



УКРАЇНА

(19) UA (11) 54017 (13) U  
(51) МПК (2009)  
G01P 9/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

### (54) ІНЕРЦІАЛЬНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ БЛОК

1

2

(21) u201004673

(22) 20.04.2010

(24) 25.10.2010

(46) 25.10.2010, Бюл. № 20, 2010 р.

(72) КУЛІК АНАТОЛІЙ СТЕПАНОВИЧ, ГОРДІН ОЛЕКСАНДР ГРИГОРОВИЧ, КОПІСОВ ОЛЕГ ЕДУАРДОВИЧ, ПОНОМАРЬОВ ВАДИМ СЕРГІЙОВИЧ

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. М.Є.ЖУКОВСЬКОГО "ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ"

(57) Інерціальний вимірювальний блок, що містить три однокомпонентні гіроскопічні датчики кутової швидкості, три однокомпонентні маятникові акселерометри, осі чутливості яких паралельні осям

зв'язаної з об'єктом ортогональної системи координат, осі підвісу рухомих елементів датчиків взаємно ортогональні та кожна з них паралельна відповідній осі зв'язаної з об'єктом ортогональної системи координат, осі підвісу рухомих елементів однокомпонентних маятникових акселерометрів паралельні відповідним осям підвісу рухомих елементів однокомпонентних гіроскопічних датчиків кутової швидкості, який **відрізняється** тим, що вимірювальний блок містить дві слідкуючі головки, кожна з яких знаходиться у двохосовому кардановому підвісі з датчиками кутів на осях підвісу, а виходи датчиків кутів підвісів слідкуючих головок з'єднані з обчислювальним пристроєм.

Корисна модель належить до вимірювальної техніки і може бути використана в системах керування рухомими об'єктами та в інерціальних безкарданих навігаційних системах для визначення інерціальних параметрів.

Відомий безплатформний інерціальний блок, який містить основу, гіроскопи-акселерометри, джерела струму, сервісні електронні блоки, відносно кожної ортогональної осі X, Y і Z встановлено по мікромеханічному акселерометру, осі чутливості яких співпадають з названими осями, і три мікромеханічних двоосних датчика кутової швидкості, осі чутливості першого з них паралельні осям X і Y, другого - осям Y і Z, третього - осям Z і X, виходи яких з'єднані з відповідними входами електронного блока обробки і виділення корисної інформації, який з'єднаний з джерелом струму (патент України на корисну модель №35089 М. кл. G01C 21/00, Безплатформний інерціальний блок, Бюл. № 16, 2008 р.).

Недоліками цього вимірювача є невисока точність визначення інерціальних і навігаційних параметрів за рахунок великих похибок мікромеханічних акселерометрів та дрейфу (швидкості відходу) двостепеневих мікромеханічних гіроскопів.

Відомий найбільш близький та вибраний в якості прототипу інерціальний вимірювальний блок (патент України на корисну модель №37386 М. кл. G01P 9/00, Інерціальний вимірювальний блок, Бюл. № 22, 2008 р.), який містить три однокомпо-

нентних гіроскопічних датчика кутової швидкості, три однокомпонентних маятникових акселерометри, осі чутливості яких паралельні осям зв'язаної з об'єктом ортогональної системи координат, осі підвісу рухомих елементів датчиків взаємно ортогональні та кожна з них паралельна відповідній осі зв'язаної з об'єктом ортогональної системи координат, осі підвісу рухомих елементів однокомпонентних маятникових акселерометрів паралельні відповідним осям підвісу рухомих елементів однокомпонентних гіроскопічних датчиків кутової швидкості, виходи всіх шести вимірювачів кінематичних параметрів з'єднані з обчислювальним пристроєм.

Недоліком цього вимірювача є наявність похибок визначення навігаційних параметрів за рахунок дрейфу гіроскопічних датчиків кутової швидкості.

Задачею корисної моделі є збільшення точності визначення навігаційних параметрів шляхом корекції параметрів кутового положення корпусу або шляхом компенсації помилок визначення кутових параметрів корпусу, які з'являються за рахунок дрейфу гіроскопічних датчиків кутової швидкості.

Поставлена задача вирішується тим, що в інерціальний вимірювальний блок, який містить три однокомпонентні гіроскопічні датчики кутової швидкості, три однокомпонентні маятникові акселерометри, осі чутливості яких паралельні осям зв'язаної з об'єктом ортогональної системи координат,

UA (11) 54017 (13) U

осі підвісу рухомих елементів датчиків взаємно ортогональні та кожна з них паралельна відповідній осі зв'язаної з об'єктом ортогональної системи координат, осі підвісу рухомих елементів однокомпонентних маятникових акселерометрів паралельні відповідним осям підвісу рухомих елементів однокомпонентних гіроскопічних датчиків кутової швидкості, згідно з корисною моделлю введені дві слідкуючі головки, кожна з яких знаходиться у двохосовому кардановому підвісі з датчиками кутів на осях підвісу, а виходи датчиків кутів підвісів слідкуючих головок з'єднані з обчислювальним пристроєм.

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями, де на фіг. 1 наведена структурно-кінематична схема інерціального вимірювального блока, на фіг. 2 наведена структурно-функціональна схема інерціального вимірювального блока, на фіг. 3 наведене взаємне положення зв'язаного з корпусом об'єкта триєдра OXYZ та навігаційного триєдра  $O_iX_iY_iZ_i$ , на фіг. 4 наведена структурно-функціональна схема алгоритму визначення кутів  $\gamma$ ,  $\psi$ ,  $\vartheta$ , який реалізується за допомогою обчислювального пристрою.

