

## **АЛГОРИТМ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ КОМПЛЕКСУВАННЯ БЕЗПЛАТФОРМОВОЇ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ**

### **Вступ**

Безплатформова система орієнтації (БСО) є важливим елементом безпілотного літального апарату (БПЛА), оскільки від її точності та стабільності напряму залежить робота БПЛА.

Існуючі інформаційно-вимірювальні системи орієнтації (ІВСО) мікро- та міні- аеродинамічних схем БПЛА не забезпечують вимоги або по точності, або по масогабаритним характеристикам. Невиконання вимогам по масогабаритним характеристикам пояснюється застосуванням точних датчиків, які мають велику масу та габарити. Таким чином, необхідна розробка ІВСО на базі датчиків низької точності, які мають малу масу, габарити та вартість, що в свою чергу сприяє здешевленню ІВСО і наближує їх до вартості БПЛА, на яких вони використовуються. В цьому разі точність такої системи повинна бути не більше за 1-3 градусів по кутам курсу, тангажа і крену[2-4].

Для забезпечення вимог по масогабаритним характеристикам доцільно використовувати мікромеханічні прилади.

Існуючі способи підвищення точності за рахунок комплексування інформації різних ІВСО обмежені в області використання або забезпечують лише часткове підвищення точності (інваріанті схеми комплексування), у зв'язку з цим задача розробки нових способів підвищення точності ІВСО є актуальною.

### **Постановка задачі**

Задачею представленої роботи є розробка алгоритму неінваріантної схеми комплексування на базі мікромеханічних датчиків для підвищення точності інформаційно-вимірювальної системи орієнтації рухомих об'єктів.

### **Аналіз схем комплексування ІВСО**

Комплексування інформаційно-вимірювальної системи на базі датчиків кутової швидкості (ДКШ) з блоком акселерометрів дозволяє зробити висновок лише про кути відхилення об'єкту від лінії місцевої вертикалі (кути тангажа та крену), однак необхідно також визначати кут курсу об'єкта.

Джерелом такої інформації може служити магнітне поле Землі, параметри якого досліджені та з великим степенем точності відомі та можуть бути виміряні безпосередньо на рухомому об'єкті за допомогою датчиків магнітного поля – магнітометрів. Застосування магнітометрів доцільно з точки зору того, що вони зберігають автономність системи.

Окреме використання магнітометрів, у свою чергу, не дозволяє повністю визначити кутове положення об'єкту відносно нормальної системи координат. Це пояснюється тим, що одним й тим самим проекціям вектора напруженості магнітного поля Землі (ВНМПЗ) у зв'язаній системі координат можна зіставити різноманітні кутові орієнтації об'єкту, які можуть бути отримані шляхом повороту об'єкта уздовж ВНМПЗ, утворюючи «конус невизначеності» [1] (рис. 1).

