

УДК 629.7.05

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-81-94

Точность определения координат беспилотного летательного аппарата с навигационным комплексом, включающим оптико-электронную систему позиционирования

А.А. Шейников¹, А.М. Коваленко¹, А.А. Санько²

¹Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь

²Белорусская государственная академия авиации, г. Минск, Беларусь

Аннотация: В статье предложены подходы к коррекции бесплатформенной инерциальной навигационной системы по информации от бортовой оптико-электронной системы беспилотного летательного аппарата. При этом оптико-электронная система представлена как датчик навигационной информации. Приводится обоснование целесообразности такого подхода, особенно в условиях отсутствия или подавления сигналов спутниковых радионавигационных систем. Точность автономной навигации предлагается обеспечить за счет организации маршрута беспилотного летательного аппарата, включающего промежуточные пункты маршрута с размещенными в них наземными навигационными ориентирами. При этом видовая информация, связанная с наземными навигационными ориентирами, заранее записана в память бортового компьютера. Система автоматической идентификации наземных навигационных ориентиров с известными координатами в очередных промежуточных пунктах маршрута с использованием имеющихся на борту данных, по сути, обеспечивает возможность альтернативного глобального позиционирования. Правильное функционирование такой комплексной навигационной системы на достаточно продолжительных участках траектории полета прежде всего зависит от точности входящих в нее элементов. С учетом того что классические датчики навигационной информации, такие как бесплатформенная инерциальная навигационная система и высотомер, достаточно хорошо исследованы в многочисленных научных публикациях, основное внимание в статье уделено бортовой оптико-электронной системе беспилотного летательного аппарата, в частности особенностям ее применения в качестве навигационного датчика. Рассмотрены факторы, влияющие на точность определения координат беспилотного летательного аппарата в промежуточных пунктах маршрута по данным бортовой оптико-электронной системы. Представлена разработанная математическая модель ошибок инерциально-оптического навигационного комплекса беспилотного летательного аппарата. Проведен анализ влияния погрешностей бортового высотомера, характеристик рельефа подстилающей местности и смещения оптической оси бортовой цифровой камеры, вызванного случайными эволюциями корпуса носителя в турбулентной атмосфере, на точность позиционирования. Приведены результаты расчета погрешностей определения координат беспилотного летательного аппарата, оснащенного инерциально-оптическим навигационным комплексом.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, бесплатформенная инерциальная навигационная система, оптико-электронная система, математическая модель ошибок инерциально-оптического навигационного комплекса.

Для цитирования: Шейников А.А., Коваленко А.М., Санько А.А. Точность определения координат беспилотного летательного аппарата с навигационным комплексом, включающим оптико-электронную систему позиционирования // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 1. С. 81–94. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-81-94

The accuracy of determining the coordinates of an unmanned aerial vehicle with a navigation complex integrating an electro-optical positioning system

A.A. Sheinikov¹, A.M. Kovalenko¹, A.A. Sanko²

¹ Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

² Belorussian State Aviation Academy, Minsk, Belarus

Abstract: The article proposes the approaches to updating a strapdown inertial navigation system (SINS) based on data of the airborne electro-optical system (EOS) of an unmanned aerial vehicle (UAV). It is specified that the EOS is presented

as a navigation data sensor. The rationale for the feasibility of such an approach is formed, especially in the terms of signal lack or suppression of satellite radio-navigation systems. It is proposed to ensure the accuracy of self-contained navigation by assigning an UAV route, including waypoints with terrestrial references (TRs). Notably, TR-associated image information is preliminarily downloaded into the flight management computer (FMC). The automated TR identification system with denoted coordinates at next waypoints, using airborne data, in fact, allows for alternative global positioning. The reliable operation of such an integrated navigation system over sufficiently extended legs of flight path, first, depends on the accuracy of its constituent elements. Taking into consideration the fact that conventional sensors of navigation information, such as a SINS and an altimeter, are quite well studied in numerous contributions. The article focuses on the UAV airborne electro-optical system and, specifically, on its application features as a navigation sensor. The factors influencing the accuracy of the UAV positioning data determination at waypoints according to the data of the airborne EOS are considered. The developed mathematical model of errors for the UAV inertial optical navigation complex (IONC) is presented. The analysis of the impact of airborne altimeter inaccuracies, earth's surface features and the shift of the onboard digital camera optical axis, caused by random evolutions of the carrier body in turbulent atmosphere on the positioning accuracy, was conducted. The results of calculating lapses in determining the UAV positioning data, equipped with IONC, are given.

Key words: unmanned aerial vehicle, strapdown inertial navigation system, electro-optical system, mathematical model of errors for the inertial optical navigation complex.

For citation: Sheinikov, A.A., Kovalenko, A.M. & Sanko, A.A. (2023). The accuracy of determining the coordinates of an unmanned aerial vehicle with a navigation complex integrating an electro-optical positioning system. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 1, pp. 81–94. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-81-94

Введение

Основными способами борьбы с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) в настоящее время являются применение стрелкового оружия, применение лазерного оружия, применение микроволновых и акустических установок для воздействия на бортовую микроэлектронику, постановка радиоэлектронных помех, воздействующих на каналы связи, спутниковой навигации и управления [1, 2]. Наиболее эффективным способом является применение средств радиоэлектронного подавления сигналов спутниковых радионавигационных систем и сигналов управления [3, 4]. Так, например, ОАО «КБ "Радар"» (Республика Беларусь) выпускает ряд средств радиоэлектронной борьбы с БЛА, имеющих дальность радиоподавления до 40 км.

