

УДК 681.5

DOI: 10.20998/2411-0558.2020.01.03

*А. П. ПАРШИН*, канд. техн. наук, доц., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО КАНАЛА ОРИЕНТАЦИИ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK**

Статья посвящена решению проблемы повышения точности и отказоустойчивости блока системы ориентации беспилотного летательного аппарата за счет создания функциональной избыточности на основе использования неортогонального расположения чувствительных элементов. На основании проведенного исследования предлагается модель комплексированного измерительного блока системы ориентации. Ил.: 2. Библиогр.: 14 назв.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат; бесплатформенная навигационная система; система ориентации; неортогональное расположение; функциональная избыточность.

**Постановка проблемы.** Реализация требований к надежности бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) может быть достигнута за счет избыточной комплектации блока системы ориентации (БСО) и соответствующим выбором ориентации осей чувствительности датчиков. Кроме того, за счет выбора рациональной конфигурации функционально-избыточного БСО и разработки особых алгоритмов построения навигационного решения точность может быть повышена на 30 – 40% [1]. Эти алгоритмы часто содержат большое количество численных параметров, оптимальные значения которых существенным образом зависят от динамики носителя, на борту которого предполагается эксплуатация навигационной системы. Таким образом, отладка алгоритмов, повышение их надёжности и точности оказываются возможны лишь после изучения и обработки обширного массива показаний датчиков, полученных при их лётных испытаниях.

Высокая сложность и стоимость таких испытаний привели к идее имитационного моделирования сигналов инерциальных датчиков, приёмников спутниковых навигационных систем (СНС) и на их основе блоков ориентации и навигации БИНС.

**Анализ литературы.** В ряде работ [2 – 11] описаны возможные варианты конфигурации избыточных блоков, построенных на основе микромеханических датчиков. Оптимальной ориентацией измерительных осей является расположение их на образующих конуса. Конструктивно эта задача решается размещением чувствительных элементов на

© А.П. Паршин, 2020

основании, выполненном в виде усеченной пирамиды с различным количеством боковых граней. Такое размещение построено на понятии правильного многогранника [6]. При этом ось чувствительности каждого датчика должна быть перпендикулярна грани правильного многогранника.

Значительный эффект для инерциальных измерений дает применение инерциальных блоков (модулей), т.е. совмещение в одном корпусе 3-осевых датчиков угловых скоростей (ДУС) с акселерометрами, магнитометрами и датчиками температуры и давления. Использование таких блоков в сочетании с алгоритмическими методами позволяет решать вопросы повышения точности инерциальных измерительных систем [2].

**Целью статьи** является представление разработки и исследования модели функционального избыточного блока системы ориентации беспилотного летательного аппарата.

**Основная часть.** Основной задачей системы ориентации является определение углового положения подвижного объекта в географических координатах – курса ( $\psi$ ), тангажа ( $\theta$ ) и крена ( $\gamma$ ). Традиционным является конфигурирование системы ориентации на основе бесплатформенного принципа, при котором роль стабилизированной платформы выполняет виртуальный сопровождающий трехгранник, относительно которого определяется положение измерительных осей связанной системы ориентации в процессе движения объекта.

Алгоритм определения параметров ориентации БИНС представляется в виде четырех субалгоритмов [1]:

- *Алгоритм определения начальной матрицы ориентации.*
- *Алгоритм вычисления матрицы взаимной ориентации базиса, связанного с БПЛА и географического.*
- *Алгоритм вычисления угловых параметров ориентации БПЛА относительно географической системы координат (вычисление истинного курса  $\psi$ , крена  $\gamma$ , тангажа  $\theta$ ).*
- *Алгоритм пересчета сигналов, полученных с акселерометров, в географическую систему координат для использования в навигационном алгоритме.*

В основе этих алгоритмов лежат различные системы кинематических параметров, описывающих ориентацию связанной СК относительно инерциальной СК: направляющие косинусы, параметры Родрига-Гамильтона, углы Эйлера-Крылова, координаты вектора конечного поворота, параметры Кейли-Клейна.

