

Управление шестистепенным стендом по информации о параметрах навигационного полигона для калибровки навигационно-геоинформационных систем и комплексов в лабораторных условиях

Control of the workbench consisting of six stages and aimed at processing of information related to parameters of navigational testing ground for calibration of navigational and geoinformation systems and complexes in laboratory conditions

Ключевые слова: закон управления – control algorithm; испытания БИНС – INS testing; калибровка – calibration; шестистепенная платформа – six-axis platform; поворотный стол – rotation table; навигация – navigation; управление – control.

В статье приводятся результаты реализации стенда калибровки на основе шестистепенной платформы. Приводится алгоритм управления штангами шестистепенной платформы поворотного стола для проведения динамических испытаний приборов в статических условиях, синтезированный на основе решения обратной задачи динамики, также представлена схема закона управления штангой шестистепенной платформы. Приводится статистический анализ точности задания траектории.

Article describes creation integrated navigation systems calibration device based on six-axis platform. Describes six-axis actuators control law with solving the inverse problems of dynamics approach, and a diagram of the control law. Six-axis platform it is a main part of device for carrying out dynamic tests under static conditions. The proposed six-axis rotation table is required for testing of integrated navigation systems and complexes. Also article contains statically analysis of forming needed trajectory with actuator.

ВВЕДЕНИЕ

Мировой тенденцией повышения точностных характеристик наземных навигационных систем и их помехоустойчивости является создание интегри-

БУКИН / ВУКИН А.

Артем Геннадьевич

(bukin.artem@gmail.com)

аспирант, научный сотрудник,
МОУ «Институт инженерной физики»,
Москва

рованных навигационных комплексов на основе комплексирования измерительной информации от навигационных датчиков с различным спектром погрешностей. Данные комплексы выделяются в отдельный класс [1].

В настоящее время известно множество вариантов схем интеграции измерительной информации от различных источников данных: инерциально-спутниковые, инерциально-одометрические, корреляционно-экстремальные системы и т.д. [3]. Проведенный анализ схем построения современных навигационных систем и комплексов показал, что высоких точностных характеристик в автономном режиме можно добиться двумя способами: периодической остановкой с дискретностью 1–10 минут или применением в качестве дополнительного источника информации спутниковых навигационных приемников.

Первый способ не удовлетворяет требованиям по организации безостановочного движения. Второй способ не удовлетворяет требованиям обеспечения заданных точностных характеристик без применения спутниковых навигационных технологий, подверженных влиянию высокочастотных и другого рода помех. Таким образом, задача обеспечения определения координат подвижных наземных объектов с погрешностью 5–15 м без применения спутниковых технологий при снятии ограничений на время навигации и протяженность маршрутов движения на

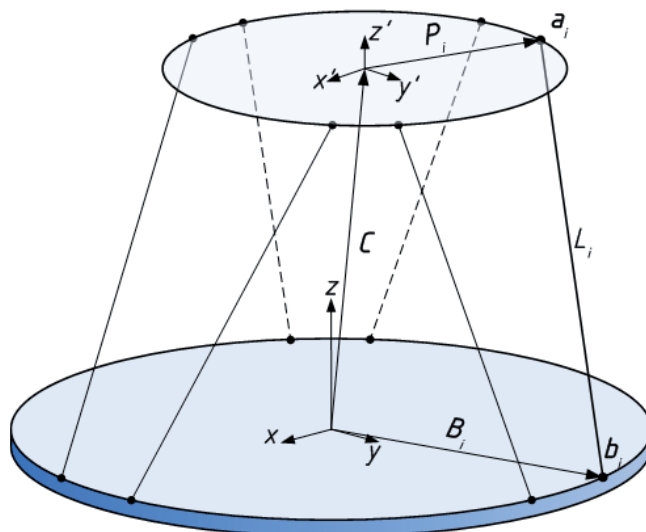


Рис. 1. Геометрическая схема шестистепенной платформы

основе вышеприведенных схем не решена [2]. В последнее время широкое применение находят навигационно-геоинформационные системы, обеспечивающие решение данной задачи.