Інерціальний вимірювальний блок містить три однокомпонентні гіроскопічні датчики кутової швидкості 1, 2, 3, три однокомпонентні маятникові акселерометри 4, 5, 6 та дві слідкуючі головки 7, 8. Кожна з осей триєдрів  $O_iX_iY_iZ_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ ), зв'язаних з кожним із однокомпонентних гіроскопічних датчиків кутової швидкості 1, 2, 3, однокомпонентних маятникових акселерометрів 4, 5, 6, слідкуючими головками 7, 8, розміщена паралельно відповідній осі зв'язаної з об'єктом ортогональної системи координат OXYZ 9.

Кожний з однокомпонентних гіроскопічних датчиків кутової швидкості 1, 2, 3 містить рухомі елементи - це рами 10, 11, 12, які відхиляються на певні кути. У кожній рамі 10, 11, 12 розташовані ротори 13, 14, 15 відповідно. Також до складу однокомпонентних гіроскопічних датчиків кутової швидкості 1, 2, 3 входять датчики 16, 17, 18 кутів відхилення рухомих елементів і датчики моментів 19, 20, 21. Кожен з однокомпонентних маятникових акселерометрів 4, 5, 6 містить рухомі елементи - це інерційні маси 22, 23, 24 які відхиляються на певні кути. Також до складу однокомпонентних маятникових акселерометрів 4, 5, 6 входять датчики 25, 26, 27 кутів відхилення рухомих елементів і датчики моментів 28, 29, 30. Кожна з слідкуючих головок 7, 8 містить рухомі елементи - це рами підвісу 31, 32, 33, 34, які відхиляються на певні кути за допомогою датчиків моментів 35, 36, 37, 38 відповідно. Датчики моментів 35, 36 є керованим перетворювачем 39, датчики моментів 37, 38 є керованим перетворювачем 40. У рамках 32, 34 розташовані електронно-оптичні датчики 41, 42, виходи яких з'єднані з перетворювачами 39, 40 відповідно. До складу слідкуючих головок 7, 8 входять по два датчика 43, 44 та 45, 46 кутового відхилення елементів карданового підвісу. За допомогою датчиків 16, 17, 18 визначаються кути відхилення рухомих елементів 10, 11, 12 однокомпонентних гіроскопічних датчиків кутової швидкості 1, 2, 3, за допомогою датчиків 25, 26, 27 визнача-

ються кути відхилення рухомих елементів 22, 23, 24 однокомпонентних маятникових акселерометрів 4, 5, 6.

Виходи 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56 кожного з датчиків 16, 17, 18, 25, 26, 27, 43, 44, 45, 46 кутів відхилення рухомих елементів з'єднані з обчислювальним пристроєм 57, за допомогою якого реалізується базовий алгоритм.

За допомогою блока-алгоритму 58, який реалізується обчислювальним пристроєм 57, визначають три складові вектора кутової швидкості  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  та три складові вектора уявного прискорення  $W_x$ ,  $W_y$ ,  $W_z$  об'єкта.

Вихідні сигнали всіх датчиків 16, 17, 18, 25, 26, 27, 43, 44, 45, 46, що пропорційні кутам відхилення їх рухомих елементів, подаються на вхід обчислювального пристрою 57, в якому відповідно спеціальним блоку-алгоритму 58 визначаються величини проєкцій вектора кутової швидкості корпусу об'єкта на осі зв'язаної з об'єктом ортогональної системи координат OXYZ, величини проєкцій вектора уявного прискорення на осі зв'язаної з об'єктом ортогональної системи координат OXYZ, кути орієнтації корпусу об'єкта в просторі. Інформація про кутове положення корпусу об'єкта з блока-алгоритму 58 та алгоритму визначення кутового положення корпусу за допомогою слідкуючих головок 7, 8 передається до блока-алгоритму 59, який дає змогу робити корекцію параметрів кутового положення корпусу, які визначаються блоком-алгоритмом 58, та компенсацію помилок кутового положення корпусу, які з'являються за рахунок дрейфу гіроскопічних датчиків кутової швидкості 1, 2, 3.

Інформація про три складові вектора кутової швидкості  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  та три складові вектора уявного прискорення  $W_x$ ,  $W_y$ ,  $W_z$  об'єкта з блока-алгоритму 58 та параметри кутового положення (лінія 60) з блока-алгоритму 59 передається до блока-алгоритму 61, у якому визначаються уточнені три складові вектора кутової швидкості  $\omega'_x$ ,  $\omega'_y$ ,  $\omega'_z$  та три складові вектора уявного прискорення  $W'_x$ ,  $W'_y$ ,  $W'_z$  об'єкта. Блок-алгоритм 61 має виходи 62, 63, 64, 65, 66, 67 відповідно до кожного з інерціальних параметрів.

Для реалізації алгоритму визначення кутів  $\gamma$ ,  $\psi$ ,  $\vartheta$  на основі використання слідкуючих головок 7, 8 необхідна навігаційна інформація про величини векторів  $\vec{r}_{ii}$ ,  $\vec{r}$ ,  $\vec{a}_i^i$  та відстань до нерухомих