Источником информации алгоритма ориентации с углами Эйлера-Крылова являются проекции вектора относительной угловой скорости, получаемые на основе сигналов с трех осей ДУС и проекций абсолютной угловой скорости географического трехгранника. Выходом алгоритма ориентации являются углы курса  $\psi$ , крена  $\gamma$  и тангажа  $\theta$ . Уравнения, осуществляющие связь углов  $\psi$ ,  $\gamma$ ,  $\theta$  с относительными угловыми скоростями  $\omega_X^{отн}$ ,  $\omega_Y^{отн}$ ,  $\omega_Z^{отн}$ , имеют вид [2, 12]:

$$\begin{cases} \omega_X^{отн} = \psi + \psi \sin \theta; \\ \omega_Y^{отн} = \theta \sin \gamma + \psi \cos \gamma \cos \theta; \\ \omega_Z^{отн} = -\psi \sin \gamma \cos \theta + \theta \cos \gamma. \end{cases} \quad (1)$$

Для реализации алгоритма ориентации с углами Эйлера-Крылова необходимо решить обратную задачу, т.е. из составляющих угловой скорости  $\omega_X^{отн}$ ,  $\omega_Y^{отн}$ ,  $\omega_Z^{отн}$  получить углы рыскания, тангажа и крена. Данный алгоритм составлен на основании решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \psi = \frac{1}{\cos \theta} [\omega_Y^{отн} \cos \gamma - \omega_Z^{отн} \sin \gamma]; \\ \theta = \omega_Y^{отн} \sin \gamma + \omega_Z^{отн} \cos \gamma; \\ \psi = \omega_X^{отн} - \text{tg} \theta [\omega_Y^{отн} \cos \gamma - \omega_Z^{отн} \sin \gamma]. \end{cases} \quad (2)$$

Алгоритм ориентации с направляющими косинусами основан на решении обобщенного уравнения Пуассона [14]:

$$\dot{C} = C[\omega] - [\omega_g]C. \quad (3)$$

Если пренебречь вектором угловой скорости географического трехгранника  $[\omega_g]$ , то уравнение (3) примет вид:

$$\dot{C} = C[\omega]. \quad (4)$$

Начальными условиями для интегрирования матричного уравнения (4) является начальная матрица направляющих косинусов  $C(t_0)$ :

$$\begin{aligned} x_1 = \cos \theta_0; \quad x_2 = \cos \psi_0; \quad x_3 = \cos \gamma_0; \quad x_4 = \sin \gamma_0; \quad x_5 = \sin \psi_0; \\ x_6 = \sin \theta_0; \quad x_7 = \sin \gamma_0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C(t_0) &= \\
 &= \begin{vmatrix} x_1 x_2 & -x_3 x_2 x_5 + x_4 x_5 & x_7 x_2 x_5 + x_3 x_5 \\ x_5 & x_3 x_1 & -x_4 x_1 \\ -x_1 x_5 & x_3 x_5 x_6 + x_7 x_2 & -x_7 x_5 x_6 + x_3 x_2 \end{vmatrix} = \\
 &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Алгоритм ориентации с кватернионами основан на решении кинематического уравнения [14]:

$$\dot{\Lambda} = \Lambda \mathbf{o}\Omega - \Omega_g \mathbf{o}\Lambda + \Lambda(1 - \|\Lambda\|), \tag{6}$$

где  $\Lambda$  – собственный кватернион, характеризующий ориентацию связанной системы координат относительно географической.