Физической основой достижения таких характеристик является использование информационного ресурса в виде закономерностей между геометрическими параметрами маршрутов движения, который «материализуется» в виде базы геоинформационных данных на заданные районы навигации [1]. Создание новых навигационно-геоинформационных систем и комплексов (интегрированных систем) предполагает более высокоуровневое информационное и математическое обеспечение, что в свою очередь, предполагает создание новых средств диагностики и калибровки современных приборов, в частности – возникает задача генерации на физическом уровне параметров траекторий движения наемных транспортных средств.

Методика решения задачи. Предлагается вместо существующих стендов на основе поворотных платформ применять шестистепенной стенд, обеспечивающий воспроизводство линейных и угловых параметров траектории движения транспортного средства с одновременной генерацией вибрационных возмущений [5]. Геометрическая схема стенда [6] представлена на рис. 1, где имеется система координат в евклидовом пространстве, связанная с основанием стенда $OXYZ$, имеется система координат $OX'Y'Z'$, связанная с подвижной платформой, заданной множеством точек соединения штанг $B = \{b_1, \dots, b_6\}$ в системе координат $OXYZ$, множеством точек $A = \{a_1, \dots, a_6\}$ в системе

координат $OX'Y'Z'$, штанги соединения основания и платформы составляют множество векторов $L = \{L_1, \dots, L_6\}$.

Основной проблемой является разработка контуров управления платформой при не наблюдаемости кинематических параметров траектории движения платформы. Разработана схема синтеза законов управления, где непосредственно наблюдаемым параметром является значение длины штанги штока привода.

На схеме введены следующие обозначения:

- x^3 – заданная траектория движения транспортного средства, например – углы крена, тангажа, рыскания в функции времени или текущих координат движения транспортного средства;

- l^3 – заданная траектория движения штока привода (закон изменения длины штока), рассчитанная по кинематическим соотношениям $l^3 = L(x^3)$;

- $l^{\phi} = f_{3y}(l^3)$ – фактические значения длины штока после реализации закона управления длинами штоков по заданной траектории движения штоков;

- $x^{\phi} = L^{-1}(x^3)$ – фактические значения кинематических параметров траектории движения платформы, вычисленные на основе обратного преобразования кинематических соотношений.

Реализация данной схемы предполагает решение следующих задач:

- вывод кинематических соотношений $l^3 = L(x^3)$ для расчета длин штанг штоков привода, обеспечивающих реализацию заданной траектории (преобразование закономерности изменения кинематических параметров в закономерность изменения длин штанг штоков);