об'єктів  $\left| \vec{r}_{si} \right|$  в інерціальній системі координат

(необхідно ввести зворотній зв'язок 68 на первинний обчислювач), яка визначається за допомогою обчислювача 69. У відповідності до аналітичної форми подання алгоритму визначення кутів  $\gamma$ ,  $\psi$ ,  $\vartheta$ , можливо сформувати структурно-функціональну схему алгоритму визначення кутів  $\gamma$ ,  $\psi$ ,  $\vartheta$ , на основі використання двох слідкуючих головок 7 та 8 у складі інерціального вимірювального блока, який реалізується за допомогою обчислювача 57 (див. фіг. 4). Структурно-



$$M_{и1}(\psi, \vartheta) = \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cdot \cos \psi & \cos \vartheta \cdot \sin \psi & \sin \vartheta \\ \sin \gamma \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi & -\cos \gamma \cdot \sin \vartheta - \sin \gamma \cdot \cos \psi & \cos \gamma \cdot \cos \vartheta \\ \sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi + \cos \gamma \cdot \sin \psi & \sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \cos \psi & -\sin \gamma \cdot \cos \vartheta \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Транспонована матриця  $M_{и1}^T(\gamma, \psi, \vartheta)$  має вигляд:

$$M_{и1}^T(\psi, \vartheta) = \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cdot \cos \psi & \sin \gamma \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi & \sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi + \cos \gamma \cdot \sin \psi \\ \cos \vartheta \cdot \sin \psi & -\cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \sin \gamma \cdot \cos \psi & \sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \cos \psi \\ \sin \vartheta & \cos \gamma \cdot \cos \vartheta & -\sin \gamma \cdot \cos \vartheta \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Враховуючи співвідношення (11) та (12), отримаємо матрицю:

$$M_{и1}^T(\psi, \vartheta, \alpha_i, \beta_i) = M_{и1}(\psi, \vartheta, \alpha_i, \beta_i) = \begin{bmatrix} a_{11}^i & a_{12}^i & a_{13}^i \\ a_{21}^i & a_{22}^i & a_{23}^i \\ a_{31}^i & a_{32}^i & a_{33}^i \end{bmatrix} \quad (13)$$

де

$$\begin{aligned} a_{11}^i &= \cos \vartheta \cdot \cos \psi \cdot \cos \beta_i \cdot \cos \alpha_i + (\sin \gamma \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi) \cdot \cos \beta_i \cdot \sin \alpha_i - (\sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi + \cos \gamma \cdot \sin \psi) \cdot \sin \beta_i; \\ a_{12}^i &= -\cos \vartheta \cdot \cos \psi \cdot \sin \alpha_i + (\sin \gamma \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi) \cdot \sin \alpha_i; \\ a_{13}^i &= \cos \vartheta \cdot \cos \psi \cdot \cos \alpha_i \cdot \sin \beta_i + (\sin \gamma \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi) \cdot \sin \beta_i + (\sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi + \cos \gamma \cdot \sin \psi) \cdot \cos \beta_i; \\ a_{21}^i &= \cos \vartheta \cdot \sin \psi \cdot \cos \beta_i \cdot \cos \alpha_i + (\cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \sin \gamma \cdot \cos \psi) \cdot \cos \beta_i \cdot \sin \alpha_i - (\sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \cos \psi) \cdot \sin \beta_i; \\ a_{22}^i &= -\cos \vartheta \cdot \sin \psi \cdot \sin \alpha_i + (\cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi) \cdot \sin \alpha_i; \\ a_{23}^i &= \cos \vartheta \cdot \sin \psi \cdot \cos \alpha_i \cdot \sin \beta_i + (\cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \sin \gamma \cdot \cos \psi) \cdot \sin \alpha_i \cdot \sin \beta_i + (\sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \cos \psi) \cdot \cos \beta_i; \\ a_{31}^i &= \sin \vartheta \cdot \cos \beta_i \cdot \cos \alpha_i + \cos \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \beta_i \cdot \sin \alpha_i + \sin \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \sin \beta_i; \\ a_{32}^i &= -\sin \vartheta \cdot \sin \alpha_i + \cos \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \alpha_i; \\ a_{33}^i &= \sin \vartheta \cdot \cos \alpha_i \cdot \sin \beta_i + \cos \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \sin \alpha_i \cdot \sin \beta_i - \sin \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \beta_i; \end{aligned}$$

Підставляючи отриману матрицю (13) у формулу (3) отримаємо систему матричних рівнянь:

$$\begin{cases} \vec{a}_1 = M_{и1}^T(\psi, \vartheta, \alpha_1, \beta_1) \vec{a}_1; \\ \vec{a}_2 = M_{и2}^T(\psi, \vartheta, \alpha_2, \beta_2) \vec{a}_2; \end{cases} \quad (14)$$

Враховуючи співвідношення (1) та (2), можна записати:

$$\begin{bmatrix} a_{1X}^i \\ a_{1Y}^i \\ a_{1Z}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^1 & a_{12}^1 & a_{13}^1 \\ a_{21}^1 & a_{22}^1 & a_{23}^1 \\ a_{31}^1 & a_{32}^1 & a_{33}^1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} a_{2X}^i \\ a_{2Y}^i \\ a_{2Z}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^2 & a_{12}^2 & a_{13}^2 \\ a_{21}^2 & a_{22}^2 & a_{23}^2 \\ a_{31}^2 & a_{32}^2 & a_{33}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Використовуючи рівняння (15) та (16), отримаємо:

$$\begin{cases} a_{1X}^i = a_{11}^1 \\ a_{1Y}^i = a_{21}^1 \\ a_{1Z}^i = a_{31}^1 \\ a_{2X}^i = a_{11}^2 \\ a_{2Y}^i = a_{21}^2 \\ a_{2Z}^i = a_{31}^2 \end{cases} \quad (17)$$

