількох метрів) точністю розрахунку координат місцезнаходження МТА та складових швидкості (у межах до 0.01 м/с) і не вимагає завдання початкових умов. До числа недоліків ДСНС необхідно віднести можливість виникнення перерв у отриманні інформації від навігаційних супутників через радіозатемнення сигналів лініями електромереж, деревами тощо, малу частоту оновлення інформації, як правило - 1 Гц, а також сучасні підвищені вимоги до кінематичних характеристик руху МТА.

Мета досліджень. Виходячи із зазначеного, застосовують не окремі навігаційні системи, а навігаційні комплекси, які дозволяють шляхом оптимальної обробки вихідних сигналів про параметри руху й орієнтації машини від КШНС та СНС отримати високі показники точності проходження МТА по заданій траєкторії.

Результати досліджень. В якості основної системи приймемо КШНС, а ДСНС виступатиме в ролі коректуючої. Задача оптимальної організації навігаційних підсистем у загальний навігаційно-управляючий комплекс є задачею інтеграції та побудови комплексу, а виконання операцій корекції навігаційної інформації є головним завданням навігаційного комплексу.

Блок-схема типового бортового навігаційного комплексу представлена на рис. 1.

У склад бортового навігаційно-управляючого комплексу входять:

- курсо-швидкісна навігаційна система (КШНС), що включає датчик швидкості (ДШ), який вимірює поточну шляхову швидкість, та датчик курсу (ДК);
- диференціальна супутникова навігаційна система (ДСНС).

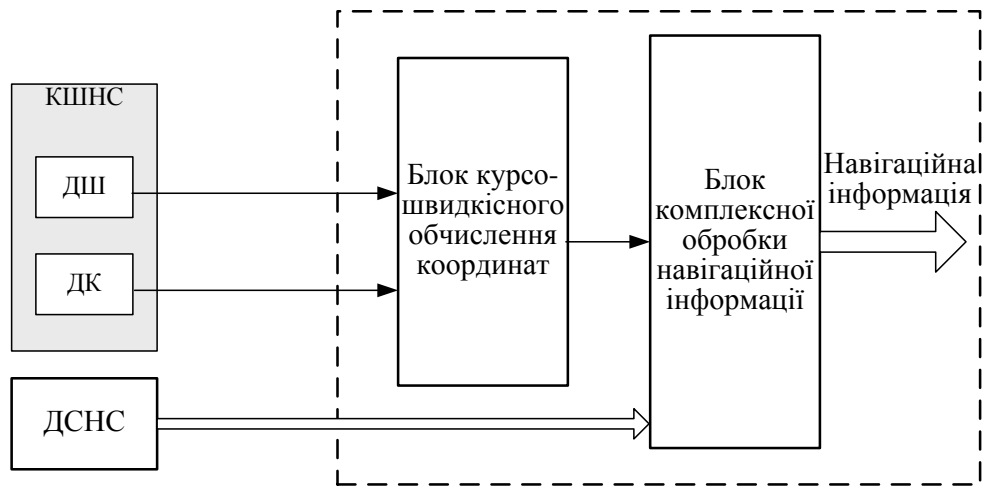


Рис. 1. Блок-схема типового бортового навігаційного комплексу.

Особливість функціонування інтегрованого навігаційного комплексу полягає в тому, що шляхом комплексної обробки вихідних сигналів про параметри руху й орієнтації машини від кожної з навігаційних систем, отримують показники точності роботи комплексу (навігаційної інформації) в цілому вищими ніж точність роботи кожної з систем, що входять до складу комплексу. Причому показник точності роботи навігаційної системи великою мірою залежить від способу обробки комплексної навігаційної інформації використаних систем (блок комплексної обробки навігаційної інформації).

Часто використовується спосіб, що базується на формуванні різницевих вимірів – тобто різниць оцінок навігаційних параметрів, що отримані на виходах КШ підсистеми та ДСНС [4]. Принцип роботи такого способу показано на рис. 2.

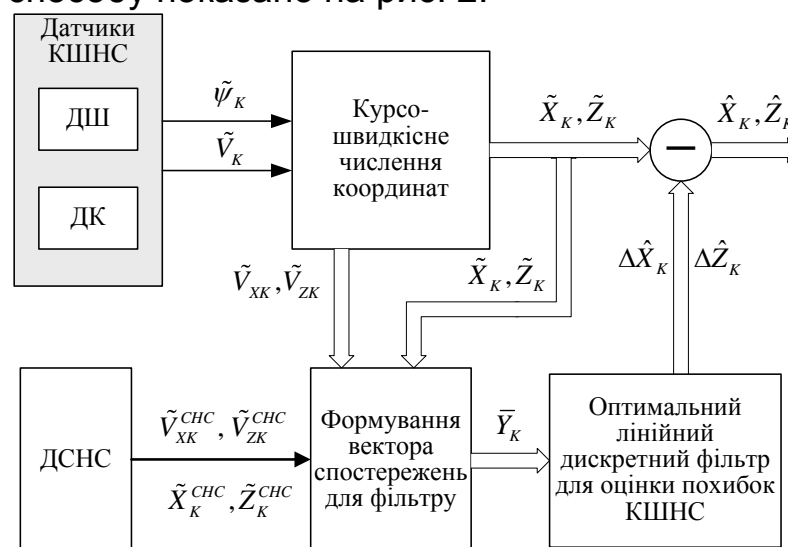


Рис. 2. Блок-схема відомого способу комплексної обробки навігаційної інформації від КШНС та ДСНС.

Шляхом використання різницевих вимірювань вирішується задача оцінювання (фільтрації) поточних похибок систем числення координат на фоні випадкових похибок ДНС. При лінійному характері моделі еволюції похибок КШНС такий підхід дозволяє, у випадку використання лінійного оптимального фільтру Калмановського типу, отримати незміщені оцінки похибок розрахунку координат при забезпеченні їх незалежності (інваріантності) від шуканих навігаційних параметрів мобільної машини. Оцінки помилок, що отримуються на виході фільтра, використовуються для виправлення вихідної навігаційної інформації.

Передбачається, що вихідні сигнали датчика курсу відповідають виразу виду:

$$\tilde{\psi}_K = \psi(t_K) + \Delta\psi + \eta(t_K), \quad (1)$$

де $\Delta\psi$ - систематична похибка датчика курсу;

$\eta(t_K)$ - некорельована випадкова похибка, що має нульове математичне очікування й відоме середньоквадратичне значення $\sigma_{\psi d}$;

$\psi(t_K)$ - фактичне значення кута курсу мобільної машини в момент часу $t = t_K$, тобто кута між віссю X , що лежить у площині меридіану на початку координат і направлена відповідно на північ, та повздожньою віссю мобільної машини.

Вихідні сигнали датчика шляхової швидкості описуються рівнянням виду:

$$\tilde{V}_K = V(t_K)(1 + \delta_V) + \eta_{Vd}(t_K), \quad (2)$$

де δ_V - систематична похибка масштабного коефіцієнта датчика шляхової швидкості;

$\eta_{Vd}(t_K)$ - некорельована випадкова похибка, що має нульове математичне очікування і відоме середньоквадратичне значення σ_{Vd} ;

$V(t_K)$ - фактичне значення шляхової швидкості центру мас мобільної машини в момент часу $t = t_K$.