Уравнение (6) снабжено корректирующим членом  $\Lambda(1 - \|\Lambda\|)$  для автоматической коррекции нормы кватерниона. Умножение кватернионов  $\Lambda \mathbf{o}\Omega$  соответствует умножению матриц вида [5]:

$$M(\lambda) = \begin{vmatrix} \lambda_0 & -\lambda_1 & -\lambda_2 & -\lambda_3 \\ \lambda_1 & \lambda_0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_0 & -\lambda_1 \\ \lambda_3 & -\lambda_2 & \lambda_1 & \lambda_0 \end{vmatrix}; \quad \omega = \begin{vmatrix} 0 \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{vmatrix}. \tag{7}$$

Погрешности ДУС при определении параметров ориентации накапливаются под влиянием различных ошибок ДУС (шум, нестабильность нуля и др.). Поэтому актуальной является задача компенсации влияния постоянных или медленно меняющихся ускорений на точность определения параметров ориентации.

При решении поставленной задачи использовался блок, реализующий фильтр Винера, основанный на рекуррентной зависимости [14]:

$$X_{i+1} = \tau X_i \times \Omega_i + X_i + K(A_{i+1} - \tau X_i \times \Omega_i - X_i), \tag{8}$$

где  $i \in N$  – шаг работы фильтра Винера;  $\tau$  – шаг дискретизации БСО;

$X_i = \begin{vmatrix} \hat{q}_x \\ \hat{q}_y \\ \hat{q}_z \end{vmatrix}^T$  – вектор оцененных значений проекций вектора ускорения свободного падения Земли на оси связанной системы координат;

$\Omega_i = \begin{vmatrix} \omega_{x,i} & \omega_{y,i} & \omega_{z,i} \end{vmatrix}^T$  – показания ДУС на  $i$ -м шаге работы

фільтра Винера;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – проекції вектора кулової шкорути вращення БСО на осі зв'язаної системи координат;  $K$  – коефіцієнт передачі фільтра Винера;  $A_i = \begin{vmatrix} n_{x,i} & n_{y,i} & n_{z,i} \end{vmatrix}^T$  – показання акселерометра на  $i$ -м шаге роботи фільтра Винера;  $n_x, n_y, n_z$  – проекції вектора кажущогося ускорення БСО на осі зв'язаної системи координат.

Для проведення дослідвань реалізована конфігурація БСО с 4-мя інерціальними модулями [11]. Інерціальні блоки установлені на основанні, виконанном в виде усеченого тетраэдра с тремя боковыми гранями. Іспользование 4-го измерительного модуля с ортогональным расположением осей чувствительных элементов дает возможность оценки точности получаемых результатов работы БСО. Такая конфигурация и набор датчиков создает избыточность и позволяет реализовать 9 полноценных БСО.

**Целью експериментів** було дослідвання погрешностей орієнтації в залежності від варіантів (комбінацій измерителів) БСО и іспользуемых алгоритмов орієнтації. После предварительной обработки и фильтрации полученные данные с трех модулей обрабатывались с помощью исследуемых алгоритмов орієнтації.

Схема модели дослідвання алгоритмов орієнтації автономного об'єкта в среде *Matlab Simulink* приведена на рис. 1.

Модель содержит модели алгоритмов орієнтації, фільтр Винера (блок *Analog Filter Viners*), блок вычисления углов тангажа и крена (блок *Bvu*), блоки *IMU* моделирующие сигналы измерителей (акселерометров, гироскопов и магнитометров) и блок комплексирования сигналов различных измерителей (блок *Blokomut*).

Блоки *IMU* имитируют куловоє движение БПЛА с учетом изменения углов тангажа, крена и рыскания, формируют три составляющие кулової шкорути, кажущогося ускорення и показаний магнитометра по осям зв'язаної системи координат.

Блок *Analog Filter Viners* реалізує фільтр Винера, а блок *Bvu* по выходным сигналам этого фильтра производит вычисление углов тангажа и крена.

Результаты моделирования показали, что алгоритм, основанный на уравнениях Пуассона, дает меньшие погрешности по определению углов орієнтації, а использование фильтра Винера значительно повышает точность работы канала орієнтації для обоих алгоритмов, что свидетельствует о его эффективности.

