

УДК 621.3.078.001

АЛЕКСАНДРОВ Є.Є., д.т.н., проф., НТУ «ХП»
ЄВТУШЕНКО К.С., НТУ «ХП»
КОНОНЕНКО В.О., НТУ «ХП»

КОМПЛЕКСОВАНА НАВІГАЦІЙНА СИСТЕМА ВСЮДИХІДНОГО АВТОМОБІЛЯ

Рассматривается принцип работы и алгоритмы комплексированной навигационной системы вездеходного автомобиля, представляющей собой объединение автономной и спутниковой навигационных систем.

Вступ. Автомобілі спеціального призначення обладнені навігаційними системами, під якими розуміють сукупність приладів, які встановлені на автомобілі і визначають його місцезнаходження на земній поверхні і напрямок руху. В цьому полягає основна задача навігаційної системи.

Розрізняють два типа навігаційних систем: автономні навігаційні системи (АНС) та супутникові навігаційні системи (СНС). АНС для цілей навігації використовує первинні давачі інформації, які розташовані на об'єкті. Давачами первинної інформації СНС є навігаційні супутники, а на автомобілі встановлена апаратура споживача СНС.

Кожна з систем має свої позитивні якості та недоліки. Комплексована навігаційна система (КНС) одночасно використовує АНС та СНС, що дозволяє виключити недоліки окремих систем і підвищити надійність та ефективність навігаційного забезпечення автомобіля.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Перші АНС автомобілів спеціального призначення були оснащені давачами швидкості, гіроскопічним давачем кута та бортовим обчислювачем [1]. Визначення поточних координат $X(t)$, $Y(t)$ об'єкта відбувалось за формулами:

$$X(t) = X_0 + \int_0^t V(t) \cos \alpha(t) dt; \tag{1}$$

$$Y(t) = Y_0 + \int_0^t V(t) \sin \alpha(t) dt.$$

Перші зразки АНС відповідно до формул (1) виміряли швидкість руху автомобіля $V(t)$, дирекційний кут $\alpha(t)$, обчислювали косинус і синус дирекційного кута та шляхом інтегрування обчислювали координати $X(t)$ та $Y(t)$. Початкову інформацію X_0 Y_0 α_0 задавав водій відповідно до якогось орієнтиру, що знаходився у точці 0 (рисунок 1). У подальшому система працювала автономно до зустрічі з наступним орієнтиром у точці 1. Але часто відстань між орієнтиром у точках 0 і 1 може бути досить значна, а накопичувана похибка може бути такою, що автомобіль взагалі не вийде на наступний орієнтир. Крім того, недоліком такого засобу корекції являється необхідність жорсткої прив'язки руху об'єкта до відомих контрольних точок,

які можуть бути зміщені під час бойових дій, можуть бути закриті пилом, туманом, димом, снігом.

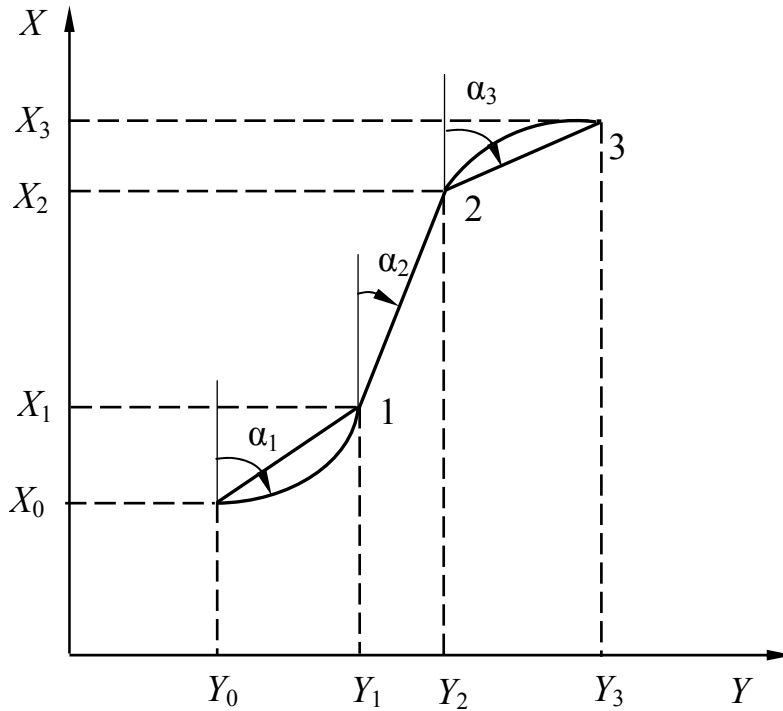


Рисунок 1 – Визначення координат рухомого об'єкту

Функціонально-логічна схема такої АНС показана на рисунку 2.