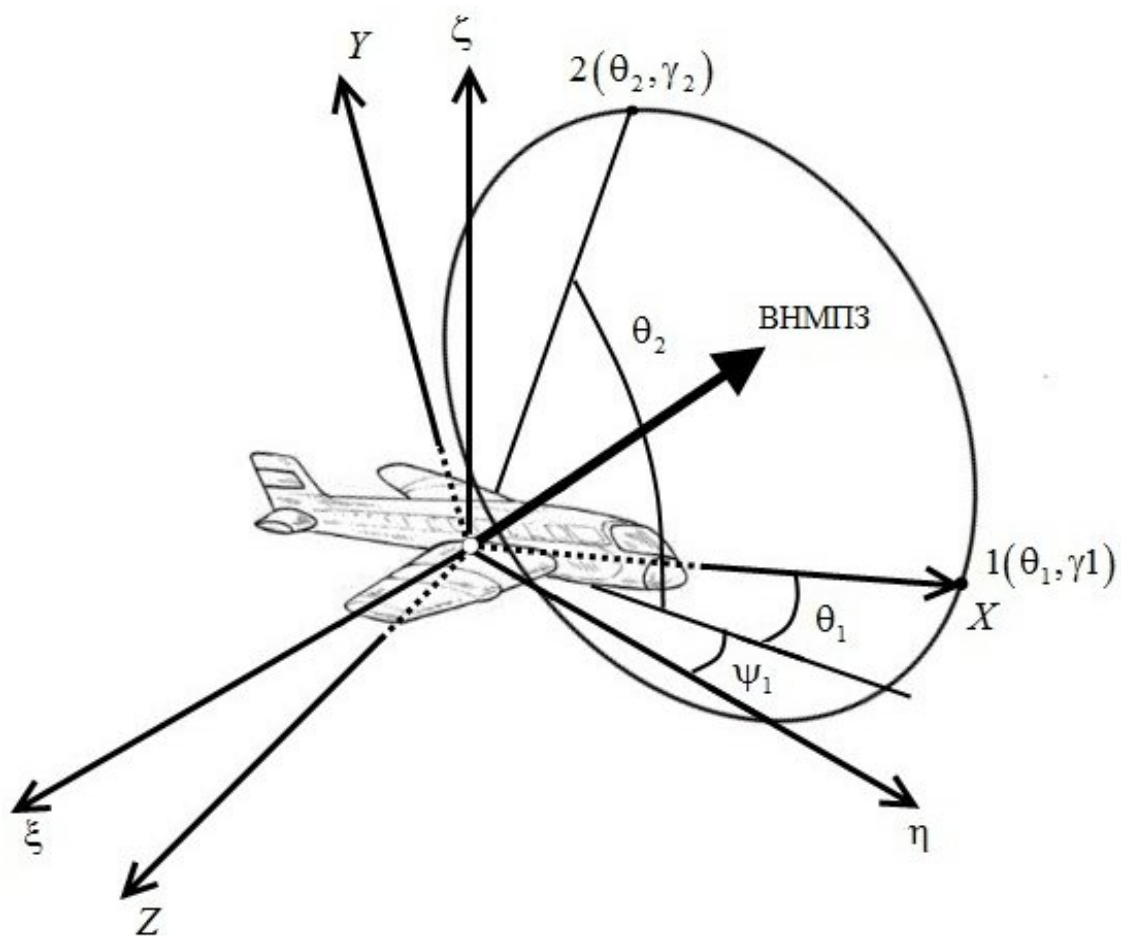


Рис. 1. Орієнтація об'єкту відносно ВНМПЗ:  $\eta\zeta\xi$  - географічна система координат,  $XYZ$  - зв'язана система координат

Дана невизначеність може бути усунена шляхом залучення додаткової інформації. Наприклад, про кути тангажа та крену об'єкта, які виробляє БСО на базі ДУС, комплектована з блоком акселерометрів. При залученні додаткової інформації, наприклад про кут курсу або тангажа, «конус невизначеності» вироджується у дві точки, наприклад курсу  $\psi_1$

відповідають значення тангажа  $\theta_1, \theta_2$  та відповідні їм значення крену  $\gamma_1$  та  $\gamma_2$  (рис. 1).

За відомими кутами тангажа та крену і показаннями магнітних датчиків кут курсу може бути обчислений за виразом [2-4]:

$$\psi = \begin{cases} \arctg\left(\frac{Z_\Gamma}{X_\Gamma}\right), \text{ при } X_\Gamma > 0 \\ \arctg\left(\frac{Z_\Gamma}{X_\Gamma}\right) - \pi, \text{ при } X_\Gamma > 0 \wedge Z_\Gamma < 0 \\ \arctg\left(\frac{Z_\Gamma}{X_\Gamma}\right), \text{ при } X_\Gamma < 0 \wedge Z_\Gamma > 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $X_\Gamma, Z_\Gamma$  – визначаються виразами:

$$\begin{matrix} \square \end{matrix} \quad (2)$$

де  $X, Z, Y$  - проекції ВНМПЗ на осі зв'язаної системи координат.