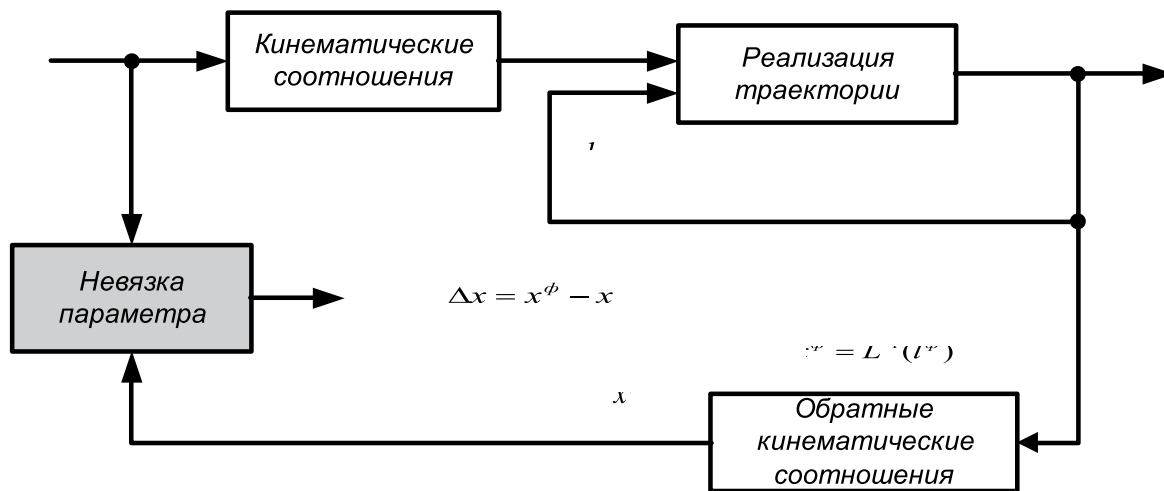


Рис. 2. Схема управления шестистепенной платформой

- синтез алгоритмов управления $f_{xy}(t^3)$, обеспечивающих реализацию закона изменения длин штанг штоков приводов с заданными показателями быстродействия, точности и т.д.;
- обоснование требований к решению обратных кинематических соотношений $x^\phi = L^{-1}(x^3)$;
- разработка рекомендаций по оценке погрешности реализации заданной траектории, параметров закона управления.

На основе геометрической схемы, представленной на рис. 1, получены кинематические соотношения, определяющие связь между длиной штанги штока привода и параметрами траектории (линейными и угловыми). Выражение (2) определяет связь для каждого из шести штоков привода.

$$l_i^2 = (X + r_{11}P_{ix} + r_{12}P_{iy} + r_{13}P_{iz} - B_{ix})^2 + (Y + r_{21}P_{ix} + r_{22}P_{iy} + r_{23}P_{iz} - B_{iy})^2 + (Z + r_{31}P_{ix} + r_{32}P_{iy} + r_{33}P_{iz} - B_{iz})^2,$$

$$l = \sqrt{\begin{aligned} &(X + \cos(\gamma)\cos(\beta)P_{ix} + \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma)P_{iy} - \sin(\gamma)\cos(\alpha)P_{iz} - B_{ix})^2 + \\ &(Y + \sin(\alpha)\cos(\beta)P_{ix} + \sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma)P_{iy} + \cos(\gamma)\cos(\alpha)P_{iz} - B_{iy})^2 + \\ &(Z - \sin(\beta)P_{ix} + \cos(\beta)\sin(\alpha)P_{iy} - B_{iz})^2 \end{aligned}} \quad (2)$$

Таким образом, выражения (2) можно рассматривать как переход от требований к параметрам предписанной траектории движения платформы к требованиям траектории движения штоков привода. Реализация требуемой траектории движения штоков разработана с применением метода синтеза алгоритмов управления на основе обратных задач

динамики по схеме, представленной на рис. 4 (с использованием информации об ускорении и скорости движения штоков привода) [4].

На основе синтезированных алгоритмов управления с использованием методов статистического анализа точности отработки заданной траектории движения штока привода получены соотношения для вычисления дисперсий ошибок отработки заданной траектории штоком, например – для управления без ускорения:

$$\begin{aligned} d_{22} &= \frac{1}{2} \frac{r_3^2 + r_2}{r_2 r_3 - r_1} b^2 k^2 (\beta_1^2 p_{11} + p_{22}) + \frac{r_3}{r_2 r_3 - r_1} b^2 k^2 \beta_0 \beta_1 p_{11}, \\ d_{11} &= \frac{r_3}{r_1} d_{22} - \frac{1}{2r_1} b^2 k^2 (\beta_1^2 p_{11} + p_{22}), \\ d_{33} &= \frac{r_1}{r_3} d_{22} + \frac{r_2}{2r_3} b^2 k^2 (\beta_1^2 p_{11} + p_{22}), \end{aligned} \quad (3)$$

где β_0, β_1, k – параметры алгоритма управления. Коэффициенты определяются по следующим соотношениям исходя из заданных требований к переходному процессу:

$$r_1 = \frac{bk}{\tau_l}, \quad r_2 = a_0 + bk \frac{\sqrt{2}}{\tau_l}, \quad r_3 = a_1 + bk, \quad (4)$$

где a_0, a_1 – параметры функции управления, τ_l – время переходного процесса.