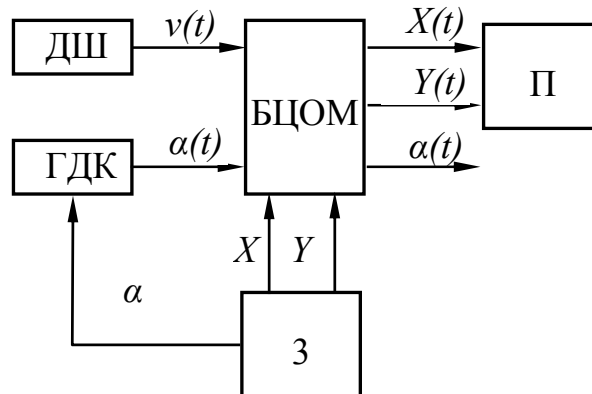


Рисунок 2 – Функціонально-логічна схема розв'язання основної навігаційної задачі: ДШ – давач швидкості;

ГДК – гіроскопічний давач кута; БЦОМ – бортова цифрова обчислювальна машина; П – планшет; 3 – задатчик

В 80-90 роках минулого сторіччя були розроблені та впроваджені СНС GPS (США) та ГЛОНАСС (Росія) [2], [3], [4], на базі яких були створені КНС, до складу яких входила АНС, збудована з допомогою вимірювальних приладів зазначених вище [5], [6]. Розробка та впровадження в виробництво мало розмірних, досить точних

лазерних та оптоволоконних гіроскопів [7], акселерометрів дозволило збудувати АНС на принципах безплатформеної інерціальної навігаційної системи (БІНС) [6], [8], що значно підвищило точність навігаційних визначень як в автономному, так і в комплексному режимах.

Формулювання мети. Розробка метода комплексірування навігаційної інформації, коли до складу АНС входить БІНС.

Алгоритми розв’язання основної навігаційної задачі автономною навігаційною системою.

Набільш ефективними є комплектовані навігаційні системи транспортних засобів, які поєднують у собі автономні і супутникові навігаційні системи. Структурна схема комплексованої навігаційної системи наведена на рисунку 3.