З метою зменшення обчислювального навантаження вираз (2) запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} Z_\Gamma &= Z \cdot g_y + Y \cdot g_z, \\ X_\Gamma &= X - g_x (X \cdot g_x + Y \cdot g_y - Z \cdot g_z). \end{aligned} \quad (3)$$

### **Підвищення точності каналу магнітометрів за допомогою використання дискретного фільтру Калмана**

Використання магнітометрів ускладнюється тим, що в більшості випадків на об'єкті створюється власне магнітне поле, яке впливає на магнітометри. Це викликає похибку при вимірюванні магнітного поля Землі.

Дана похибка може бути компенсована в процесі руху об'єкта на основі інформації, вироблюваної ДКШ на основі теорії оптимальної фільтрації.

Структурна схема пропонованої системи показана на рис. 2.

Сформулюємо задачу оцінювання проекцій ВНМПЗ на осі зв'язаної системи координат на фоні постійної систематичної похибки, зумовленої власним магнітним полем об'єкта і шумовою складовою у вихідному сигналі тривісного блока магнітометрів і тривісного блока датчиків кутової

швидкості, осі чутливості яких орієнтовані вздовж зв'язаної системи координат, використовуючи теорію оптимальної фільтрації[5]. Показання ДКШ будемо використовувати для формування матриці прогнозу.

Інформація, що виробляється трьохканальним блоком магнітометрів містить, як проекції ВНМПЗ на осі чутливості датчиків, так і проекції власного магнітного поля об'єкта. Таким чином, вектор вимірювання може бути описаний як:

$$Y_{M,i} = \bar{T}_i + \Delta\bar{T}_i + v_{M,i},$$

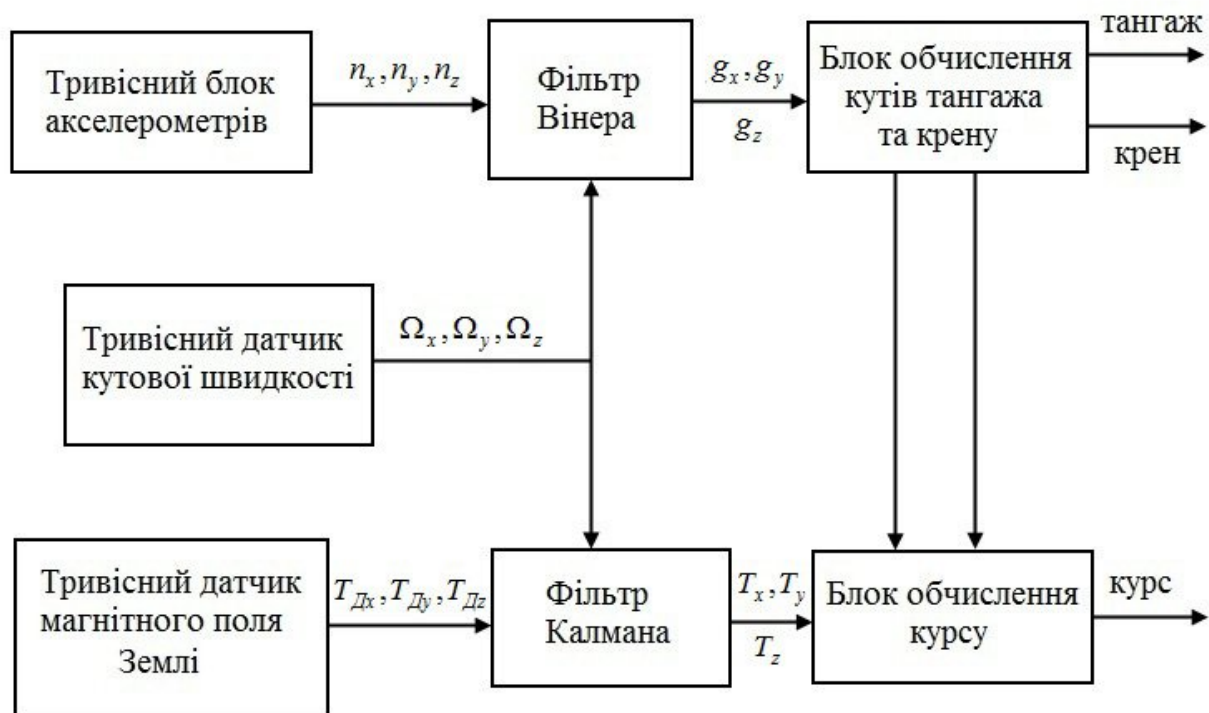


Рис. 2. Структурна схема БСО базі ДКШ, акселерометрів та магнітометрів з компенсацією похибок магнітометрів

де  $Y_i = \{T_{Дх,i}; T_{Ду,i}; T_{Дз,i}\}^T$  – вектор вимірювання на  $i$ -ому кроці роботи системи, що складається з проекцій магнітного поля, вимірюваних тривісним блоком магнітометрів;

$\bar{T}_i$  – ВНМПЗ у зв'язаній системі координат;

$\Delta\bar{T}_i$  – вектор напруженості магнітного поля об'єкту (ВНМПО) у зв'язаній системі координат;

$v_{M,i}$  – шумова складова у вихідному сигналі блоку магнітометрів.

Вектор стану приймемо у вигляді:

$$X_{Mi} = [T_{Mx,i}; T_{My,i}; T_{Mz,i}; \Delta T_{Mx,i}; \Delta T_{My,i}; \Delta T_{Mz,i}]^T,$$

де  $X_{Mi}$  – вектор стану;

$T_{Mx,i}; T_{My,i}; T_{Mz,i}$  – проекції ВМППЗ на осі зв'язаної системи координат;

$\Delta T_{Mx,i}; \Delta T_{My,i}; \Delta T_{Mz,i}$  – проекції ВМПО на осі зв'язаної системи координат.

Тоді зв'язок між вектором стану і вектором вимірювання визначається залежністю:

$$Y_{M,i} = H_{M,i} \cdot X_{M,i} + v_{M,i},$$

$$\text{де } H_{M,i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{матриця спостереження.}$$

Так як магнітне поле об'єкта постійне і обертається разом з об'єктом, то ВМПО у зв'язаній системі координат є постійним, тобто:

$$\overline{\Delta T}_i = \overline{\Delta T} = \text{const.} \quad (4)$$

Вимірювання у часі ВМППЗ у зв'язаній системі координат, що обертається з кутовою швидкістю  $\Omega$  відносно нормальної системи координат, може бути описано наступним чином:

$$\frac{d\overline{T}_i}{dt} = \overline{T}_i \times \overline{\Omega}. \quad (5)$$

Таким чином, у відповідності до виразів (4) та (5), зміна часу вектора стану (1), може бути описана за допомогою рівняння вигляду:

$$X_i = \begin{bmatrix} \overline{T}_{i-1} + \overline{T}_{i-1} \times \overline{\Omega}_{i-1} \\ \overline{\Delta T} \end{bmatrix},$$

де  $\Omega_{i-1} = [\Omega_x^{i-1}; \Omega_y^{i-1}; \Omega_z^{i-1}]^T$  – показання трьохканального блока датчиків кутової швидкості на  $i - 1$ -ому кроці.

На основі рівняння (5), в дискретній ІВСО, вектор напруженості магнітного поля Землі  $\overline{T}_i$ , на  $i - 1$ -ому кроці роботи системи може бути описаний за допомогою рекурентного рівняння вигляду:

$$\overline{T}_i = \overline{T}_{i-1} + \overline{T}_{i-1} \times \overline{\Omega}_{i-1}. \quad (6)$$

Доповнивши інформацію з каналу акселерометрів виразом (6), отримаємо рекурентні залежності, які дозволяють реалізувати безплатформову систему орієнтації, що використовує в якості параметрів, що характеризують орієнтацію зв'язаної системи координат відносно нормальної, вектор прискорення вільного падіння Землі(ВППЗ) та

ВНМПЗ. При цьому, зв'язок між даним параметром та кутами Ейлера здійснюється за відомими залежностями (1) та (3).