Без обмеження суті викладок приймається, що вихідні сигнали ДНС відповідають наступним формулам:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_K^{CHC} &= X(t_K) + \eta_X(t_K); \\ \tilde{Z}_K^{CHC} &= Z(t_K) + \eta_Z(t_K); \\ \tilde{V}_{XK}^{CHC} &= V_X(t_K) + \eta_{V_X}(t_K); \\ \tilde{V}_{ZK}^{CHC} &= V_Z(t_K) + \eta_{V_Z}(t_K), \end{aligned} \quad (3)$$

де $\eta_X(t_K)$, $\eta_Z(t_K)$, $\eta_{V_X}(t_K)$, $\eta_{V_Z}(t_K)$ - некорельовані випадкові похибки ДСНС у вимірюванні ортодромічних координат і складових шляхової швидкості центру мас мобільної машини, що мають нульові математичні очікування і відомі середньоквадратичні значення σ_{Rc} , σ_{Vc} ;

$X(t_K)$, $Z(t_K)$ - фактичні значення координат центра мас мобільної машини в момент часу $t = t_K$;

$V_X(t_K)$, $V_Z(t_K)$ - фактичні значення складових шляхових швидкостей центра мас мобільної машини в момент часу $t = t_K$.

Числення координат від курсо-швидкісної підсистеми мобільної машини виконується за формулами:

$$\begin{aligned}\tilde{X}_{K+1} &= \tilde{X}(t_0) + \tilde{V}_K(t_K) \text{Cos} \tilde{\psi}(t_K) \Delta T; \\ \tilde{Z}_{K+1} &= \tilde{Z}(t_0) + \tilde{V}_K(t_K) \text{Sin} \tilde{\psi}(t_K) \Delta T,\end{aligned}\quad (4)$$

де $\tilde{X}(t_0)$, $\tilde{Z}(t_0)$ - задані початкові умови;

ΔT - крок дискретизації, що дорівнює періоду оновлення інформації від ДСНС.

Вектор спостережень \bar{Y}_K для фільтра (рис.2) формується наступним чином:

$$\bar{Y}_K = (\tilde{X}_K - \tilde{X}_K^{CHC}, \tilde{Z}_K - \tilde{Z}_K^{CHC}, \tilde{V}_{XK} - \tilde{V}_{XK}^{CHC}, \tilde{V}_{ZK} - \tilde{V}_{ZK}^{CHC})^T \quad (5)$$

де $\tilde{V}_{XK} = \tilde{V}_K \text{Cos} \tilde{\psi}_K$;

$\tilde{V}_{ZK} = \tilde{V}_K \text{Sin} \tilde{\psi}_K$.

Таким чином, сутність наведеного способу комплексної обробки навігаційної інформації від КШНС та ДСНС полягає в оцінюванні похибок КШНС з використанням поточної позиційно-швидкісної інформації від ДСНС за допомогою лінійного дискретного фільтра та відповідної корекції КШНС щодо визначення координат центру мас об'єкту.

Одним з недоліків такого способу комплексної обробки навігаційної інформації від КШНС та ДСНС є можливе порушення лінійного характеру моделі еволюції похибок навігаційної системи при зростанні похибок числення координат.

Іншим недоліком наведеного способу комплексної обробки навігаційної інформації є низький рівень інтеграції (інтеграція відбувається на рівні систем: КШНС та ДСНС), а також неврахування динамічних властивостей навігаційних параметрів мобільної машини. Для усунення відмічених недоліків і підвищення просторової точності розрахунку координат та кінематичних режимів руху машини наземного базування пропонується новий [5] спосіб обробки навігаційної інформації. Цей спосіб реалізується

застосуванням блоку оцінювання поправок до показань датчиків курсу та швидкості за допомогою ітераційного алгоритму нелінійної регресії, а також блоками корекції оцінок координат і поправок до показань датчиків та коваріаційної матриці помилок і екстраполяції оцінок координат та коваріаційних матриць помилок оцінок на один крок (рис. 3).

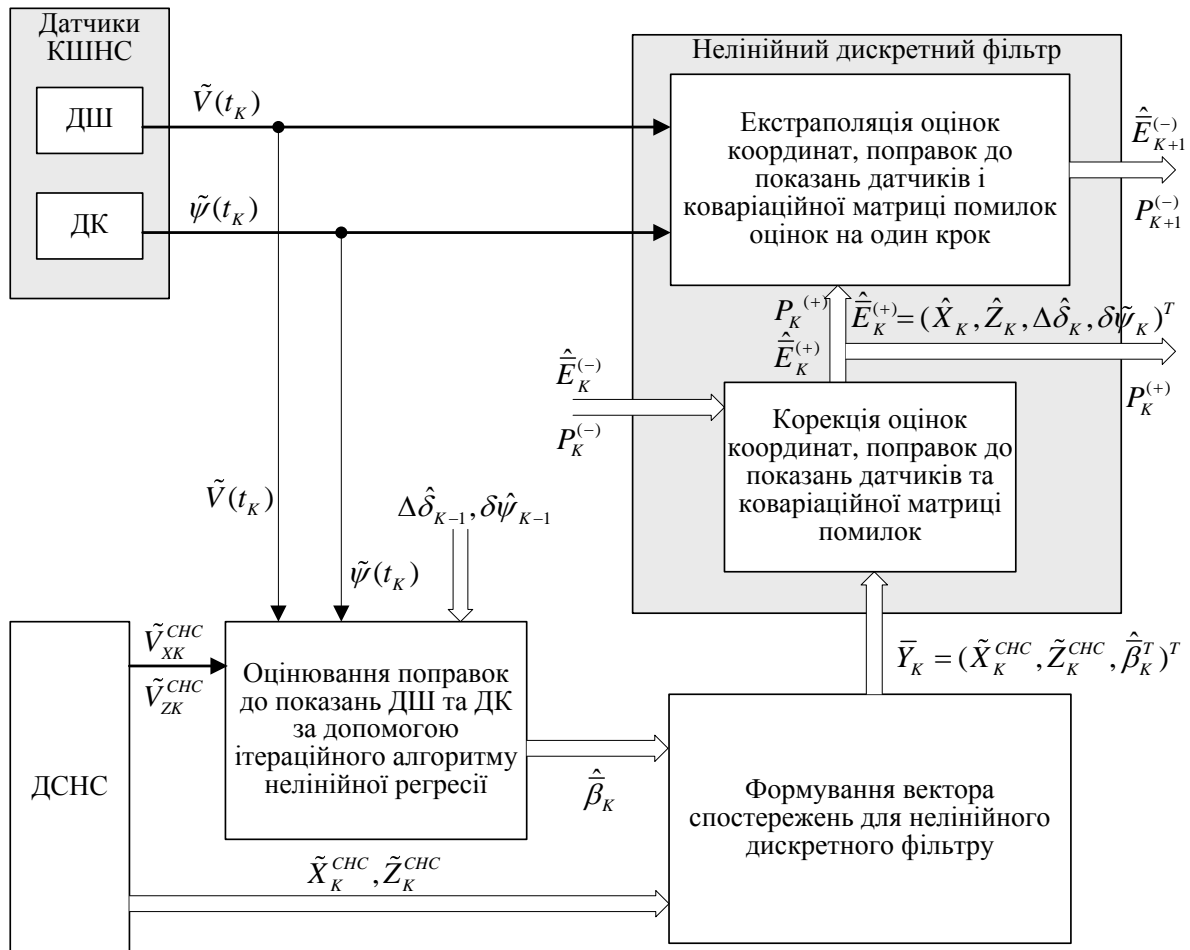


Рис. 3. Блок-схема запропонованого способу комплексної обробки навігаційної інформації.