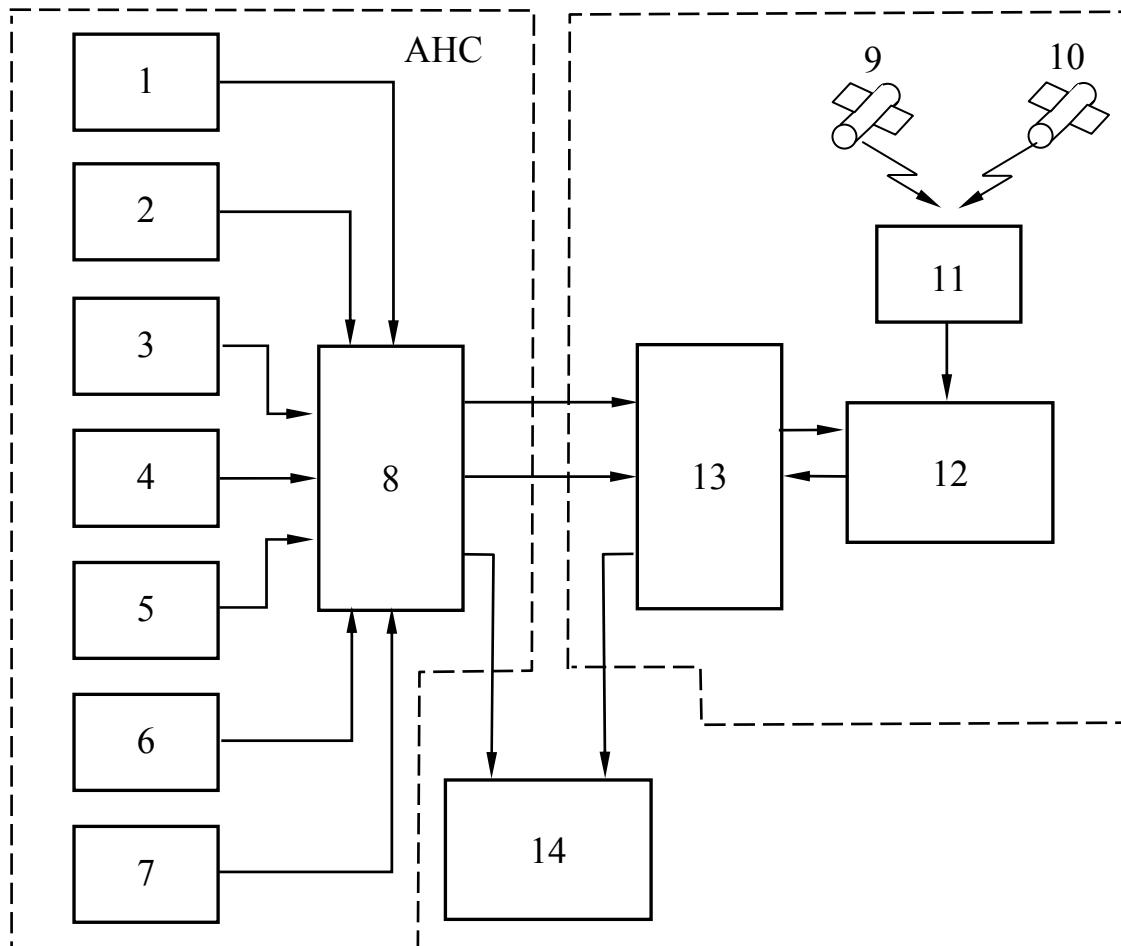


Рисунок 3 – Структурна схема ННС: 1,2,3 – давачі кутових швидкостей; 4,5,6 – акселерометри; 7 – давач швидкості; 8 – бортовий обчислювач АНС; 9,10 – навігаційні супутники; 11 – антена; 12 – апаратура споживача СНС; 13 – бортовий обчислювач СНС; 14 – пристрій візуалізації

У бортовому обчислювачі за сигналами від трьох давачів кутової швидкості 1, 2 і 3, які розташовані відносно трьох власних центральних осей інерції підресореної частини автомобіля, обчислюється кутова орієнтація автомобіля. Алгоритм обчислення кутової орієнтації має такий вигляд [8]:

$$\begin{aligned}
 \lambda_0[(n+1)T_a] &= \lambda_0[nT_a] - \frac{T_a}{2} \{ \omega_{xc}[nT_a] \lambda_1[nT_a] + \\
 &+ \omega_{yc}[nT_a] \lambda_2[nT_a] + \omega_{zc}[nT_a] \lambda_3[nT_a] \}; \\
 \lambda_1[(n+1)T_a] &= \lambda_1[nT_a] + \frac{T_a}{2} \{ \omega_{xc}[nT_a] \lambda_0[nT_a] + \\
 &+ \omega_{zc}[nT_a] \lambda_2[nT_a] - \omega_{yc}[nT_a] \lambda_3[nT_a] \}; \\
 \lambda_2[(n+1)T_a] &= \lambda_2[nT_a] + \frac{T_a}{2} \{ \omega_{yc}[nT_a] \lambda_0[nT_a] + \\
 &+ \omega_{xc}[nT_a] \lambda_3[nT_a] - \omega_{zc}[nT_a] \lambda_1[nT_a] \}; \\
 \lambda_3[(n+1)T_a] &= \lambda_3[nT_a] + \frac{T_a}{2} \{ \omega_{zc}[nT_a] \lambda_0[nT_a] + \\
 &+ \omega_{yc}[nT_a] \lambda_1[nT_a] - \omega_{xc}[nT_a] \lambda_2[nT_a] \};
 \end{aligned} \tag{2}$$

де T_a – період дискретної АНС; $\omega_{xc}[nT_a], \omega_{yc}[nT_a], \omega_{zc}[nT_a]$, – решітчасті функції, що відповідають вихідним сигналам давачів 1, 2, 3; $\lambda_0[nT_a], \lambda_1[nT_a], \lambda_2[nT_a], \lambda_3[nT_a]$, – решітчасті функції, що відповідають параметрам Родріга-Гамільтона, які задовольняють умові

$$\lambda_0^2[nT_a] + \lambda_1^2[nT_a] + \lambda_2^2[nT_a] + \lambda_3^2[nT_a] = 1$$

і визначають орієнтацію автомобіля.