Не дивлячись на те, що запропонований алгоритм використовує шість параметрів, що характеризують орієнтацію об'єкта, він має обчислювальне навантаження, рівносильне обчислювальному навантаженню алгоритму на базі кватерніонів.

У відповідності до виразів (4) та (6) зміна в часі вектора стану описується матрицею прогнозу  $\Phi_{M,i}$ .

$$\Phi_{M,i} = \begin{bmatrix} \Phi_{a,i} & \Theta \\ \Theta & E \end{bmatrix},$$

де  $\Theta$  – квадратна матриця третього порядку, що складається з нулів;

$E$  – одинична матриця третього порядку.

Визначимо початкові значення вектора стану  $X_{M,0}$ , матриці коваріації похибок оцінювання  $P_{M,0}$ , значення матриць коваріацій шумів, що породжуються  $Q_{M,i}$  та шумів вимірювання  $R_{M,i}$ , а також вигляд матриці шумів, що породжуються  $\Gamma_{M,i}$ .

Початкове значення вектора стану приймемо рівним 0. Початкове значення матриці коваріацій похибок оцінювання визначає, з яким ступенем точності відоме початкове значення вектора стану, який відображає істинне значення оцінюваних величин. Таким чином, початкове значення матриці коваріацій похибок оцінювання визначається як діагональна матриця шостого порядку, при цьому значення її діагональних елементів визначаються величиною, в якій вимірюються параметри магнітного поля, а також параметри магнітного поля об'єкта. В загальному випадку, значення діагональних елементів матриці  $P_{M,0}$  можуть бути прийняті рівними діапазону вимірювання датчиків.

Матриця коваріацій шумів вимірювання визначає достовірність інформації, що поступає з блока магнітометрів. В цьому разі, чим більше її значення, тим менш достовірними є вимірювання. Мінімальні значення матриці коваріацій шумів вимірювання  $R_{M,i}$  визначаються шумовою складовою блока магнітометрів, включаючи як шумову складову датчика, так і електронного тракту узгоджувального ланцюга, починаючи узгоджувальним каскадом підсилення, і закінчуючи аналогово-цифровим перетворювачем.

Дані параметри можуть бути отримані розрахунковим шляхом на основі технічних характеристик датчиків та елементів електронного тракту вимірювального ланцюга, з урахуванням параметрів напруги живлення чи

визначені експериментально за допомогою записів сигналів магнітометрів, при визначенні матриці коваріації шумів вимірювання  $R_{a,i}$ .

В цьому разі шумова складова показань магнітометрів, як правило, має нормальний розподіл, тому величина середньоквадратичного відхилення (СКВ) може бути визначена за правилом трьох  $\sigma$ . Можна показати, що шуми магнітометрів некорельовані, у зв'язку з чим матриця коваріації шумів вимірювання має діагональний вигляд та її мінімальне значення може бути визначене так:

$$R_i = \begin{bmatrix} \sigma_M^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_M^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_M^2 \end{bmatrix},$$

де  $\sigma_M$  – середньоквадратичне відхилення шумової складової показів магнітометрів.

Визначимо параметри матриці породжуваних шумів і параметри матриці коваріації породжуваних шумів. Будемо вважати, що опис магнітного поля об'єкта як постійної величини достатньо точний, тому похибки прогнозу по опису магнітного поля об'єкта відсутні.

Параметри похибок прогнозу для проєкцій ВНМПЗ можуть бути отримані за допомогою натурального моделювання у відповідності до структурної схеми, яка зображена на рис. 3.

Система, яка представлена на рис. 3, працює наступним чином. За сформованими кутами Ейлера та їх похідними формуються показання ДКШ без похибок у відповідності до виразів [6]:

$$\begin{cases} \Omega_x = \dot{\gamma} + \dot{\psi} \sin \theta \\ \Omega_y = \dot{\theta} \sin \gamma + \dot{\psi} \cos \gamma \cos \theta \\ \Omega_z = -\dot{\psi} \sin \gamma \cos \theta + \dot{\theta} \cos \gamma \end{cases}$$

Після формування еталонних сигналів до них додаються похибки датчиків, які визначаються у відповідності до паспорту датчика та запису сигналів ДКШ в режимі спокою.