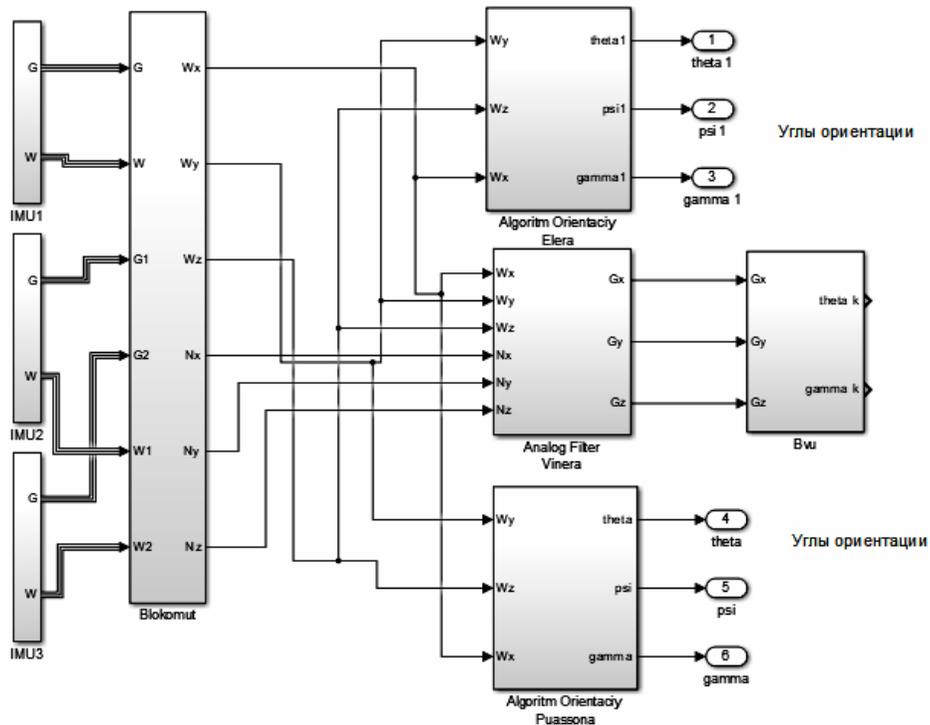


Рис. 1. Схема модели исследования алгоритмов БСО

Эффективность работы фильтра Винера зависит от настроек его коэффициентов. Фактически погрешности углов ориентации зависят только от двух коэффициентов:  $K_z$  влияет на погрешности по углу крена и  $K_x$  влияет на погрешности по углу тангажа.

Исследование комплексированного блока системы ориентации, основанного на использовании информации гироскопа, акселерометра, магнитометра и GPS приемника проводилось в составе модели БИНС, схема которой представлена на рис. 2.

Схема модели БИНС содержит блок *Imitate Object*, имитирующий угловое движение БПЛА с учетом движения аппарата вдоль Земли с линейной скоростью, а также абсолютное ускорение летательного аппарата на основе данных о составляющих ускорения по осям географической системы координат, данных об угле широты места  $\varphi$  и значений ускорения свободного падения (данные с акселерометра, магнитометра и GPS приемника).

Блок *Algorithm Quter* совместно с блоками *Anglo* и *Kvaternion(0)* системы ориентации, осуществляет решение кинематического уравнения Пуассона в кватернионах на основе информации, получаемой с *DUS*.