З виходів акселерометрів 4, 5 і 6 до бортового обчислювача подаються решітчасті функції $\Delta V_{cx}[nT_a], \Delta V_{cy}[nT_a]$ і $\Delta V_{cz}[nT_a]$, що відповідають проекціям швидкості руху автомобіля на головні центральні вісі інерції підресореної частини, а також решітчаста функція $V_0[nT_a]$, що відповідає швидкості руху автомобіля відносно поздовжньої осі X . Обчислювальний пристрій 8 обчислює проекції миттєвої швидкості автомобіля на осі X і Y за таким алгоритмом [8]:

$$V_y[nT_a] = 2 \{ -\lambda_0[nT_a] \lambda_3[nT_a] + \lambda_2[nT_a] \lambda_1[nT_a] \} V_{cx}[nT_a] +$$

$$\begin{aligned}
 & + \{ \lambda_0^2[nT_a] + \lambda_2^2[nT_a] - \lambda_3^2[nT_a] - \lambda_1^2[nT_a] \} \Delta V_{cy}[nT_a] + \\
 & + 2 \{ \lambda_0[nT_a] \lambda_1[nT_a] + \lambda_2[nT_a] \lambda_3[nT_a] \} \Delta V_{cz}[nT_a]; \\
 V_x[nT_a] = & \{ \lambda_0^2[nT_a] + \lambda_1^2[nT_a] - \lambda_2^2[nT_a] - \lambda_3^2[nT_a] \} V_{cx}[nT_a] + \\
 & + 2 \{ \lambda_0[nT_a] \lambda_3[nT_a] + \lambda_1[nT_a] \lambda_2[nT_a] \} \Delta V_{cy}[nT_a] + \\
 & + 2 \{ -\lambda_0[nT_a] \lambda_2[nT_a] + \lambda_1[nT_a] \lambda_3[nT_a] \} \Delta V_{cz}[nT_a].
 \end{aligned} \tag{3}$$

У (3) прийнято позначення

$$V_{cx}[nT_a] = V_{0x}[nT_a] + \Delta V_{cx}[nT_a].$$

Місцезнаходження транспортного засобу за допомогою АНС обчислюється за формулами

$$\begin{aligned}
 X[nT_a] &= X[(n-1)T_a] + \frac{T_a}{2} (V_x[nT_a] + V_x[(n-1)T_a]); \\
 Y[nT_a] &= Y[(n-1)T_a] + \frac{T_a}{2} (V_y[nT_a] + V_y[(n-1)T_a]).
 \end{aligned} \tag{4}$$

Якщо $t = 0$, то

$$\begin{aligned}
 X[(n-1)T_a] &= X_0; \quad Y[(n-1)T_a] = Y_0; \quad V_{cx}[nT_a] = \\
 &= V_{cx}[(n-1)T_a] = V_0,
 \end{aligned}$$

де X_0, Y_0, V_0 – початкові установки, задані водієм, або отримані від апаратури споживачів СНС.

Тоді формули (1) можуть бути записані у дискретному вигляді

$$\begin{aligned}
 X[nT_a] &= X_0 + \frac{T_a}{2} \sum_{i=1}^n (V_x[iT_a] + V_x[(i-1)T_a]), \\
 Y[nT_a] &= Y_0 + \frac{T_a}{2} \sum_{i=1}^n (V_y[iT_a] + V_y[(i-1)T_a]).
 \end{aligned}$$

Алгоритм (2), (3), (4), що реалізується бортовим обчислювачем 8, дозволяє уникнути використання коштовних гіроскопічних давачів кута, гіроплатформ і використовувати лише гіроскопічні здавачі кутових швидкостей і акселерометри, які складають БНС.

Застосування супутникової навігаційної системи для корекції розв’язання основної навігаційної задачі.

Супутникові навігаційні системи визначають навігаційні параметри за допомогою навігаційних супутників, радіопередавачі яких безперервно випромінюють сигнали у напрямку Землі. Ці сигнали приймаються антеною 11 апаратури споживача СНС 12, що встановлена на рухомому об’єкті, координати якого необхідно визначити.

У навколосемному просторі розгорнута мережа навігаційних супутників у кількості 26 одиниць (21 – основних і 5 – запасних), які обертаються на 6 орбітах з періодом 11 годин 58 хвилин. На борту кожного супутника розміщені:

- приймально-передавальна апаратура;
- сонячні батареї;
- двигуни корекції орбіти;
- бортові обчислювачі.