Запропонований спосіб комплексної обробки навігаційної інформації забезпечує на кожному дискретному K -му кроці обробки інформації від ДСНС про діючі складові шляхової швидкості центру мас машини розрахунок, за допомогою спеціальної процедури нелінійної регресії, оцінок поправок до показань датчика курсу $\delta\hat{\psi}_K$ та значень масштабного коефіцієнту датчика шляхової швидкості $\Delta\hat{\delta}_K$. При цьому показання датчиків ДСНС по складовим шляхової швидкості центра мас мобільної машини представлені у вигляді:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{XK}^{CHC} &= \tilde{V}_K (1 + \Delta\delta_p) \cos(\tilde{\psi}_K + \delta\psi_p) + \eta_{V_{XK}}; \\ \tilde{V}_{ZK}^{CHC} &= \tilde{V}_K (1 + \Delta\delta_p) \sin(\tilde{\psi}_K + \delta\psi_p) + \eta_{V_{ZK}}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\Delta\delta_p$ та $\delta\psi_p$ - шукані поправки до показань датчика шляхової швидкості та курсу мобільної машини;

$\eta_{V_{XK}}$ та $\eta_{V_{ZK}}$ - випадкові збурення, що обумовлені випадковими похибками ДСНС та датчиків швидкості і курсу.

На основі співвідношень (6) формується векторна модель нелінійної регресії виду:

$$\bar{Y}_K = \bar{h}(\bar{\beta}, \bar{\gamma}_K) + \bar{\eta}, \quad (7)$$

де $\bar{Y}_K = (\tilde{V}_{XK}^{CHC}, \tilde{V}_{ZK}^{CHC})^T$ - вектор-стовпець поточних вимірювань складових швидкості за допомогою ДСНС;

$\bar{\beta} = (\Delta\delta_p, \delta\psi_p)^T$ - вектор-стовпець шуканих поправок до показань датчиків швидкості та курсу;

$\bar{\gamma}_K = (\tilde{\psi}_K, \tilde{\psi}_K)^T$ - вектор-стовпець поточних показань датчиків шляхової швидкості та курсу;

$$\bar{h}(\bar{\beta}, \bar{\gamma}_K) = (X_K, Z_K, \tilde{V}_K(1 + \Delta\delta_p)\text{Cos}(\tilde{\psi}_K + \delta\psi_p), \tilde{V}_K(1 + \Delta\delta_p)\text{Sin}(\tilde{\psi}_K + \delta\psi_p))^T;$$

$\bar{\eta}$ - вектор випадкових збурень у рівнянні нелінійної регресії, що обумовлений випадковими похибками ДСНС у вимірюванні складових швидкості центру мас мобільної машини, а також випадковими складовими помилок датчиків шляхової швидкості та кута курсу.

Оцінки шуканого вектору поправок $\bar{\beta}$ до показань датчиків шляхової швидкості та курсу на кожному K -ому кроці обробки навігаційної інформації пропонується отримувати за допомогою узагальненої нелінійної регресійної процедури типу Гауса-Ньютона:

$$\hat{\beta}_{K_{i+1}} = \hat{\beta}_{K_i} + \lambda \Gamma_{iK}^{\oplus} [\bar{Y}_R - \bar{h}(\hat{\beta}_{K_i}, \bar{\gamma}_K)], \quad i = 0, 1, 2, \dots, i_{\max} \quad (8)$$

$$\text{де } \Gamma_{iK} = \frac{\partial \bar{h}(\hat{\beta}, \bar{\gamma}_K)}{\partial \hat{\beta}_i};$$

\oplus - символ операції псевдообернення матриці;

λ - параметр кроку ітерацій;

i_{\max} - задане максимальне число ітерацій.

Початкові значення компонент вектора поправок на першому кроці обробки навігаційної інформації задаються нульовими (при $K=1$). В якості початкових значень оцінок вектора поправок для кроків $K>1$ беруться результати оцінювання вектора поправок із попереднього кроку ($K-1$). Вирази для матриць Γ_{iK} та Γ_{iK}^{\oplus} у процедурі (8) мають наступний вид:

$$\Gamma_{iK} = \tilde{V}_K \begin{pmatrix} \text{Cos}(\tilde{\psi}_K + \delta\hat{\psi}_{iK}) & -(1 + \Delta\hat{\delta}_{iK})\text{Sin}(\tilde{\psi}_K + \delta\hat{\psi}_{iK}) \\ \text{Sin}(\tilde{\psi}_K + \delta\hat{\psi}_{iK}) & (1 + \Delta\hat{\delta}_{iK})\text{Cos}(\tilde{\psi}_K + \delta\hat{\psi}_{iK}) \end{pmatrix}; \quad (19)$$

$$\Gamma_{iK}^{\oplus} = \frac{1}{\tilde{V}_K (1 + \Delta\hat{\delta}_{iK})} \begin{pmatrix} (1 + \Delta\hat{\delta}_{iK})\text{Cos}(\tilde{\psi}_K + \delta\hat{\psi}_{iK}) & (1 + \Delta\hat{\delta}_{iK})\text{Sin}(\tilde{\psi}_K + \delta\hat{\psi}_{iK}) \\ -\text{Sin}(\tilde{\psi}_K + \delta\hat{\psi}_{iK}) & \text{Cos}(\tilde{\psi}_K + \delta\hat{\psi}_{iK}) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

На кожному K -ому кроці обробки навігаційної інформації, окрім оцінювання поправок до показань датчиків за допомогою процедури (8), отримують також оцінки поточних координат центра мас мобільної машини і уточнені оцінки поправок $\Delta\delta_K, \delta\psi_K$ до показань датчиків. Для виконання останньої операції використовується процедура узагальненої дискретної фільтрації, у якій операція корекції оцінок координат центра мас мобільної машини й поправок до показань датчиків виконується тільки при наявності поточної позиційно-швидкісної інформації від ДСНС. Операція екстраполяції оцінок координат на кожному кроці обробки при цьому виконується за допомогою формул для курсо-швидкісного числення координат з урахуванням поточних значень оцінок поправок до показань датчиків шляхової швидкості та курсу.

Вектор стану для узагальненого дискретного фільтра має вид:

$$\bar{E}_K = (X_K, Z_K, \Delta\delta_P, \delta\psi_P)^T \quad (10)$$

де $X_K, Z_K, \Delta\delta_P, \delta\psi_P$ - шукані значення координат і поправок до показань датчиків.

Дискретна модель еволюції вектора стану характеризується векторним співвідношенням виду:

$$\bar{E}_{K+1} = \bar{f}(\bar{E}_K) + B_{1K}\bar{\varepsilon}_{1K} + B_{2K}\bar{\varepsilon}_{2K} \quad (11)$$

де $\bar{\varepsilon}_{1K}, \bar{\varepsilon}_{2K}$ - чотиримірні вектори-стовпці некорельованих випадкових збурень з нульовими математичними очікуваннями і одиничними дисперсіями – вектори "білого" шуму;

$$B_{1K} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\xi\delta_V} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\xi\Delta\psi} \end{pmatrix} \cdot \Delta T^{\frac{1}{2}}; \quad B_{2K} = \begin{pmatrix} \sigma_{V_d} \text{Cos}\tilde{\psi}_K & -\delta_{\psi} \tilde{V}_{Z_K} \Delta T & 0 & 0 \\ \sigma_{V_d} \text{Sin}\tilde{\psi}_K & \delta_{\psi} \tilde{V}_{X_K} \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \Delta T^{\frac{1}{2}};$$

$\sigma_{\xi\delta_V}, \sigma_{\xi\Delta\psi}$ - задані параметри, що характеризують малі зміни (випадкові зсуви) систематичних помилок δ_V та $\Delta\psi$ в часі;

$$\tilde{V}_{X_K} = \tilde{V}_K \text{Cos}\tilde{\psi}_K; \quad \tilde{V}_{Z_K} = \tilde{V}_K \text{Sin}\tilde{\psi}_K.$$

Вектор-функція $\bar{f}(\bar{E}_K)$ має вигляд:

$$\bar{f}(\bar{E}_K) = \bar{E}_K + \begin{pmatrix} \tilde{V}_K (1 + \Delta\delta_{PK}) \text{Cos}(\tilde{\psi}_K + \delta\psi_{PK}) \\ \tilde{V}_K (1 + \Delta\delta_{PK}) \text{Sin}(\tilde{\psi}_K + \delta\psi_{PK}) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Вектор спостережень для узагальненого дискретного фільтра формується у вигляді:

$$\bar{Y}_K = (\tilde{X}_K^{CHC}, \tilde{Z}_K^{CHC}, \hat{\beta}_K^T)^T, \quad (13)$$

де $\hat{\beta}_K$ - вектор оцінок поправок до показань датчиків, що отримані за допомогою процедури нелінійної регресії (8).