На основе математической модели процесса управления, реализация которого представлена

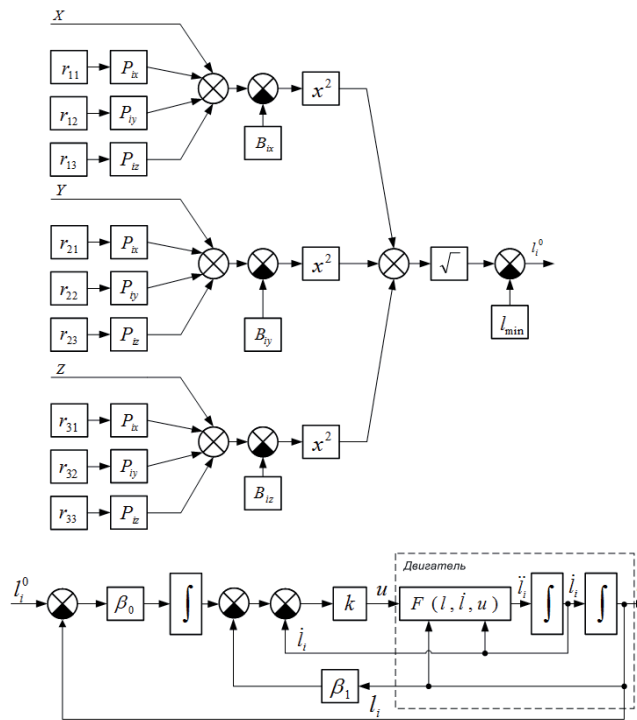


Рис. 3. Структурная схема управления штоком привода с учетом кинематических соотношений

	$t_x = 0,1 \text{ с}$		$t_x = 0,01 \text{ с}$		$t_x = 0,005 \text{ с}$	
	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
$d_{11}^{зад}, \text{ М}^2$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
β_0	900	900	$9 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^5$
β_1	42,426	42,426	424,264	424,264	848,528	848,528
N	2	2,5	10	2,5	5	2,5
k	60	75	600	750	3000	1500
$p_{11}, \text{ М}^2$	$6,095 \cdot 10^{-6}$	$1,69 \cdot 10^{-8}$	$8,761 \cdot 10^{-7}$	$1,69 \cdot 10^{-9}$	$4,047 \cdot 10^{-7}$	$8,452 \cdot 10^{-10}$
$p_{22}, (\text{М/с})^2$	$2,743 \cdot 10^{-3}$	$7,61 \cdot 10^{-6}$	0,039	$7,61 \cdot 10^{-5}$	0,073	$1,521 \cdot 10^{-4}$
$p_{33}, (\text{М/с}^2)^2$	0,233	$6,45 \cdot 10^{-4}$	33,454	0,065	123,635	0,258
$p_{11}^{мреб}, \text{ М}$	$2,469 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$9,36 \cdot 10^{-4}$	$4,11 \cdot 10^{-5}$	$6,362 \cdot 10^{-4}$	$2,907 \cdot 10^{-5}$
$d_{11}, \text{ М}^2$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
$d_{22}, (\text{М/с})^2$	0,184	$4,61 \cdot 10^{-4}$	18,042	0,045	72,085	0,18
$d_{33}, (\text{М/с}^2)^2$	229,103	0,716	$1,146 \cdot 10^7$	$7,159 \cdot 10^3$	$9,164 \cdot 10^7$	$1,146 \cdot 10^5$

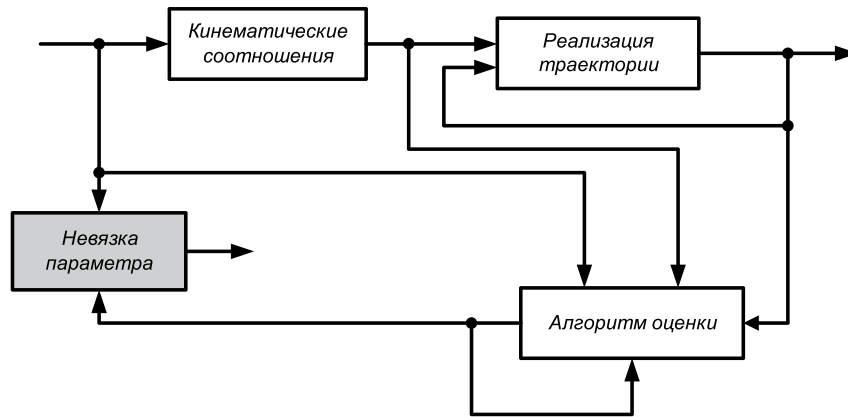


Рис. 4. Вычислительная схема для оценки погрешности задания траектории в случае изменения одного параметра