В апаратурі споживачів (приймачі) СНС вимірюється час розповсюдження сигналу від супутників і обчислюється віддаль «супутник-приймач».

Оскільки для визначення положення точки необхідно знати три координати, то у приймачі повинні бути виміри віддалі до трьох різних супутників.

На практиці у вимірюваннях часу завжди присутня помилка, яка обумовлена незбігом шкал часу супутника і приймача. Для визначення поправки годинника приймача необхідно виконати вимірювання віддалень до чотирьох супутників. Таким чином, для виконання необхідних навігаційних визначень необхідно забезпечити постійну видимість як мінімум чотирьох навігаційних супутників (рис 4). Точність визначення місцезнаходження об’єкта тим вище, чим більше об’єм фігури $OC_1C_2C_3C_4$, який залежить від висоти орбіти кожного супутника, кількості супутників і відстані супутників один від одного. Звичайно в будь-якій точці земної поверхні в будь-який момент часу спостерігаються від 5 до 12 супутників.

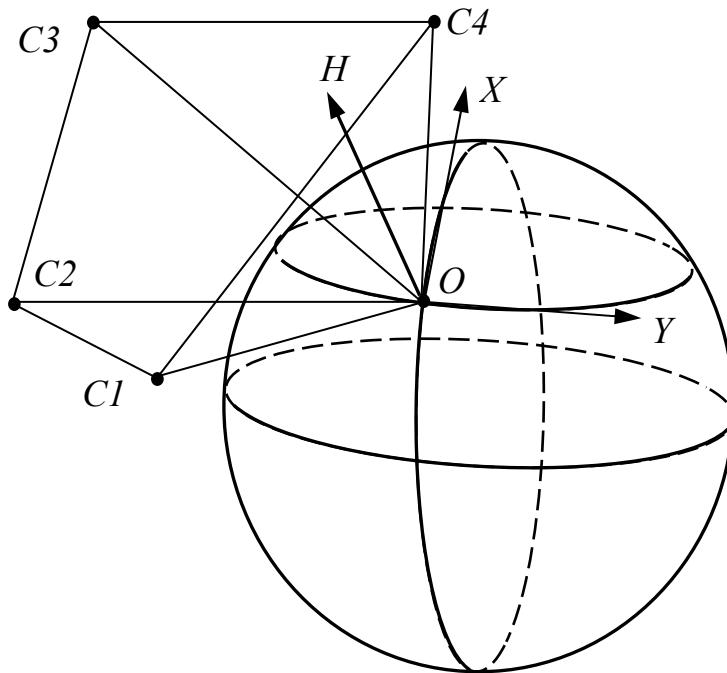


Рисунок 4 – До принципу роботи СНС

Якщо період дискретності АНС знаходиться в межах $0,02 \text{ с} \leq T_a \leq 0,05 \text{ с}$, то період дискретності СНС знаходиться в межах $1 \leq T_c \leq 10 \text{ с}$.

Апаратура споживачів СНС обчислює координати об'єкта на місцевості $X[mT_c], Y[mT_c]$, а також прогноз середньоквадратичної похибки (СКП) вимірюваних лінійних координат об'єкта $G[mT_c]$.

Якщо згладжена фільтром величина СКП $G_f[mT_c]$ менше заданої $G_{зад}$, тобто

$$G_f[mT_c] < G_{зад}, \quad (5)$$

то обчисленим в АНС координатам $X[nT_a], Y[nT_a]$ з періодом T_c присвоюються значення координат, які знаходять від апаратури СНС:

$$X[nT_a] = X[mT_c],$$

$$Y[nT_a] = Y[mT_c],$$

якщо $n \cdot N = m$, де $N = \frac{T_c}{T_a}$.

Якщо прогнозована величина СКП $G_f[mT_a] > G_{зад}$, то система комплексування навігаційної інформації переходить у автономний режим навігації до моменту, коли знову виконається нерівність (5).

Описаний алгоритм функціонування інтегрованої навігаційної системи на прикладі координати $X[nT_a]$ пояснюється рисунком 5.