Вектор спостережень \bar{Y}_K відповідає формулі:

$$\bar{Y}_K = \bar{E}_K + D_{1K}\bar{e}_{1K} + D_{2K}\bar{e}_{2K}, \quad (14)$$

У виразі (15) матриці D_{1K} та D_{2K} мають вигляд:

$$D_{1K} = \frac{\sigma_{Vc}}{\tilde{V}_K} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \text{Cos}(\tilde{\psi}_K + \delta\hat{\psi}_{PK}) & \text{Sin}(\tilde{\psi}_K + \delta\hat{\psi}_{PK}) & 0 & 0 \\ -\text{Sin}(\tilde{\psi}_K + \delta\hat{\psi}_{PK}) & \text{Cos}(\tilde{\psi}_K + \delta\hat{\psi}_{PK}) & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (15)$$

$$D_{2K} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \sigma_{Rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{Rc} \\ \frac{\sigma_{Vd}}{\tilde{V}_K} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\psi d} & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Процедура узагальненої дискретної фільтрації (оцінювання вектору \bar{E}_K), що відповідає моделі (12) у відповідності до спостережень виду (14) характеризується формулами [6] корекції оцінок вектору $\hat{E}_K^{(-)}$ та коваріаційної матриці помилок оцінки $P_K^{(-)}$, що виконується за умов надходження позиційно-швидкісної інформації від ДСНС:

$$\hat{E}_K^{(+)} = \hat{E}_K^{(-)} + P_K^{(-)} Q_\gamma^\oplus (\bar{Y}_K - \hat{E}_K^{(-)}); \quad (17)$$

$$P_K^{(+)} = P_K^{(-)} - P_\gamma Q_\gamma^\oplus P_\gamma^T \quad (18)$$

де $Q_\gamma = P_K^{(-)} + D_{1K}D_{1K}^T + D_{2K}D_{2K}^T$; $P_\gamma = B_{1K}D_{1K}^T + B_{2K}D_{2K}^T + P_K^{(-)}$;

Операція екстраполяції $\hat{E}_K^{(+)}$ та $P_K^{(+)}$, що виконується на кожному кроці обробки навігаційної інформації, має вигляд:

$$\hat{E}_{K+1}^{(-)} = f(\hat{E}_K^{(+)}); \quad (19)$$

$$P_{K+1}^{(-)} = \Phi_K P_K^{(+)} \Phi_K^T + B_{1K}B_{1K}^T + B_{2K}B_{2K}^T, \quad (20)$$

$$\text{де } \Phi_K = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \tilde{V}_{X_K} \Delta T & -\tilde{V}_{Z_K} \Delta T \\ 0 & 1 & \tilde{V}_{Z_K} \Delta T & \tilde{V}_{X_K} \Delta T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - \text{перехідна матриця.}$$

Запропонований спосіб комплексної обробки навігаційної інформації характеризується високим рівнем інтеграції бортових навігаційних засобів (інтеграція відбувається на рівні датчиків первинної інформації), що дає можливість підвищити швидкість збіжності оцінок поправок до показань датчиків та оцінок координат центра мас машини, у результаті чого забезпечується висока точність оцінок навігаційних параметрів мобільної машини при мінімізації вартості обладнання й обчислювальних операцій.

Крім того, запропонований спосіб комплексної обробки навігаційної інформації не потребує використання лінійної моделі еволюції похибок КШНС у часі, дозволяє підвищити рівень інтеграції датчиків курсо-швидкісної та супутникової навігаційних систем, а також урахувати динамічні властивості навігаційних параметрів машини і як наслідок, покращити просторову точність місцезнаходження машини на місцевості та істотно збільшити економічну ефективність від управління рухом по заданій траєкторії МТА та мобільних пілотних і безпілотних польових машин.

Перевірка ефективності функціонування представлених способів розрахунку навігаційної інформації для навігаційно-управляючого комплексу МТА проведена шляхом імітаційного моделювання. Таке моделювання дозволяє оцінити правильність формування рівняння спостережень, екстраполяції оцінки вектора похибок навігаційних підсистем, корекції оцінок вектору стану системи та матриці поправок. Також з'являється можливість порівняння якості розрахунку навігаційної інформації для різних схем інтеграції підсистем і методик обробки навігаційної інформації, у тому числі і запропонованої неінваріантної компенсаційної схеми побудови навігаційно-управляючого комплексу (НУК).

До аналізу процесів функціонування НУК включені три способи обробки навігаційної інформації:

- інваріантний зі зворотними зв'язками (варіант 1);
- неінваріантний компенсаційний (варіант 2);
- неінваріантний компенсаційний з модулем нелінійної регресії (варіант 3).

Уведення кожного з розглянутих способів у процес навігації та управління рухом МТА забезпечується спеціально розробленим

алгоритмом роботи блоку моделювання комплексної обробки навігаційної інформації (рис. 4).

Включення необхідної схеми комплексної обробки навігаційної інформації відбувається за допомогою вибору умови П1. Вихідні дані від датчиків первинної інформації для забезпечення рівних умов порівняння вибиралися однаковими. Управління виводом результатів імітаційного моделювання відбувається шляхом вибору умови УД. Перебіг процесів розрахунку навігаційної інформації відбувається в межах, означених у масиві умов проведення моделювання.