Далі формується прогноз ВНМПЗ на осі зв'язаної системи координат за виразом (6) та обчислюється різниця між спрогнозованими та істинними проєкціями, які формуються у блоці вироблення проєкцій  $\bar{T}_i$ , у відповідності до виразів [6]:

$$T_x = L \cdot \cos \psi \cdot \cos \theta + B \cdot \sin \theta,$$

$$T_y = L \cdot \sin \psi \cdot \sin \gamma + [B \cdot \cos \theta - L \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta] \cdot \cos \gamma,$$

$$T_z = L \cdot \sin \psi \cdot \cos \gamma - [B \cdot \cos \theta - L \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta] \cdot \sin \gamma,$$

На основі наведеного вище значення матриці шумів, що породжуються,  $\Gamma_{M,i}$ , прийнемо у вигляді:

$$\Gamma_{M,i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

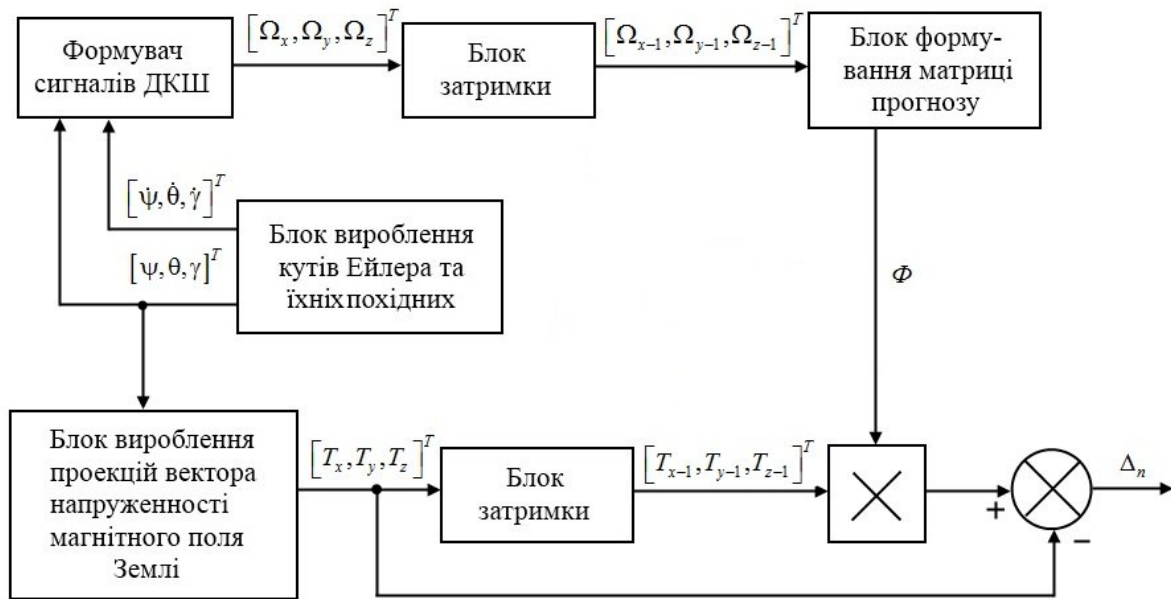


Рис. 3. Структурна схема визначення похибок прогнозу

Матриця коваріацій шумів, що породжують  $\mathcal{Q}_{M,i}$ , є діагональною матрицею та визначається виразом:

$$\mathcal{Q}_{M,i} = \begin{bmatrix} D_{\Delta Mn} & 0 & 0 \\ 0 & D_{\Delta Mn} & 0 \\ 0 & 0 & D_{\Delta Mn} \end{bmatrix},$$

де  $D_{\Delta Mn}$  – дисперсія похибки прогнозу, отримана за результатами натурного моделювання у відповідності до структурної схеми на рис. 3.