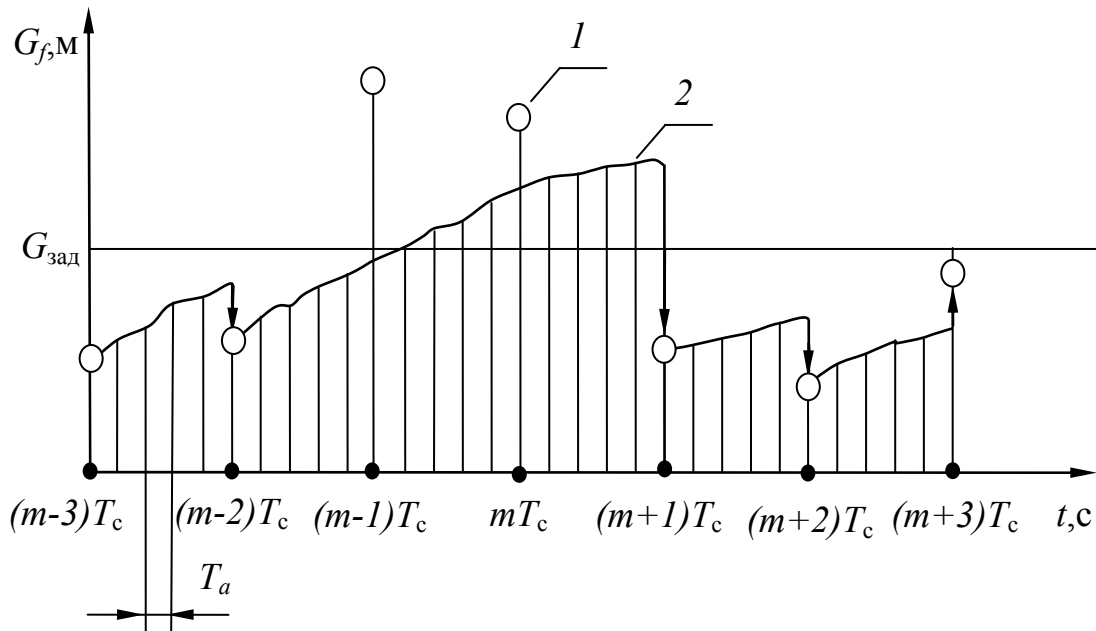


Рисунок 5 – Зміна координати $X[nT_a]$ в режимі комплексування навігаційної інформації. 1 – $G_f[mT_c]$; 2 – $X[nT_a]$

Висновки

– АНС у свій більшості не в змозі забезпечити з необхідною точністю розв'язання основної навігаційної задачі внаслідок накопиченню похибки визначення координат і курсу автомобіля з часом;

– СНС забезпечують високу точність навігаційного забезпечення автомобіля, але стають непрацездатними в умовах затінення сигналів супутників і в умовах зриву зв'язку із супутниками;

– одночасне використання АНС і СНС дозволяє виключити недоліки окремих систем і підвищити надійність та ефективність навігаційного забезпечення автомобіля.

Список літератури: 1. *Корнеев В.В.* Основы автоматизации и танковые автоматические системы. – М.: АБТВ, 1976.–546с. 2. *Харисов В.Н., Петров А.И., Болдин В.А.* Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС.–М.: ИПРЖР, 1999.–85с. 3. Аппаратура радионавигационная глобальной навигационной спутниковой системы и глобальной системы позиционирования.–М.: ГОСТ Р 51794–2001. 4. *Марков С.* Принципы использования GPS. – Киев: КНУСА, [http://www.geomatica.Kiev/ua/training/Data Capture/GPS/Chapter 100.html](http://www.geomatica.Kiev.ua/training/Data Capture/GPS/Chapter 100.html). 5. *Збруцький О.В., Богун Ю.В.* Навігація наземного об'єкта за допомогою інтегрованої системи // Космічна наука і технологія. – 2001. – №1. – С.45-50. 6. *O.J. Woodman.* An introduction to inertial navigation.-United Kingdom: Technical Report, Univ. of Cambridge.-2007.-№696. 7. *Голяев Ю., Исаев А., Колбас Ю.* Гирокомпас на основе лазерного гироскопа с магнитооптическим управлением // Электроника: Наука, Технология, Бизнес.– 2006.–№8.–С.66. 8. *Бранец В.Н., Шмыглевский И.П.* Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. – М.: Наука, 1973. – 320с. 9. *Кононенко В.А.* Разработка алгоритмов интегрированной навигационной системы вездеходной колесной машины //Механіка та машинобудування. – 2007.– №1. – С.107-112.