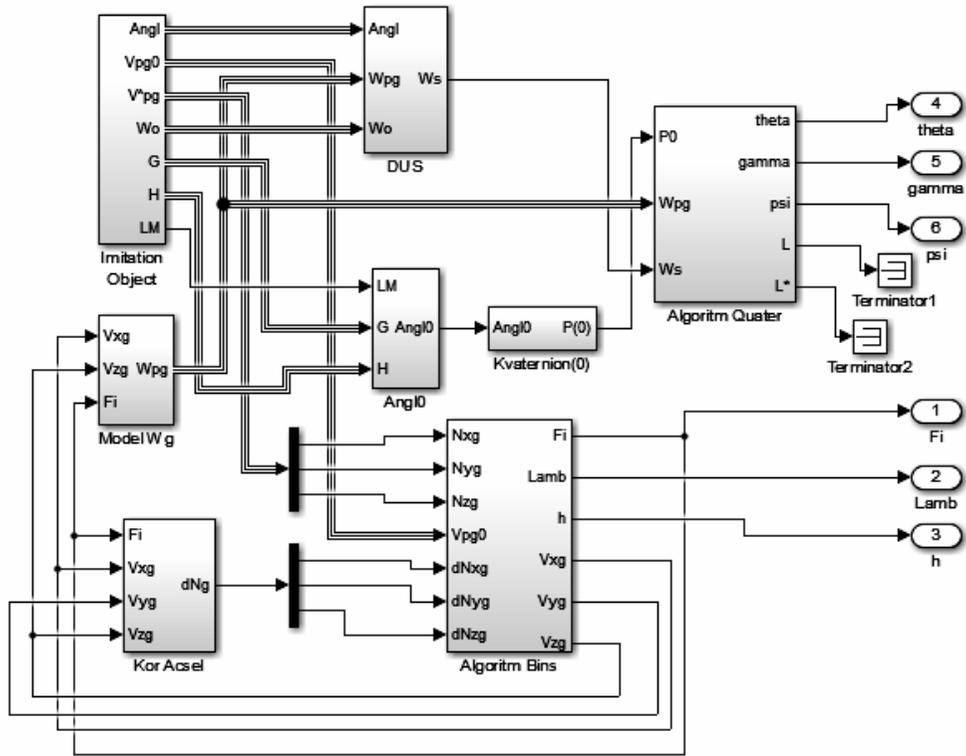


Рис. 2. Структурная схема модели комплексированного блока системы ориентации

Блок *Kor Acsel* вычисляет ошибки акселерометров, связанные с кажущимся ускорением. Эти ошибки в виде поправки  $dNg$  компенсируются перед интегрированием сигналов ускорений – в итоге получаются истинные координаты объекта.

Блок *Algoritm Bins* осуществляет интегрирование скомпенсированных сигналов акселерометров и выдает координаты объекта в виде параметров  $\varphi$ ,  $\lambda$ ,  $h$ .

Результаты экспериментов показали, что погрешности углов ориентации комплексированного БСО значительно меньше, чем для блоков с алгоритмом Пуассона и с параметрами Родрига-Гамильтона. Кроме того, как и для рассмотренных ранее алгоритмов, не все комбинации измерителей могут быть равноценно использованы для решения задач рационального управления.

**Выводы** Реализация БСО на основе углов Эйлера-Крылова или направляющих косинусов предполагает решение нелинейных кинематических уравнений при наличии критических точек, что ограничивает их применение в быстродействующих БСО, а учитывая

затраты вычислительных ресурсов на решение кинематического уравнения Пуассона, матричный способ неэкономичный.

Кинематическое уравнение для параметров Родрига-Гамильтона линейное и не вырождается.

Результаты моделирования и экспериментального исследования неортогонально расположенных измерителей свидетельствуют о достаточной точности и устойчивости алгоритмов ориентации Пуассона и в параметрах Родрига-Гамильтона.