Таким чином, розмірність вектора стану перевищує розмірність вектора вимірювання, у зв'язку з чим, виникає питання спостережуваності фільтра Калмана (ФК) [5].



Спостережуваність системи визначається матрицями спостереження та матрицею прогнозу, у свою чергу матриця прогнозу визначається параметрами руху об'єкта.

При відсутності обертального руху об'єкта дана система є не спостережуваною і тому такий спосіб комплексування не можна застосовувати.

При обертальному русі вздовж однієї осі система є спостережуваною, якщо залучити інформацію про інтенсивність магнітного поля у точці місцезнаходження об'єкта. Дана інформація з високою точністю може бути отримана з відомих карт магнітних полів [7].

При обертальному русі зі змінним напрямком система є спостережуваною, тому запропонований метод комплексування є прийнятним для використання.

## **Висновки**

Запропоновано підхід до створення неінваріантної схеми комплексування ДКШ з акселерометрами та датчиками магнітного поля на основі ФК, при якій інформація, вироблювана ДКШ, використовується при формуванні матриці прогнозу. Такий підхід у порівнянні з відомими способами комплексування забезпечує підвищення точності БСО без залучення апріорної інформації про параметри руху об'єкта, чи про динамічні характеристики та команди системи керування. Це, в свою чергу, робить систему незалежною від керування і самого об'єкта та робить її універсальною.

Запропонований спосіб комплексування вирішує задачу підвищення точності магнітометричної системи за рахунок усунення систематичних складових похибок магнітометрів, обумовлених як похибками чутливих елементів так і «магнітотвердими» матеріалами, які зазвичай є у складі об'єкту.

Єдиний випадок, коли не можна використовувати наведену систему, якщо об'єкт є стаціонарним або його обертальний рух відносно повільний. В таких випадках доцільно використовувати інваріантні схеми комплексування.

## **Список використаної літератури**

1. *Шведов, А. П.* Система ориентации подвижного объекта по показаниям магнитных датчиков [Текст] / А. П. Шведов, М. Г. Погорелов, Д. М. Малютин // Датчики и системы, №5 – 2009 г. – С.51-54.
2. *Погорелов, М. Г.* Информационно-измерительные системы магнитометрического типа для стационарных и подвижных объектов [Текст]: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.11.16 /

- М. Г. Погорелов. ГОУ ВПО «Тульский государственный университет» - Тула: Изд. ТулГУ, 2009 г. – 165с.
3. *Погорелов, М. Г.* Оценка влияния погрешности акселерометров на точность бескарданной системы ориентации магнитного типа [Текст]/ М. Г. Погорелов // Труды XVI международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». – 2007. – С. 131.
  4. *Погорелов, М. Г.* Исследование погрешностей малогабаритного магнитометрического измерителя углового положения [Текст]/ М. Г. Погорелов, Д. М. Малютин // Материалы X Юбилейной конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». Науч. редактор д.т.н. О. А. Степанов / под. общ. Ред. академика РАН В. Г. Пегехонова. – Спб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2009. –С. 342 – 349.
  5. *Степанов, О. А.* Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации [Текст]/ О. А. Степанов. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 496с.
  6. *Пельпор, Д. С.* Гироскопические приборы и системы: Учеб. Для вузов по спец. «Гироскоп, приборы и устройства» [Текст]/ Д. С. Пельпор, И. А. Михалев, В. А. Бауман и др.; Под ред. Д. С. Пельпора. - 2-е изд., перераб. и доп. –М.: Высшая школа, 1988 г. – 424 с.
  7. The US/UK World Magnetic Model for 2005-2010, NOAA Technical Report NESDIS/NGDC-1 [Электронный ресурс] / S. McLean, S. Macmillan, S. Maus, V. Lesur, A. Thomson, D. Dater. – December 2004. – 79 p. – Режим доступа: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>.