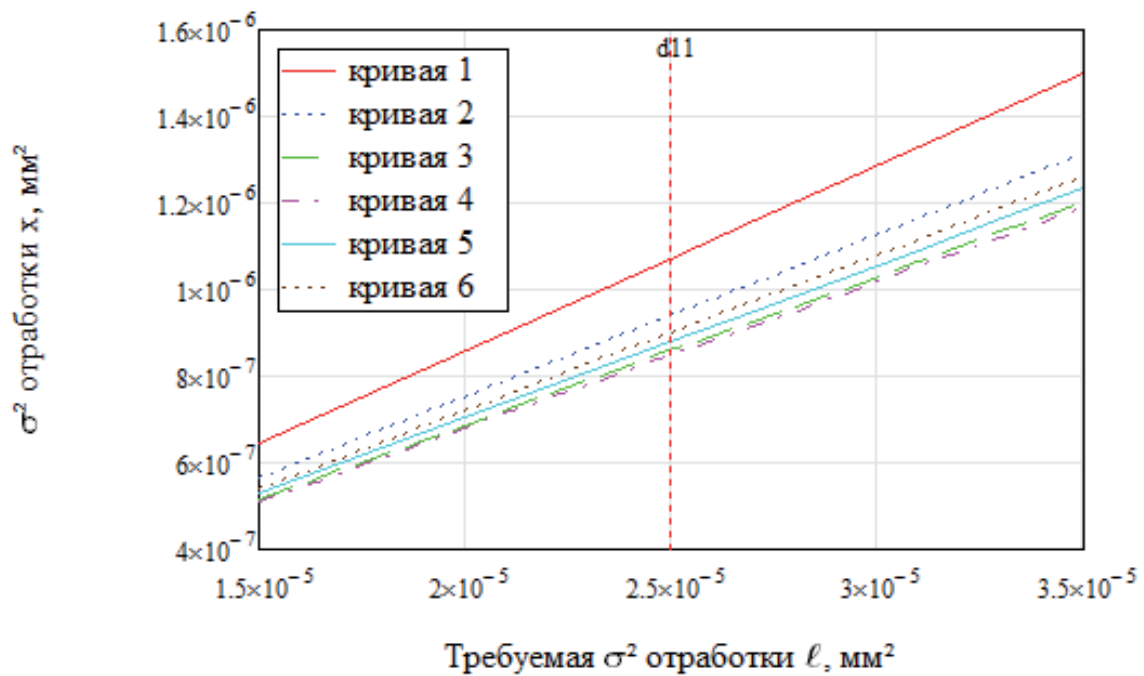


Рис. 5. Номограмма оценки погрешности реализации предписанной траектории по значениям погрешности отработки контуром управления предписанного движения штоков привода

на рис. 3, соотношений 2 и 4 проведены расчеты значений погрешности обработки контуром управления предписанной траектории движения штока привода по значениям погрешностей датчиков перемещений штока. Результаты расчета представлены в таблице.

В таблице приведены следующие данные:

- d_{11}, d_{22}, d_{33} – дисперсии погрешности измерения смещения, скорости, ускорения штока;
- P_{11}, P_{22}, P_{33} – шум измерителя смещения, скорости, ускорения штока;
- $p_{11}^{проб}, d_{11}^{зад}$ – требуемый уровень шума измерителя смещения, заданная дисперсия погрешности измерения смещения штока.