Підставимо значення елементів матриці (13) у систему рівнянь (17):

$$\begin{cases} a_{1X}^i = \cos \vartheta \cdot \cos \psi \cdot \cos \beta_1 \cdot \cos \alpha_1 + (\sin \gamma \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi) \cdot \cos \beta_1 \cdot \sin \alpha_1 - (\sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi + \cos \gamma \cdot \sin \psi) \cdot \sin \beta_1; \\ a_{1Y}^i = \cos \vartheta \cdot \sin \psi \cdot \cos \beta_1 \cdot \cos \alpha_1 + (\cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \sin \gamma \cdot \cos \psi) \cdot \cos \beta_1 \cdot \sin \alpha_1 - (\sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \cos \psi) \cdot \sin \beta_1; \\ a_{1Z}^i = \sin \vartheta \cdot \cos \beta_1 \cdot \cos \alpha_1 + \cos \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \beta_1 \cdot \sin \alpha_1 + \sin \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \sin \beta_1; \\ a_{2X}^i = \cos \vartheta \cdot \cos \psi \cdot \cos \beta_2 \cdot \cos \alpha_2 + (\sin \gamma \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi) \cdot \cos \beta_2 \cdot \sin \alpha_2 - (\sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi + \cos \gamma \cdot \sin \psi) \cdot \sin \beta_2; \\ a_{2Y}^i = \cos \vartheta \cdot \sin \psi \cdot \cos \beta_2 \cdot \cos \alpha_2 + (\cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \sin \gamma \cdot \cos \psi) \cdot \cos \beta_2 \cdot \sin \alpha_2 - (\sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \cos \psi) \cdot \sin \beta_2; \\ a_{2Z}^i = \sin \vartheta \cdot \cos \beta_2 \cdot \cos \alpha_2 + \cos \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \beta_2 \cdot \sin \alpha_2 + \sin \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \sin \beta_2; \end{cases} \quad (18)$$

Перейдемо до реального випадку, коли поточне положення точки О триєдру OXYZ не співпадає з точкою О<sub>и</sub> триєдру О<sub>и</sub>X<sub>и</sub>Y<sub>и</sub>Z<sub>и</sub>. Взаємний стан то-

чок О та О<sub>и</sub> визначається радіус-вектором  $\vec{r}$  (див. фіг. 3).

Виходячи з фіг. 3, можна записати наступне

векторне рівняння:

$$\vec{r} + \vec{r}_i = \vec{r}_{ii}, \quad (19)$$

де  $\vec{r}_i$  - радіус-вектор, який визначає положення нерухомого об'єкта  $S_i$  у зв'язаній з корпусом об'єкта системи координат OXYZ;

$\vec{r}_{ii}$  - радіус-вектор, який визначає положення нерухомого об'єкта  $S_i$  в інерціальній системі координат  $O_iX_iY_iZ_i$ . Ці радіус-вектори є відомими:

$$\vec{r}_{ii} = \begin{bmatrix} r_{X_{ii}} & r_{Y_{ii}} & r_{Z_{ii}} \end{bmatrix}^T; \quad (20)$$

$$\vec{r} = \begin{bmatrix} r_X & r_Y & r_Z \end{bmatrix}^T. \quad (21)$$

Запишемо рівняння (19) у такому вигляді:

$$\begin{aligned} \vec{r}_i &= \vec{r}_{ii} - \vec{r}; \\ \frac{\vec{r}_i}{|\vec{r}_{ii}|} &= \frac{\vec{r}_{ii}}{|\vec{r}_{ii}|} - \frac{\vec{r}}{|\vec{r}_{ii}|}; \\ \frac{\vec{r}_i}{|\vec{r}_i|} \cdot \frac{|\vec{r}_i|}{|\vec{r}_{ii}|} &= \frac{\vec{r}_{ii}}{|\vec{r}_{ii}|} - \frac{\vec{r}}{|\vec{r}_{ii}|}, \end{aligned} \quad (22)$$

де  $\frac{|\vec{r}_i|}{|\vec{r}_{ii}|}$  - довжина вектора  $\vec{r}_{ii}$ ;

$\frac{|\vec{r}_i|}{|\vec{r}_i|}$  - довжина вектора  $\vec{r}_i$ .

Враховуючи, що  $\frac{\vec{r}_i}{|\vec{r}_i|} = a_i^u = M_{ii}(\psi, \vartheta, \alpha_i, \beta_i) a_i^i$

та  $\frac{\vec{r}_{ii}}{|\vec{r}_{ii}|} = a_i^u$ , отримаємо рівняння:

$$M_{ii}(\psi, \vartheta, \alpha_i, \beta_i) a_i^i \cdot \frac{|\vec{r}_i|}{|\vec{r}_{ii}|} = a_i^u - \frac{\vec{r}}{|\vec{r}_{ii}|}, \quad (23)$$

$$\text{Де } |\vec{r}_{ii}| = \sqrt{r_{X_{ii}}^2 + r_{Y_{ii}}^2 + r_{Z_{ii}}^2}; \quad (24)$$

$$|\vec{r}_i| = |M_{ii}^T(\psi, \vartheta, \alpha_i, \beta_i) a_i^i| \cdot |\vec{r}_{S_i}|, \quad (25)$$

$|\vec{r}_{S_i}|$  - відстань від точки O триєдра OXYZ до нерухомого об'єкта  $S_i$ .

Підставимо вирази (1), (10) у рівняння (25):

$$\begin{aligned} |\vec{r}_i| &= \left| \begin{bmatrix} \cos \beta_i \cdot \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i \cdot \sin \beta_i \\ \cos \beta_i \cdot \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & \sin \alpha_i \cdot \sin \beta_i \\ -\sin \beta_i & 0 & \cos \beta_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right| \cdot |\vec{r}_{S_i}| = \\ &= \sqrt{\cos^2 \beta_i \cdot \cos^2 \alpha_i + \cos^2 \beta_i \cdot \sin^2 \alpha_i + \sin^2 \beta_i} \cdot |\vec{r}_{S_i}| \end{aligned} \quad (26)$$