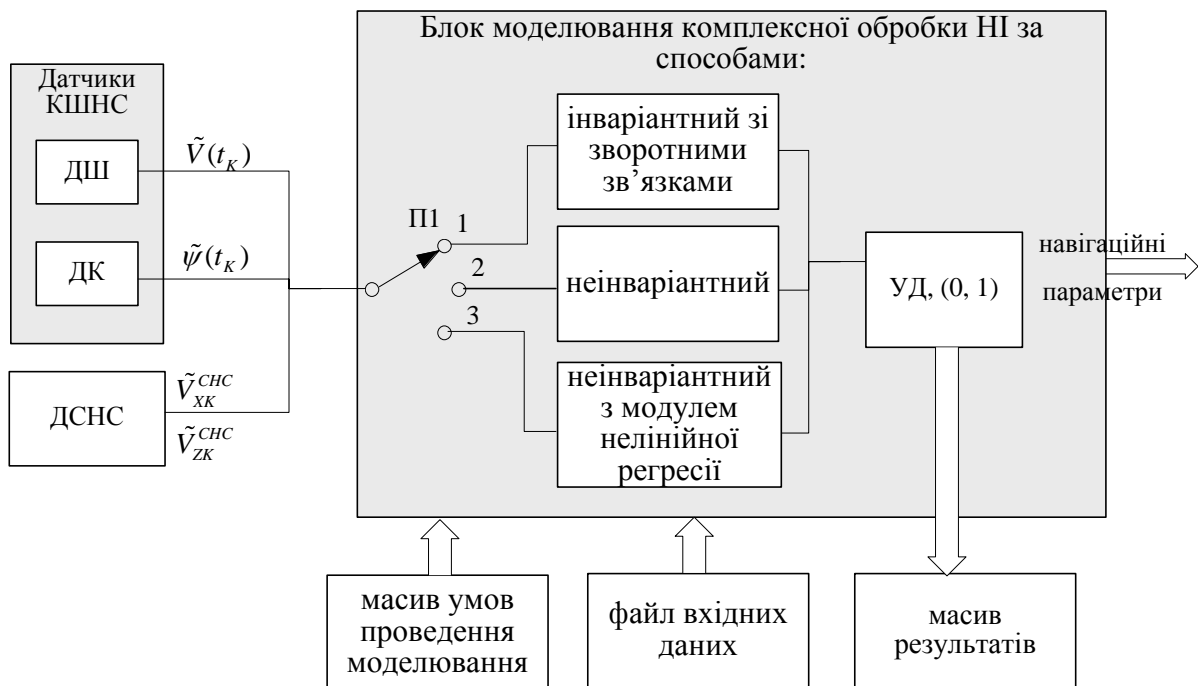


Рис. 4. Схема роботи блоку моделювання комплексної обробки навігаційної інформації.

Для моделювання роботи бортового НУК розроблена послідовність передачі інформації між окремими блоками комплексу та порядок уведення зворотних зв'язків (при необхідності) і врахування поправок (рис. 5).

У блоці моделювання фактичного руху виконується інтегрування рівнянь руху шасі по поверхні поля. При моделюванні вихідних сигналів навігаційних датчиків використовуються співвідношення (3), де випадкові похибки задавались з використанням процедури генерації розподілених по нормальному закону псевдовипадкових чисел.

При моделюванні прийнято, що вихідними сигналами ДСНС є величини $\tilde{X}(t), \tilde{Z}(t), \tilde{V}_x(t), \tilde{V}_z(t)$.

У блоці моделювання курсо-швидкісного числення координат реалізовувались рівняння (4).

У блоці моделювання комплексної обробки навігаційної інформації реалізовані наступні операції:

- формування спостережень виду (15) при наявності признаку включення ДСНС;

- перевірка умов нормальної роботи ДСНС і видача признаку відмови ДСНС при порушенні цих умов;

- екстраполяція оцінки вектору \bar{E}_K й коваріаційної матриці похибок оцінки P на один крок Δt ;

- корекції оцінки вектора \bar{E}_K й коваріаційної матриці P по спостереженням \bar{Y}_K відповідно до (15) при умові, що ДСНС включена і відмова в роботі ДСНС не виявлена;

унесення поправок у вихідну інформацію курсо-швидкісної підсистеми відповідно до (21) після кожного кроку Δt числення координат.

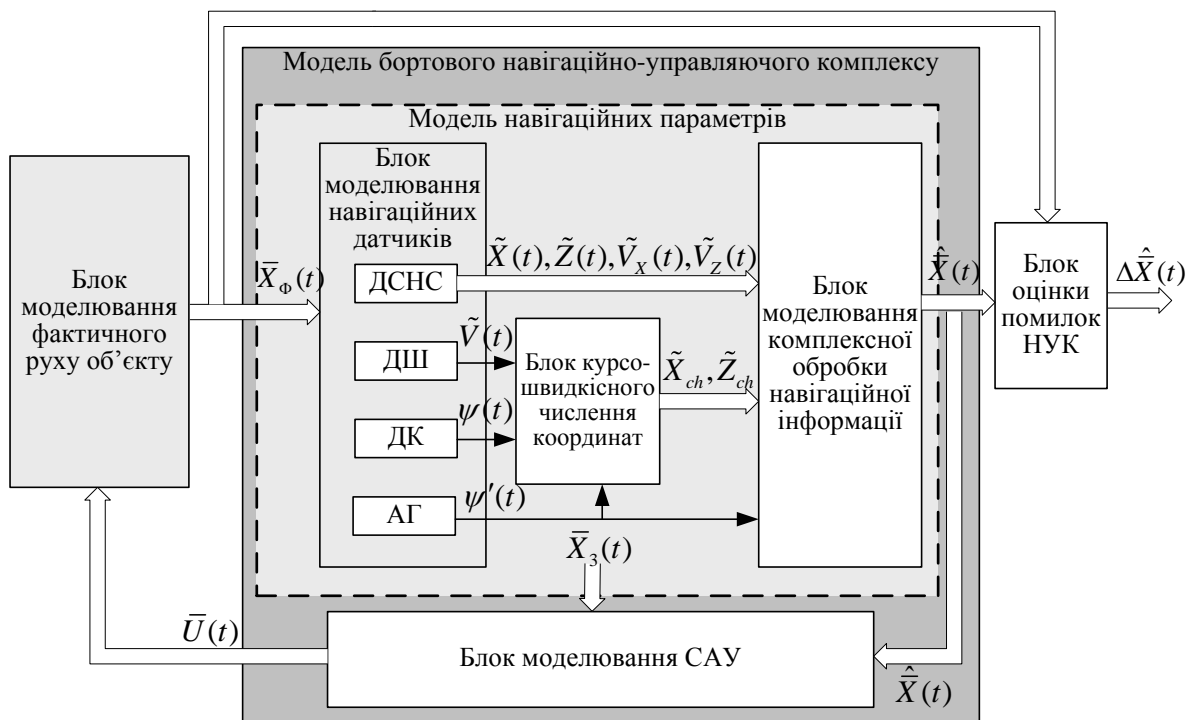


Рис. 5. Блок-схема імітаційного математичного моделювання роботи навігаційно-управляючого комплексу МТА.

У блоці оцінки похибок бортового інформаційно-управляючого комплексу розраховуються похибки у визначенні параметрів руху МТА і відхилень фактичних значень параметрів руху від необхідних значень, що відповідають заданій програмній траєкторії (маршруту).

Для з'ясування ефективності роботи й потенційних можливостей існуючих, а також запропонованого способів обробки навігаційної інформації розроблено комплексний пакет програмного забезпечення. Для випадку неінваріантної без процедури нелінійної регресії схеми комплексної обробки навігаційної інформації на першому етапі проводиться розрахунок вектору Q_γ . Якщо припиняється робота супутникової навігаційної системи, то ітераційна процедура нелінійної регресії відсутня.

У разі збоїв у роботі супутникової навігаційної системи відбувається перехід до кроків екстраполяції оцінки вектора стану \hat{Z}_K та коваріаційної матриці \bar{P}_K за формулою:

$$P_{K+1} = \Phi_K P_K \Phi_K^T + B_1 B_1^T + B_2 B_2^T. \quad (21)$$

Крок корекції \hat{E}_K^- та $P_K^{(-)}$ розраховується за формулами (20), (21).

На першому етапі виконання імітаційного моделювання проведена перевірка поведінки моделі й відповідності її основним передумовам експерименту при застосуванні неінваріантної без операцій нелінійної регресії схеми (варіант 2) функціонування навігаційно-управляючого комплексу. Задана швидкість руху МТА склала 7 м/с. На рис. 6 показано заданий маршрут з проміжними пунктами маршруту (ППМ), а також фактична траєкторія руху МТА.

Значні відхилення фактичної траєкторії руху від заданого маршруту легко простежити візуально, а при малих величинах відхилення необхідно проводити аналіз оцінок помилок навігаційних параметрів і оцінок поправок.