С целью оценки погрешности обработки платформой заданной траектории на основе обратного преобразования с применением метода Ньютона и наименьших квадратов разработаны соотношения для оценки дисперсии ошибки обработки кинематических соотношений:

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{\partial L^{-1}(V)_x}{\partial l} \right)^2 \cdot \sigma_l^2, \sigma_y^2 = \left(\frac{\partial L^{-1}(V)_y}{\partial l} \right)^2 \cdot \sigma_l^2, \sigma_z^2 = \left(\frac{\partial L^{-1}(V)_z}{\partial l} \right)^2 \cdot \sigma_l^2,$$

$$\sigma_\phi^2 = \left(\frac{\partial L^{-1}(V)_\phi}{\partial l} \right)^2 \cdot \sigma_l^2, \sigma_\psi^2 = \left(\frac{\partial L^{-1}(V)_\psi}{\partial l} \right)^2 \cdot \sigma_l^2 \quad (5)$$

где $\sigma_l^2 = d_{11}$ – дисперсии ошибки обработки штока, $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_\phi^2, \sigma_\psi^2$ – дисперсии ошибки обработки координат.

Частные производные вычисляются на основе начальных приближений заданной траектории изменения кинематических параметров, требуемых параметров движения штоков привода, соответствующих параметрам предписанных траекторий, что показано на рис. 4 в виде дополнительных связей.

Результаты расчетов обобщены и представлены в виде номограммы (рис. 5).

Порядок расчета погрешностей:

1) определить по заданным шумам изменений дисперсию обработки длин штанг $\sigma^2 = \left\| \begin{matrix} \sigma_l^2 & \sigma_i^2 & \sigma_j^2 \end{matrix} \right\|$, $\sigma_l^2 = d_{11}$, $\sigma_i^2 = d_{22}$, $\sigma_j^2 = d_{33}$ по формулам (3);

2) произвести расчет требуемой дисперсии обработки заданной траектории подвижной платформой шестистепенного станда по формулам (5);

3) в результате расчета необходимо выбрать максимальную дисперсию при расчете для всех шести штанг.

ВЫВОДЫ

1. В статье представлены результаты исследований по синтезу алгоритмов управления шестистепенным стандом по информации о параметрах

навигационного полигона для калибровки навигационно-геоинформационных систем и комплексов в лабораторных условиях.

2. Сформулированы задачи, решение которых обеспечит управление платформой с целью реализации предписанных траекторий, параметры которой определяются геометрическими параметрами маршрутов движения транспортного средства.

3. Обоснованы кинематические соотношения, обеспечивающие переход от требований к параметрам предписанной траектории движения платформы к требованиям траектории движения штоков привода

4. Разработаны алгоритмы управления штоками приводов на основе обратных задач динамики, обеспечивающих реализацию предписанных траекторий движения штоков с заданными показателями качества управления.

5. Проведен статистический анализ точности управления штоками приводов, приведены соотношения для оценки дисперсий ошибок реализации предписанных траекторий их движения, вычисления параметров алгоритмов управления.

6. Приведены результаты расчета дисперсии ошибок измерений смещения штоков для времени переходного процесса $t_i = 0,005$.

Литература

1. Беркович С.Б., Котов Н.И., Шолохов А.В., Каменский Л.П., Рудаков В.М., Сдвижков А.И. Коррекция автономных наземных навигационных систем в движении по отдельным точкам цифровой карты дороги // XIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2006.
2. Ермаков В.С. Программно-аппаратный комплекс для отладки и тестирования алгоритмического и программного обеспечения навигационных систем // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 9. – С. 31–35.
3. Парусников Н.А., Голован А.А., Вавилова Н.Б., Тихомиров В.В., Голиков В.П., Ларионов С.В., Требухов А.В. Математические модели бортовых алгоритмов интегрированных инерциальных навигационных систем // Отчет лаборатории управления и навигации механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и Раменского приборостроительного конструкторского бюро. – М., 2005.
4. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линеинные модели. – М.: Наука, 1987.
5. Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Калдымов Н.А., Полушкин А.В., Нахов С.Ф. Методика и устройства для экспериментального определения динамических характеристик акселерометров линейных ускорений // XII Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2005. – С. 242–244.
6. Stewart D. A platform with six degrees of freedom // Proceedings of the IMechE. – 1965. – № 180(15). – P. 371–385.