Підставивши (2), (17), (21), (24), (26) у (23) отримаємо систему шести рівнянь:

$$\begin{aligned}
& \left[ \cos \vartheta \cdot \cos \psi \cdot \cos \beta_1 \cdot \cos \alpha_1 + \left( \sin \gamma \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi \right) \cdot \cos \beta_1 \cdot \sin \alpha_1 - \left( \sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi + \cos \gamma \cdot \sin \psi \right) \sin \beta_1 \right] \cdot \frac{\left| \vec{r}_{S1} \right|}{\sqrt{\cos^2 \beta_1 \cdot \cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \beta_1 \cdot \sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \beta_1}} = \\
& \cdot \frac{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}} = \\
& = a_{Xu1} - \frac{r_X}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}} \\
& \left[ \cos \vartheta \cdot \sin \psi \cdot \cos \beta_1 \cdot \cos \alpha_1 + \left( \cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \sin \gamma \cdot \cos \psi \right) \cdot \cos \beta_1 \cdot \sin \alpha_1 - \left( \sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \cos \psi \right) \sin \beta_1 \right] \cdot \frac{\left| \vec{r}_{S1} \right|}{\sqrt{\cos^2 \beta_1 \cdot \cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \beta_1 \cdot \sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \beta_1}} = \\
& \cdot \frac{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}} = \\
& = a_{Yu1} - \frac{r_Y}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}}; \\
& \left[ \sin \vartheta \cdot \cos \beta_1 \cdot \cos \alpha_1 + \cos \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \beta_1 \cdot \sin \alpha_1 + \sin \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \sin \beta_1 \right] \cdot \frac{\left| \vec{r}_{S1} \right|}{\sqrt{\cos^2 \beta_1 \cdot \cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \beta_1 \cdot \sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \beta_1}} = \\
& \cdot \frac{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}} = \\
& = a_{Zu1} - \frac{r_Z}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}}; \\
& \left[ \cos \vartheta \cdot \cos \psi \cdot \cos \beta_2 \cdot \cos \alpha_2 + \left( \sin \gamma \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi \right) \cdot \cos \beta_2 \cdot \sin \alpha_2 - \left( \sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi + \cos \gamma \cdot \sin \psi \right) \sin \beta_2 \right] \cdot \frac{\left| \vec{r}_{S2} \right|}{\sqrt{\cos^2 \beta_2 \cdot \cos^2 \alpha_2 + \cos^2 \beta_2 \cdot \sin^2 \alpha_2 + \sin^2 \beta_2}} = \\
& \cdot \frac{\sqrt{r_{Xu2}^2 + r_{Yu2}^2 + r_{Zu2}^2}}{\sqrt{r_{Xu2}^2 + r_{Yu2}^2 + r_{Zu2}^2}} = \\
& = a_{Xu2} - \frac{r_X}{\sqrt{r_{Xu2}^2 + r_{Yu2}^2 + r_{Zu2}^2}}; \\
& \left[ \cos \vartheta \cdot \sin \psi \cdot \cos \beta_2 \cdot \cos \alpha_2 + \left( \cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \sin \gamma \cdot \cos \psi \right) \cdot \cos \beta_2 \cdot \sin \alpha_2 - \left( \sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \cos \psi \right) \sin \beta_2 \right] \cdot \frac{\left| \vec{r}_{S2} \right|}{\sqrt{\cos^2 \beta_2 \cdot \cos^2 \alpha_2 + \cos^2 \beta_2 \cdot \sin^2 \alpha_2 + \sin^2 \beta_2}} = \\
& \cdot \frac{\sqrt{r_{Xu2}^2 + r_{Yu2}^2 + r_{Zu2}^2}}{\sqrt{r_{Xu2}^2 + r_{Yu2}^2 + r_{Zu2}^2}} = \\
& = a_{Yu2} - \frac{r_Y}{\sqrt{r_{Xu2}^2 + r_{Yu2}^2 + r_{Zu2}^2}}; \\
& \left[ \sin \vartheta \cdot \cos \beta_2 \cdot \cos \alpha_2 + \cos \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \beta_2 \cdot \sin \alpha_2 + \sin \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \sin \beta_2 \right] \cdot \frac{\left| \vec{r}_{S2} \right|}{\sqrt{\cos^2 \beta_2 \cdot \cos^2 \alpha_2 + \cos^2 \beta_2 \cdot \sin^2 \alpha_2 + \sin^2 \beta_2}} = \\
& \cdot \frac{\sqrt{r_{Xu2}^2 + r_{Yu2}^2 + r_{Zu2}^2}}{\sqrt{r_{Xu2}^2 + r_{Yu2}^2 + r_{Zu2}^2}} = \\
& = a_{Zu2} - \frac{r_Z}{\sqrt{r_{Xu2}^2 + r_{Yu2}^2 + r_{Zu2}^2}};
\end{aligned} \tag{27}$$

Система (27) складається з шести рівнянь, але має три параметри (кути  $\gamma$ ,  $\psi$ ,  $\vartheta$ ), які необхідно визначити. Сформуємо систему трьох незалежних рівнянь з трьома невідомими з системи (27):

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[ \cos \vartheta \cdot \cos \psi \cdot \cos \beta_1 \cdot \cos \alpha_1 + \left( \sin \gamma \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi \right) \cdot \cos \beta_1 \cdot \sin \alpha_1 - \left( \sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \psi + \cos \gamma \cdot \sin \psi \right) \sin \beta_1 \right] \cdot \frac{\left| \vec{r}_{S1} \right|}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}} = \\ & = a_{Xu1} - \frac{r_X}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}}; \\ & \left[ \cos \vartheta \cdot \sin \psi \cdot \cos \beta_1 \cdot \cos \alpha_1 + \left( \cos \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \sin \gamma \cdot \cos \psi \right) \cdot \cos \beta_1 \cdot \sin \alpha_1 - \left( \sin \gamma \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \cos \gamma \cdot \cos \psi \right) \sin \beta_1 \right] \cdot \frac{\left| \vec{r}_{S1} \right|}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}} = \\ & = a_{Yu1} - \frac{r_Y}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}}; \\ & \left[ \sin \vartheta \cdot \cos \beta_2 \cdot \cos \alpha_2 + \cos \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \beta_2 \cdot \sin \alpha_2 + \sin \gamma \cdot \cos \vartheta \cdot \sin \beta_2 \right] \cdot \frac{\left| \vec{r}_{S2} \right|}{\sqrt{r_{Xu2}^2 + r_{Yu2}^2 + r_{Zu2}^2}} = \\ & = a_{Zu2} - \frac{r_Z}{\sqrt{r_{Xu2}^2 + r_{Yu2}^2 + r_{Zu2}^2}}; \end{aligned} \right. \quad (28)$$