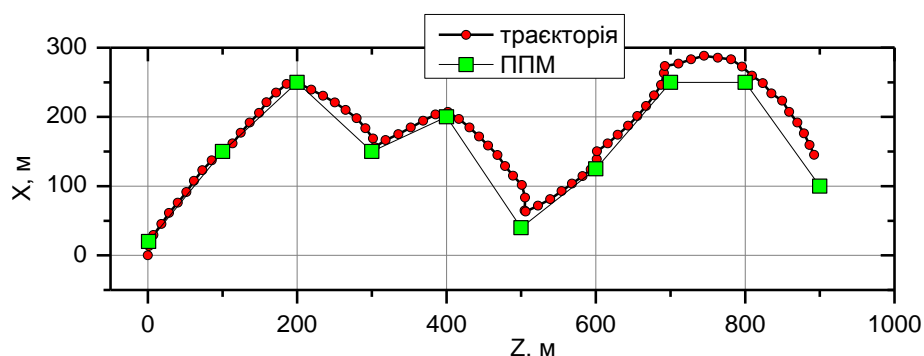


Рис. 6. Рух МТА при проходженні заданих ППМ для неінваріантної без операцій нелінійної регресії (варіант 2 функціонування НУК).

Далі проведено порівняння якості проходження заданої траєкторії руху в залежності від застосованого способу обробки

навігаційної інформації при дотриманні всіх інших умов виконання експерименту на фіксованому рівні. Зокрема, коефіцієнт підсилення b_{ψ_p} закону управління в каналі регулювання швидкості повороту керуючого колеса склав 0.9, задана швидкість руху – 4 м/с. Датчики курсо-швидкісної НС були взяті із завідомо низькими експлуатаційними показниками: фактична величина систематичної помилки масштабного коефіцієнту датчика швидкості склала $\delta_v = 0.02$, а зміщення показань датчика курсу -0.02 рад., середньоквадратичне значення випадкової складової похибок датчиків швидкості та курсу становили $\sigma_v = 0.03$ м/с, $\sigma_\psi = 0.02$ рад; середньоквадратичне значення випадкових похибок ДСНС по координатах та складовим швидкості склали $\sigma_{R_{снс}} = 2$ м., $\sigma_{V_{снс}} = 0.02$ м/с. Результати імітаційного експерименту показані на рис. 7 – 9.

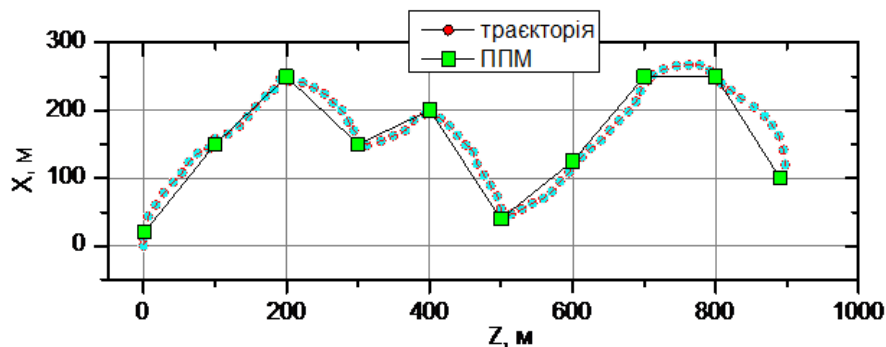


Рис. 7. Траєкторія руху МТА по заданому маршруту для схеми 1.

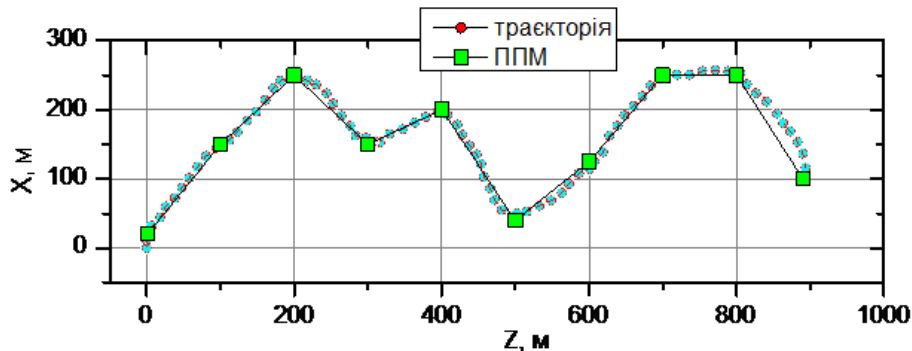


Рис. 8. Траєкторія руху МТА для схеми 2 функціонування НУК.

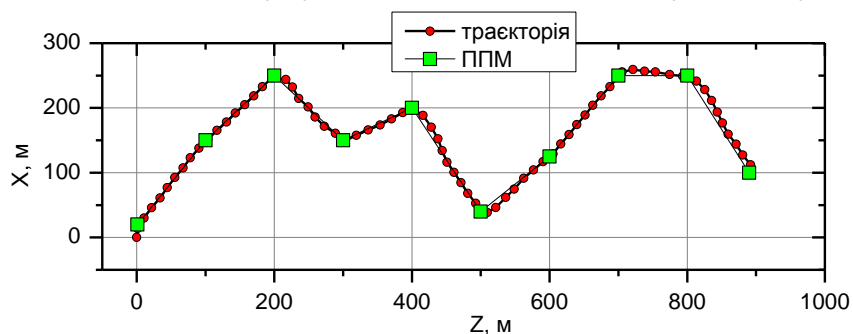


Рис. 9. Траєкторія руху МТА для схеми 3 функціонування НУК.

З наведених графіків видно, що якість проходження заданої траєкторії покращується по мірі переходу від інваріантної до неінваріантної та неінваріантної з модулем нелінійної регресії схемам комплексної обробки навігаційної інформації.

Як показано, сумісне використання КШНС та СНС дозволяє, з одного боку, обмежити зростання похибок КШНС і, з іншого боку, компенсувати шумову складову похибок СНС і, що важливо для надійної роботи НУК, підвищити темп видачі інформації бортовим споживачам. Розроблений програмний пакет моделювання роботи НУК дозволяє проаналізувати вплив періоду оновлення показань датчика координат СНС на процес навігації МТА. Нижче показані графіки траєкторії руху МТА для варіанту 3 функціонування НУК з частотою оновлення СНС – 1 Гц (рис. 10) та 10 Гц (рис. 11).

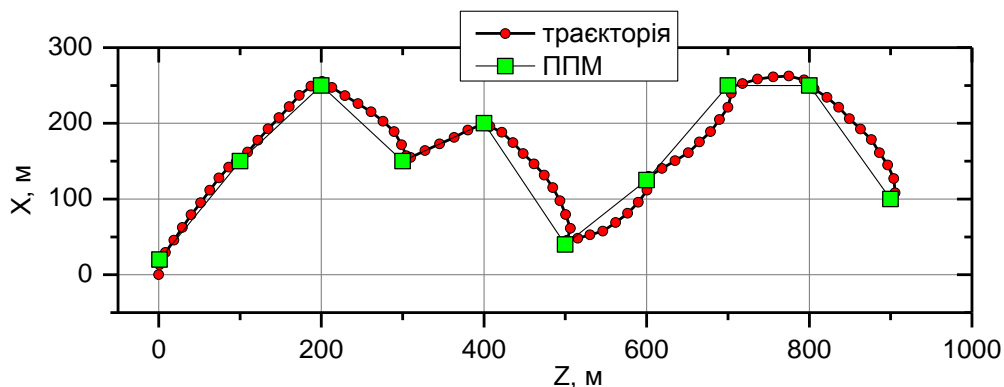


Рис. 10. Траєкторія руху МТА для схеми 3 функціонування НУК частота оновлення СНС – 1 гц (варіант 3).