#### **Список литературы:**

1. *Алешин Б.С.* Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / *Б.С. Алешин, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморский*; Под ред. Черноморского А.И. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 424 с.
2. *Волков В.Л.* Обработка информации в системе ориентации на основе МЭМС / *В.Л. Волков, Н.В. Жидкова* // Труды Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексева. – 2015. – № 3 (110). – С. 279-286.
3. *Кулик А.С.* Повышение точности инерциальной навигационной системы летательного аппарата / *А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, Туан До Куок, О.Ю. Златкин* // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* – 2008. – № 2 (29). – С. 50-54.
4. *Гордін О.Г.* Функціонально надлишковий інерціальний вимірювальний блок / *О.Г. Гордін, В.О. Зекіна* // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* – 2012. – № 2 (54). – С. 35-43.
5. *Алешкин М.В.* Совершенствование схем и алгоритмов предварительной обработки информации избыточных блоков инерциальных датчиков / *М.В. Алешкин.* – Автореферат диссертации. 2009. – Саратов. – 17 с.
6. *Кобылкин Ю.И.* Об ориентации осей чувствительности датчиков избыточных бесплатформенных инерциальных систем / *Ю.И. Кобылкин, М.Ю. Сосновский* // *Научный Вестник МГТУ ГА.* – 2013. – № 198. – С. 97-102.
7. *Jafari M.* Optimal redundant sensor configuration for accuracy and reliability increasing in space inertial navigation systems" / *M. Jafari, J. Roshanian* // *Journal of Navigation.* – 2013. – Vol. 66. – №. 2. – P. 199-208.
8. *Dai X.* Optimal sensor fusion in redundant inertial measurement unit / *X. Dai, L. Zhao* // *Applied Mechanics and Materials.* – 2013. – Vol. 433-435. – P. 250-253.
9. *Cheng J.* A novel optimal configuration form redundant MEMS inertial sensor based on the orthogonal rotation method / *J. Cheng, J. Dong, R.J. Landry, D. Chen* // *Journal Sensors.* – 2014. – Vol. 14. – P. 13661-13678.
10. *Jafari M.* Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system / *M. Jafari* // *Journal Aerospace Science and Technology.* – 2015. – Vol. 47. – P. 467-472.
11. *Паршин А.П.* Разработка измерительного блока системы ориентации БПЛА с неортогональным расположением чувствительных элементов. / *А.П. Паршин, Ю.А. Немшилов* // *Современная техника и технологии.* – 2016. – № 3.
12. *Красильщиков М.Н.* Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / *М.Н. Красильщиков, Г.Г. Себряков.* – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 280 с.
13. *Матвеев В.В.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / *В.В. Матвеев, В.Я. Распов.* – СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн ЦНИИ "Электроприбор", 2009. – 280 с.

14. Распопов В.Я. Метод коррекции бесплатформенной системы ориентации малоразмерного беспилотного летательного аппарата / В.Я. Распопов, М.Н. Машинин, А.В. Ладонкин, А.П. Шведов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 9. – С. 10-14.

#### **References**

1. Aleshin, B.S., Veremeenko, K.K., and Chernomorsky, A.I. (2006), *Orientation and navigation of moving objects: modern information technologies*. In Chernomorsky A.I. (Ed). FIZMATLIT, Moscow, 442 p.
2. Volkov, V.L., and Zhidkova, N.V. (2015), "Information processing in the orientation system based on MEMS". *Proceedings of the Nizhny Novgorod state. tech. University of them. R.E. Alekseeva*, Vol. 3 (110), pp. 279-286.
3. Kulik, A.S., Firsov, S.N., Do, Kuok Tuan, and Zlatkin, O.Yu. (2008), "Improving the accuracy of the inertial navigation system of the aircraft". *Radio electronics and computer system*, Vol. 2 (29), pp. 50-54.
4. Gordin, A.G., and Zekina, V.A. (2012), "Functional excess inertial measuring unit". *Electronic and computer systems*, Vol. 2 (54), pp. 35-43.
5. Aleshkin, M.V. (2009), "Improvement of schemes and algorithms for preliminary processing of information of redundant blocks of inertial sensors". *Author's thesis*, Saratov, 17 p.
6. Kobylkin, Yu.I., and Sosnovsky, M.Yu. (2013), "On the orientation of the sensitivity axes of sensors of excessive strapdown inertial systems". *Scientific Bulletin of MSTU GA*, Vol. 198, pp. 97-102.
7. Dai, X., and Zhao, L. (2013), "Optimal sensor fusion in redundant inertial measurement unit", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 433-435, pp. 250-253.
8. Cheng, J., Dong, J., Landry, R.J. and Chen, D. (2014), "A novel optimal configuration form redundant MEMS inertial sensor based on the orthogonal rotation method", *Journal Sensors*, Vol. 14, pp. 13661-13678.
9. Jafari, M. (2015), "Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system", *Journal Aerospace Science and Technology*, Vol. 47, pp. 467-472.
10. Aleshkin, V.V., Aleshkin, M.V., Sokolsky, A.S., and Matveev, A.S. (2007), "Research of information processing algorithms of an excess block of micromechanical accelerometers". *Bulletin of SSTU*, Vol. 1 (21), Issue 1, pp. 95-106.
11. Parshin, A.P., and Nemshilov, Yu.A. (2016), "Development of a measuring unit for the UAV orientation system with non-orthogonal arrangement of sensitive elements". *Modern equipment and technology*, Vol. 3.
12. Krasilshchikov, M.N., and Sebryakov, G.G. (2003), *Management and guidance of unmanned maneuverable aircraft based on modern information technologies*, FIZMATLIT, Moscow, 280 p.
13. Matveev, V.V., and Raspopov, V.Ya. (2009), *Fundamentals of the construction of strapdown inertial navigation systems*, SSC RF Concern Central Research Institute Elektropribor OJSC, St. Petersburg, 280 p.
14. Raspopov, V.Ya., Mashnin, M.N., Ladonkin, A.V., and Shvedov, A.P. (2012), "A correction method for the strapdown orientation system of a small unmanned aerial vehicle". *Mechatronics, Automation, Management*, Vol. 9, pp. 10-14.