Подібна система рівнянь має однозначне вирішення, що можна довести, лінеаризовавши її. Отримаємо лінеаризовану систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[ \cos \beta_1 \cdot \cos \alpha_1 - \cos \beta_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \vartheta - \sin \beta_1 \cdot \psi \right] \cdot \frac{\left| \vec{r}_{S1} \right|}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}} = \\ & = a_{Xu1} - \frac{r_X}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}}; \\ & \left[ \cos \beta_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \psi - \cos \beta_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \gamma + \sin \beta_1 \right] \cdot \frac{\left| \vec{r}_{S1} \right|}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}} = \\ & = a_{Yu1} - \frac{r_Y}{\sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2}}; \\ & \left[ \cos \beta_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \vartheta + \cos \beta_2 \cdot \sin \alpha_2 + \sin \beta_2 \cdot \gamma \right] \cdot \frac{\left| \vec{r}_{S2} \right|}{\sqrt{r_{Xu2}^2 + r_{Yu2}^2 + r_{Zu2}^2}} = \\ & = a_{Zu2} - \frac{r_Z}{\sqrt{r_{Xu2}^2 + r_{Yu2}^2 + r_{Zu2}^2}}; \end{aligned} \right. \quad (29)$$

Розв'язання системи рівнянь (29) має вигляд:

$$\begin{cases} \gamma = \frac{K_7 \cdot K_1 \cdot K_2 - K_1^2 \cdot K_2 + K_3 \cdot K_1 \cdot \langle K_9 - K_4 \rangle + K_5 \cdot K_2 \cdot \langle K_8 - K_5 \rangle}{K_1 \cdot K_3 \cdot K_6 - K_5 \cdot K_3 \cdot K_2}, \\ \psi = \frac{K_9 \cdot K_3^2 + K_3^2 \cdot K_4 - K_2 \cdot K_3 \cdot \langle K_1 - K_7 \rangle + K_6 \cdot K_3 \cdot \langle K_8 - K_5 \rangle}{K_1 \cdot K_3 \cdot K_6 - K_5 \cdot K_3 \cdot K_2}, \\ \vartheta = \frac{K_5^2 \cdot K_6 - K_8 \cdot K_5 \cdot K_6 - K_3 \cdot K_5 \cdot \langle K_9 - K_4 \rangle + K_6 \cdot K_1 \cdot \langle K_1 - K_7 \rangle}{K_1 \cdot K_3 \cdot K_6 - K_5 \cdot K_3 \cdot K_2}, \end{cases}$$

$$K_1 = \cos \beta_1 \cdot \cos \alpha_1;$$

$$K_2 = \cos \beta_2 \cdot \cos \alpha_2$$

$$K_3 = \cos \beta_1 \cdot \sin \alpha_1;$$

$$K_4 = \cos \beta_2 \cdot \sin \alpha_2;$$

$$K_5 = \sin \beta_1;$$

$$K_6 = \sin \beta_2;$$

$$K_7 = \frac{a_{Xu1} \cdot \sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2} - r_X}{\sqrt{\cos^2 \beta_1 \cdot \cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \beta_1 \cdot \sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \beta_1} \cdot \left| \vec{r}_{S1} \right|};$$

$$K_8 = \frac{a_{Yu1} \cdot \sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2} - r_Y}{\sqrt{\cos^2 \beta_1 \cdot \cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \beta_1 \cdot \sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \beta_1} \cdot \left| \vec{r}_{S1} \right|};$$

де

$$K_9 = \frac{a_{Zu2} \cdot \sqrt{r_{Xu1}^2 + r_{Yu1}^2 + r_{Zu1}^2} - r_Z}{\sqrt{\cos^2 \beta_2 \cdot \cos^2 \alpha_2 + \cos^2 \beta_2 \cdot \sin^2 \alpha_2 + \sin^2 \beta_2} \cdot \left| \vec{r}_{S2} \right|};$$

Отримане розв'язання (30) лінеаризованої системи рівнянь (29) можна представити у вигляді структурно-функціональної схеми алгоритму, який реалізується за допомогою обчислювального пристрою 57 (див. фіг. 4).

Таким чином, інерціальний вимірювальний

блок дозволяє збільшити точність визначення інерціальних параметрів за рахунок корекції кутового положення корпусу або компенсації помилок визначення кутового положення корпусу, які з'являються за рахунок дрейфу гіроскопічних датчиків кутової швидкості.