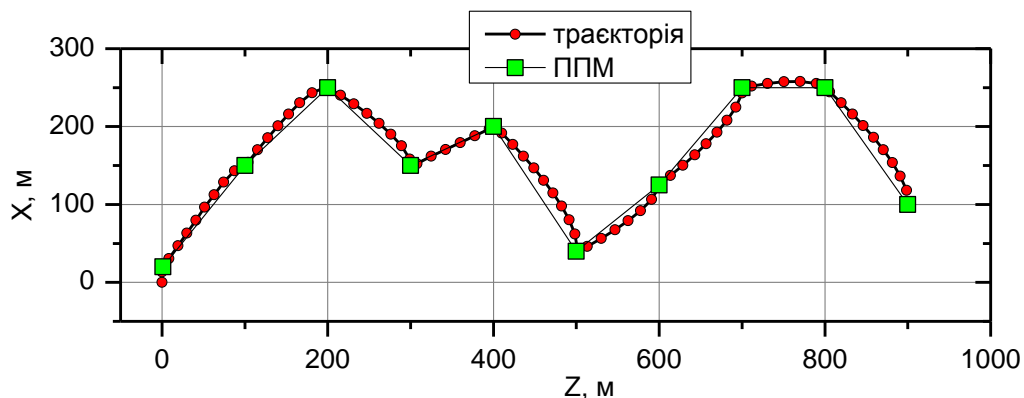


Рис. 11. Траєкторія руху МТА для схеми 3 функціонування НУК частота оновлення СНС – 10 гц (варіант 3).

Як бачимо, у випадку роботи СНС з видачею навігаційної інформації з частотою 10 Гц, МТА проходить заданий маршрут краще ніж для випадку 1 Гц. Деякі сучасні датчики координат СНС можуть вже сьогодні працювати з підвищеними частотами видачі

навігаційної інформації. Наприклад, система Outback S2 (Канада) у режимі e-Diff може видавати інформацію з частотою 5 та 10 Гц.

Проведено, також, порівняння якості проходження заданого маршруту в залежності від застосованого способу обробки навігаційної інформації для датчиків з покращеними показниками роботи: фактична систематична помилка масштабного коефіцієнту датчика швидкості $\delta_v = -0.01$, а зміщення показань датчика курсу - 0.01 рад., середньоквадратичне значення випадкової складової похибок датчиків швидкості та курсу становили $\sigma_v = 0.02$ м/с, $\sigma_\psi = 0.015$ рад; середньоквадратичне значення випадкових похибок ДСНС по координатах та складовим швидкості становили $\sigma_{R_{снс}} = 1$ м., $\sigma_{V_{снс}} = 0.01$ м/с. Результати проведення комп'ютерного експерименту для перших двох варіантів функціонування НУК показані на рис. 12 – 13.

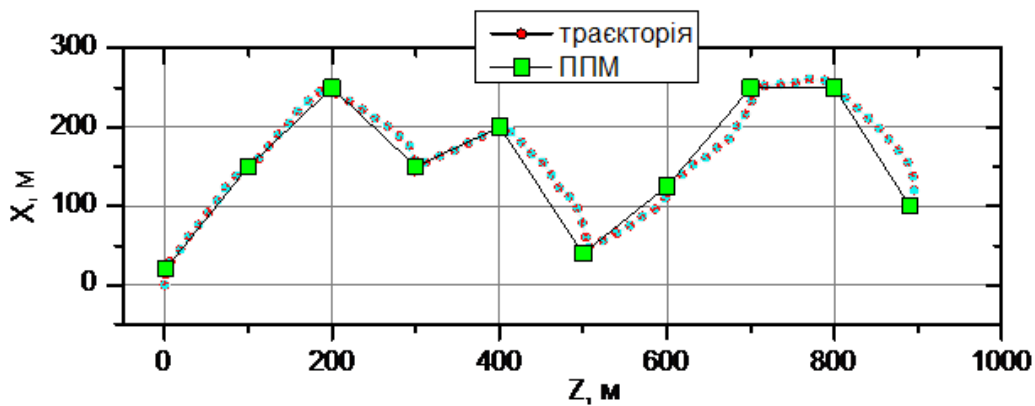


Рис. 12. Фактичний рух МТА по заданому маршруту (варіант 1).

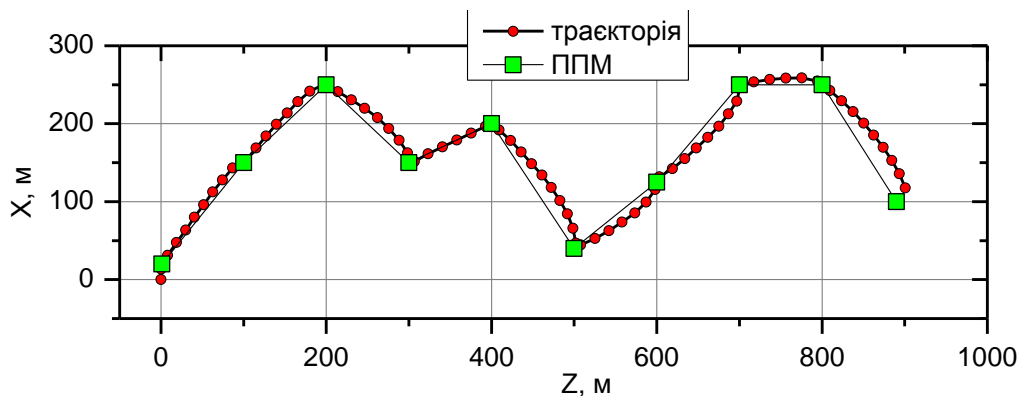


Рис. 13. Фактичний рух МТА по заданому маршруту (варіант 2).

Якість розрахунку навігаційної інформації, наприклад, для інваріантного зі зворотними зв'язками, неінваріантного без модуля нелінійної регресії та з модулем нелінійної регресії способів обробки навігаційної інформації, зручно оцінювати по величині збіжності

поправок до їхніх ідеальних значень та середньоквадратичній похибці оцінок налагодження поправок до показань датчиків.

Наприклад, зміни величини поправки до показань датчика швидкості для інваріантної (варіант 1), неінваріантної без операцій нелінійної регресії (варіант 2) та неінваріантної з нелінійною регресією (варіант 3) способів обробітку навігаційної інформації представлені на рис. 14.