*Статью представил д.т.н., проф. Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт" В.И. Барсов.*

*Поступила (received) 23.03.2020*

Parshin Anatoliy, PhD Tech.,  
National aerospace university the name of N.E. Zhukovskogo "KHAI"  
Str. Chkalova, 17, Kharkov, Ukraine, 61000  
Tel: (050) 167-46-20, e-mail: pap\_48@i.ua  
ORCID ID: 0000-0003-0407-0690

УДК 681.5

**Моделювання відмовостійкого каналу орієнтації безплатформової навігаційної системи в середовищі MATLAB SIMULINK / Паршин А.П.** // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2020. – № 1 (3). – С. 30 – 40.

Стаття присвячена вирішенню проблеми підвищення точності і відмовостійкості блоку системи орієнтації безпілотного літального апарату за рахунок створення функціональної надмірності на основі використання неортогонального розташування чутливих елементів. На підставі проведеного дослідження пропонується модель комплексованого вимірювального блоку системи орієнтації. Ил.: 2. Бібліограф.: 14 назв.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат; безплатформенної навігаційна система; система орієнтації; неортогональної розташування; функціональна надлишковість.

УДК 681.5

**Моделирование отказоустойчивого канала ориентации бесплатформенной навигационной системы в среде MATLAB SIMULINK / Паршин А.П.** // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2020. – № 1 (3). – С. 30 – 40.

Статья посвящена решению проблемы повышения точности и отказоустойчивости блока системы ориентации беспилотного летательного аппарата за счет создания функциональной избыточности на основе использования неортогонального расположения чувствительных элементов. На основании проведенного исследования предлагается модель комплексированного измерительного блока системы ориентации. Ил.: 2. Библиогр.: 14 назв.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат; бесплатформенная навигационная система; система ориентации; неортогональное расположение; функциональная избыточность.

UDC 681.5

**Modeling a fail-safe channel for orientation of a strapdown navigation system in MATLAB SIMULINK / Parshin A.P.** // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2020. – № 1 (3). – P. 30 – 40.

The article is devoted to solving the problem of improving the accuracy and fault tolerance of an unmanned aerial vehicle orientation system unit by creating functional redundancy based on the use of non-orthogonal arrangement of sensitive elements. Based on the study, a model of an integrated measuring unit of the orientation system is proposed. Figs.: 2. Refs.: 14 titles.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; strapdown navigation system; orientation system; non-orthogonal arrangement; functional redundancy.