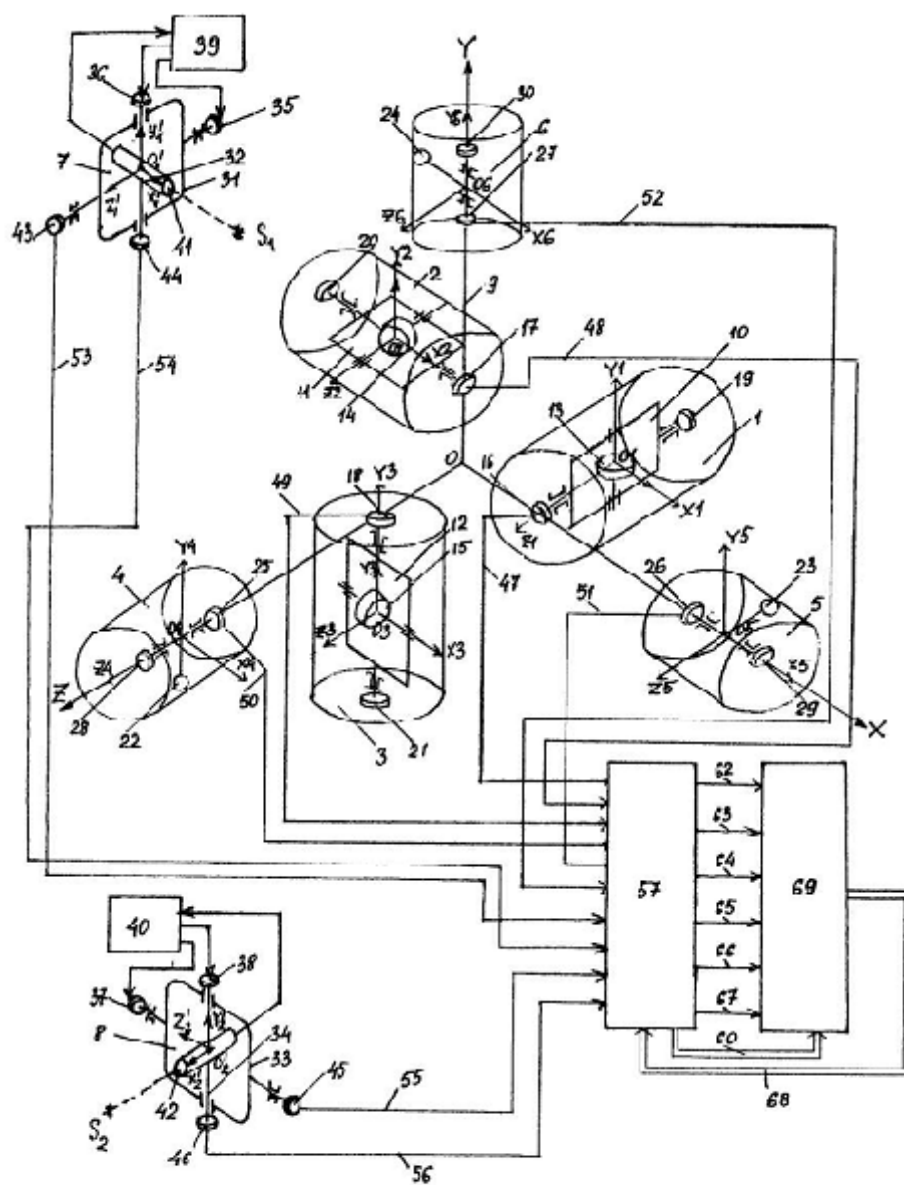
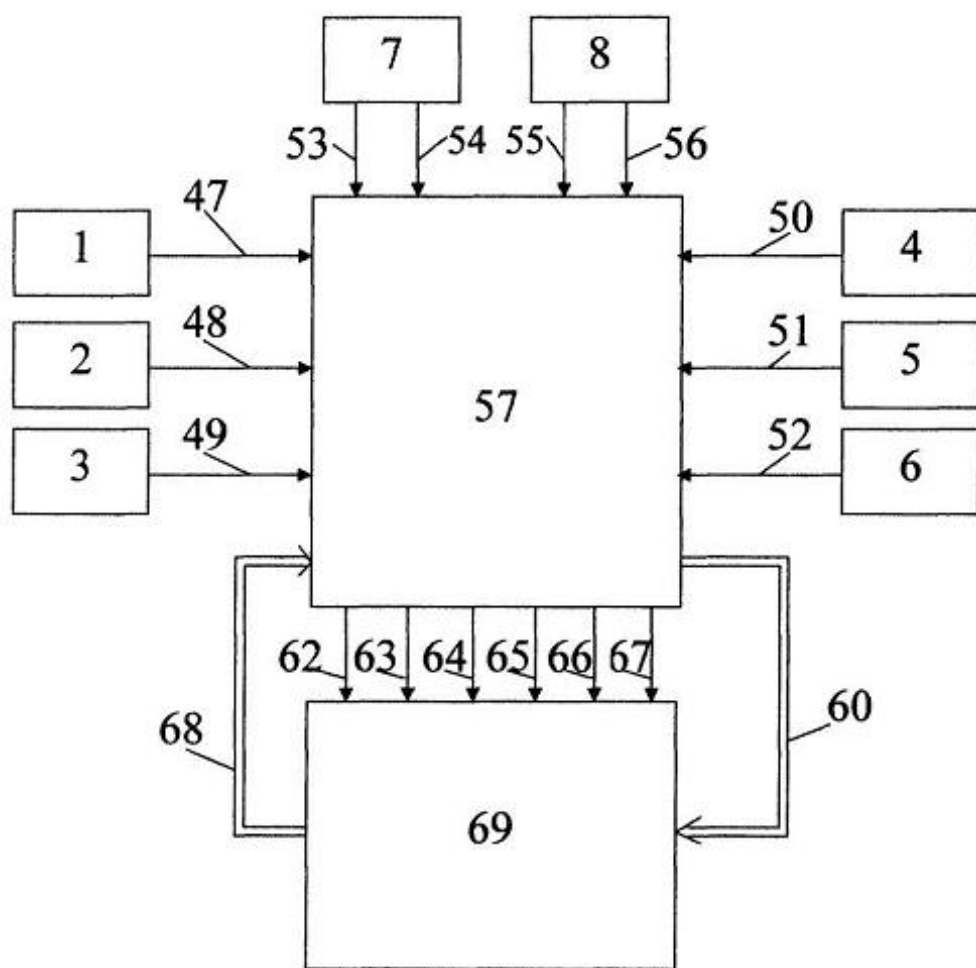
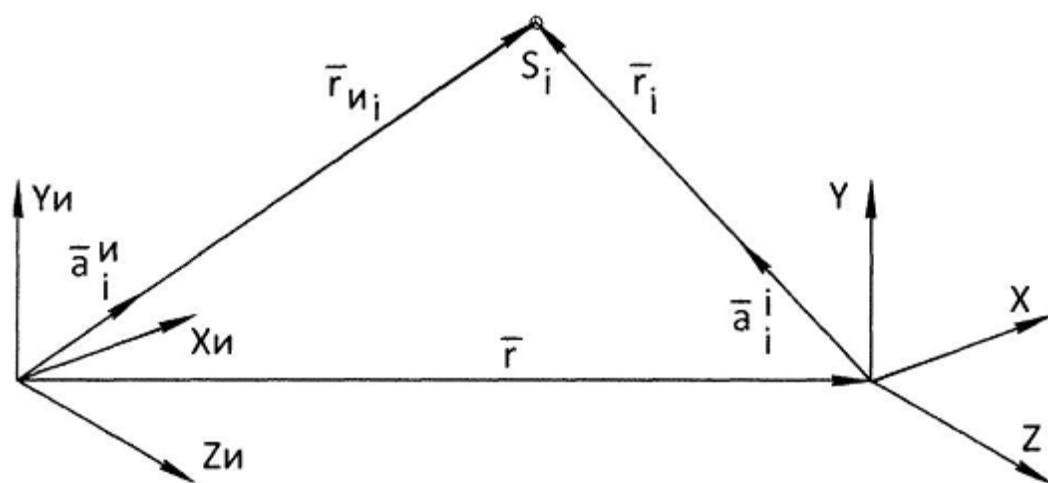