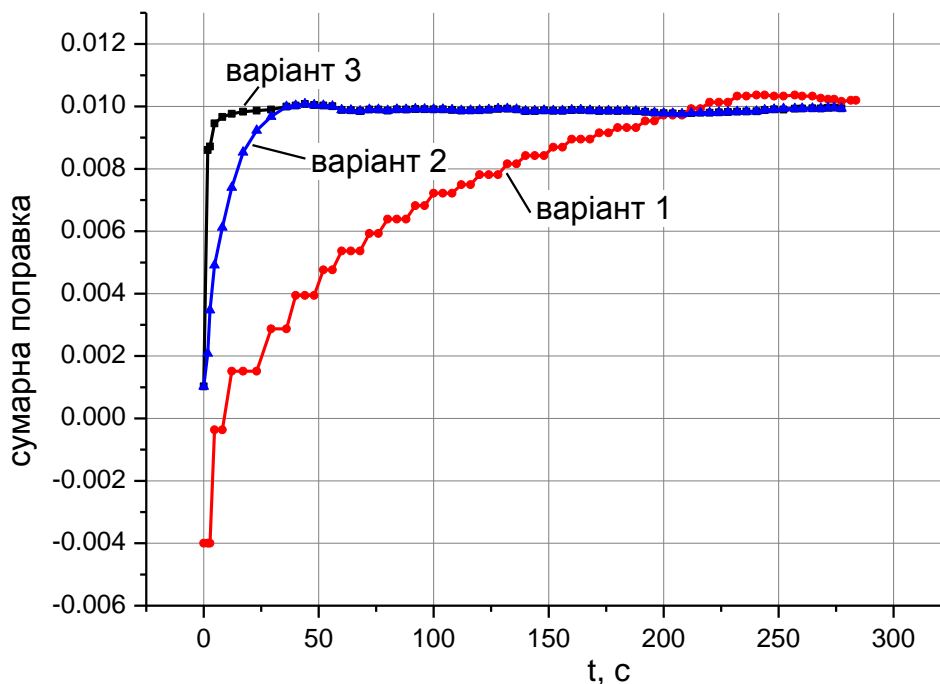


Рис. 14. Величини сумарної поправки до показань датчика швидкості для інваріантної (варіант 1), неінваріантної без операцій нелінійної регресії (варіант 2) та неінваріантної з нелінійною регресією способів обробітку навігаційної інформації.

Як бачимо, для інваріантного способу обробітку навігаційної інформації налагодження величини поправки відбувається дуже повільно, для неінваріантного без операцій нелінійної регресії способу налагодження цієї поправки (для компенсації систематичної помилки датчика швидкості $\delta_v = -0.01$) відбувається близько за 30, а для неінваріантної з нелінійною регресією – за 12 секунд.

Проходження заданого маршруту при використанні неінваріантного з модулем нелінійної регресії способу комплексної обробки навігаційної інформації представлено на рис. 15.

Величина середньоквадратичного відхилення координат фактичної траєкторії руху МТА від заданої для схем 1, 2 та 3 склала відповідно 3.6, 2.9 та 0.25 м, що знов таки свідчить про переваги неінваріантного з модулем нелінійної регресії способу комплексної обробки навігаційної інформації.

Представлена методика імітаційного моделювання процесів навігації та управління рухом МТА може бути використана для розробки безпілотних польових машин і МТА при застосуванні технологій точного землеробства.

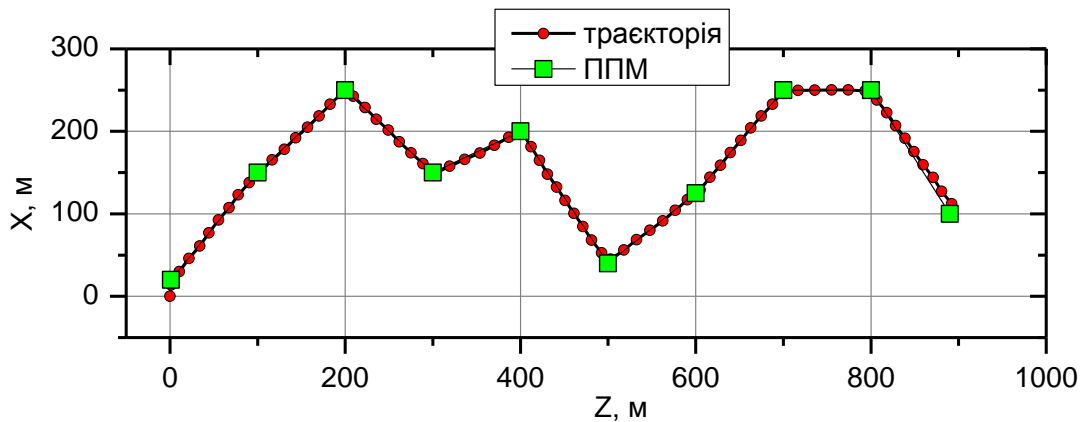


Рис. 15. Траєкторія руху МТА по заданому маршруту (варіант 3).

Висновок. Таким чином, можна засвідчити, що запропонована неінваріантна компенсаційна схема обробки навігаційної інформації може бути застосована для траєкторного управління МТА при наявності бортових інтегрованих навігаційних комплексів на базі супутникової та курсо-швидкісної підсистем. Причому, у цьому випадку можливо застосовувати датчики з невисокими показниками точності без погіршення показників точності роботи комплексу в цілому, що важливо для мобільних об'єктів сільськогосподарського призначення.

Список літератури

1. *Ricket T.D.* Future navigation Needs in Agriculture. Proceeding of The 60-th Annual Meeting of Institute of Navigation / *Ricket T.D., Ams J.D.* // USA, Ohio 7-9 June, 2004. – P. 204.
2. *Соловьев Ю.А.* Спутниковая навигация и ее приложения / *Ю.А. Соловьев.* – М.: ЭКОТRENД, 2003. – 21 с.
3. *Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации: Сб. статей и докл. / Сост. О.А. Степанов / Под общ. ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова, НИИ «Электроприбор», 2001. – С. 21.*
4. *Степанов О.А.* Интегрированные системы навигации / *О.А. Степанов // Гироскопия и навигация. – 2002. – № 1. – С. 23–45.*
5. *Аніскевич Л.В.* Спосіб комплексної обробки навігаційної інформації / *Аніскевич Л.В., Войтюк Д.Г., Захарін Ф.М.* Пат. на корисну модель України № 69393. Опубл. у бюл. № 8 від 25.04.2012.
6. *Липцер Р.Ш.* Статистика случайных процессов. Нелинейная фильтрация и смежные вопросы / *Р.Ш. Липцер.* – М.: Наука, 1974. – 696 с.

Предложена неинвариантная компенсационная с модулем нелинейной регрессии методика обработки навигационной информации при управлении движением МТА по заданной траектории, которая может быть применена для

интегрированных комплексов на базе спутниковой и курсо-скоростной навигационных подсистем с использованием датчиков с невысокими показателями точности без ухудшения показателей точности работы комплекса в целом. Разработана методика имитационного моделирования процессов навигации и управления движением МТА.

Полевая машина, навигационный комплекс, итерационный алгоритм, нелинейная регрессия, коррекция и экстраполяция оценок координат.

The invariant compensative with module of nonlinear regression method of treatment of navigation information at traffic of MTA control on set trajectory which can be applied for computer-integrated complexes on base of satellite and head-speeding navigation subsystems with use of sensors with low indexes of exactness without worsening of indexes of exactness of work of complex in whole is offered. The method of imitation design of processes of navigation and traffic of MTA control is developed.

Field mashine, navigating complex, iterative algorithm, nonlinear regression, correction and extrapolation of estimations of co-ordinates.

УДК 631:372

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ЧАСТИНКИ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ В ПОВІТРЯНОМУ ПОТОЦІ ПНЕВМАТИЧНОГО ВИСІВНОГО АПАРАТУ

І.М. Сівак, кандидат технічних наук

Досліджено рух частинок мінеральних добрив в транспортуючому трубопроводі пневматичного висівного апарату розподільника, який використовується в технологіях точного землеробства.

Добриво, частинка, висівний апарат, точне землеробство.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку технологій керованого землеробства, реалізацію внесення технологічних матеріалів доцільно проводити з використанням машин із пневматичними висівними апаратами. Такі машини мають сталу ширину захвату, високу рівномірність внесення технологічного матеріалу, порівняно з іншими розподільниками. На процес

© І.М. Сівак, 2012