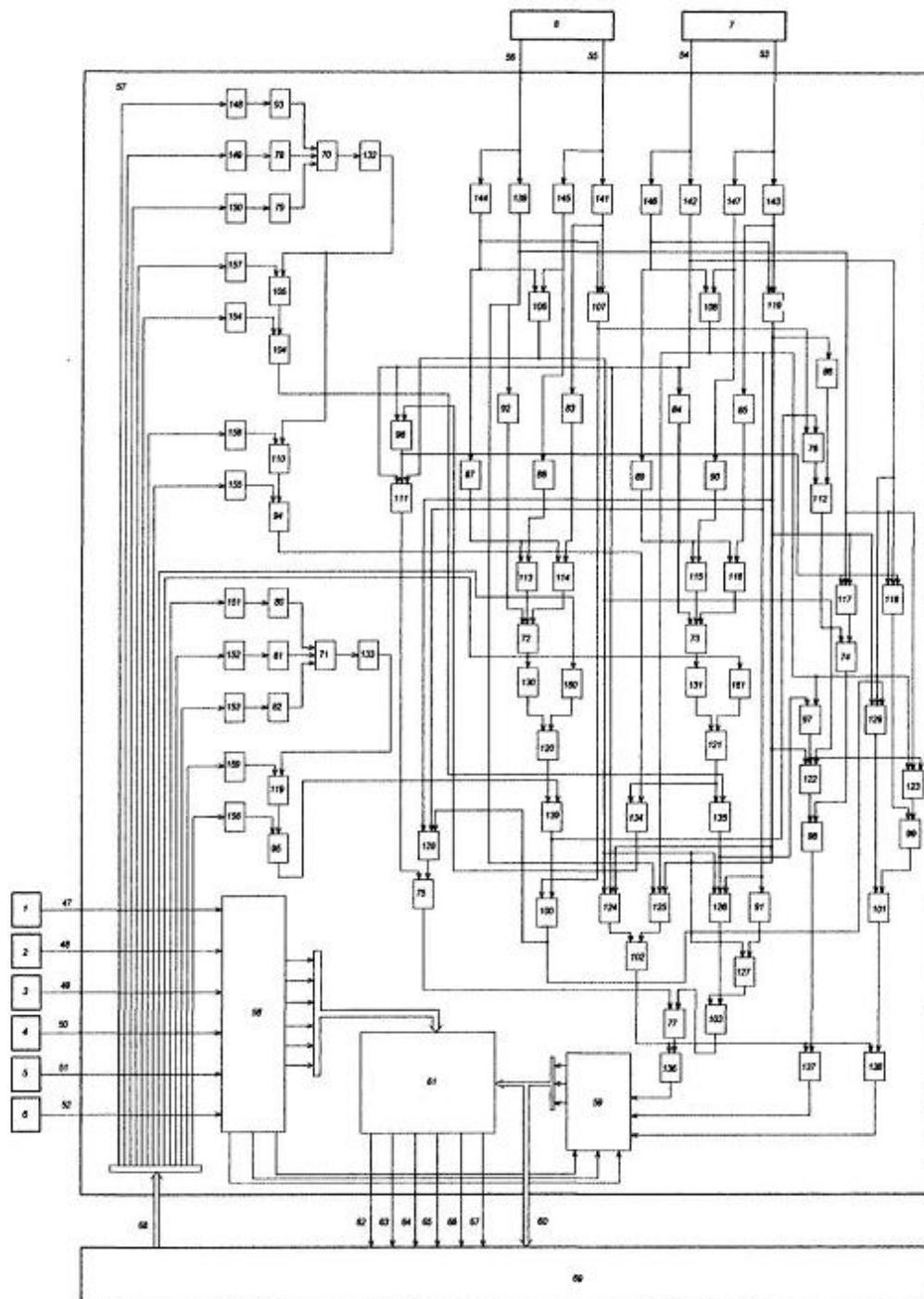
Fig. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фіг. 4