В условиях подавления сигналов радиоуправления и сигналов спутниковых радионавигационных систем основным источником навигационной информации становится бортовая бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), являющаяся автономным датчиком [5]. Однако ее использование требует периодической коррекции для устранения накапливающихся погрешностей определения координат носителя [6].

Поэтому в настоящее время актуальной задачей является разработка дополнительных, более точных по сравнению с БИНС, автономных бортовых навигационных систем, основанных на других физических принципах [7–9]. Многочисленные публикации, посвященные рассматриваемой проблеме, свидетельствуют о значительном росте интереса к использованию для коррекции БИНС информации от бортовых оптико-электронных систем БЛА [10–18].

Целью данной работы является разработка математической модели ошибок инерциально-оптического навигационного комплекса БЛА для обоснования требований к характеристикам его элементов.

Методы и методология исследования

Для достижения поставленной цели был принят ряд следующих допущений.

1. БИНС определяет параметры ориентации БЛА с постоянными погрешностями.

2. Измерение пространственных координат осуществляется постоянно с помощью БИНС и периодически (в установленных навигационных точках) с помощью оптико-электронной системы (ОЭС), зафиксированной в центре масс БЛА.

C_B^N – переходная матрица поворота из системы координат ОЭС в неподвижную СК.

2. Формирование переходных матриц пересчета

Матрица перехода C_B^N из системы координат ОЭС в неподвижную СК на основе информации об угловом положении БЛА находится в соответствии с известными выражениями [10]:

$$C_B^N = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta & -\sin \vartheta & -\sin \psi \cos \vartheta \\ \sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma & \cos \vartheta \cos \gamma & \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma \\ \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma & \cos \gamma \cos \psi - \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где γ, ϑ, ψ – углы крена, тангажа и курса БЛА.

3. Определение связи между координатами БЛА и координатами ННО

В качестве модели, описывающей геометрию бортового оптического устройства, выбрана модель камеры-обскуры (рис. 1). Координаты точки местности (составляющие вектора v_P^C) связаны с пиксельными координатами на плоскости изображения (u_P, v_P) следующими соотношениями [20]:

$$x_{CP} = x_{u_P} \frac{H}{f} = \frac{(u_C - u_P) y_{CP} a_{mat}^u}{f}; \quad z_{CP} = y_{v_P} \frac{H}{f} = \frac{(v_C - v_P) y_{CP} a_{mat}^v}{f}, \quad (4)$$

где u_C, v_C – координаты (в пикселах) центра бортовой системы наблюдения; f – фокусное расстояние объектива ОЭС; H – высота полета БЛА; a_{mat}^u, a_{mat}^v – физические размеры пиксела, зависящие от типа матрицы ОЭС.

Уравнения (1)–(4) описывают связь между координатами БЛА, его угловой ориентацией и координатами ННО в неподвижной СК. В скалярной записи эти уравнения принимают вид

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{NB} = x_P - \frac{(u_C - u_P) y_{CP} a_{mat}^u}{f} \cdot \cos \psi \cos \vartheta + \frac{(v_C - v_P) y_{CP} a_{mat}^v}{f} \cdot \sin \vartheta + y_{CP} \sin \psi \cos \vartheta; \\ z_{NB} = y_P - \left(\frac{(u_C - u_P) y_{CP} a_{mat}^u}{f} \cdot (\sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma) + \right. \\ \quad \left. + \frac{(v_C - v_P) y_{CP} a_{mat}^v}{f} \cdot \cos \vartheta \cos \gamma + y_{CP} (\cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma) \right); \\ y_{NB} = y_P + \left(\frac{(u_C - u_P) y_{CP} a_{mat}^u}{f} \cdot (\sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma) - \right. \\ \quad \left. - \frac{(v_C - v_P) y_{CP} a_{mat}^v}{f} \cdot \cos \vartheta \sin \gamma + y_{CP} (\cos \gamma \cos \psi - \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma) \right). \end{array} \right. \quad (5)$$

Изображение, полученное в процессе аэрофотосъемки, содержит искажения геометрического и физического характера [20]. Факторы, влияющие на точность определения координат БЛА по данным ОЭС, представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Факторы, влияющие на точность определения координат БЛА по данным ОЭС
Factors, determining the accuracy of identifying UAV coordinates according to EOS data

Фактор	Краткое описание
Смещения точек, вызванные ошибкой определения высоты	Точность оптической системы зависит от погрешности измерений бортового высотомера. Основными источниками информации о высоте полета для малоразмерных БЛА являются барометрические и радиовысотомеры
Смещения точек на снимке, вызванные рельефом местности	Масштаб изображения точек возвышения рельефа крупнее масштаба изображения точек средней плоскости снимка. Масштаб изображения точек понижения рельефа мельче масштаба изображения точек средней плоскости снимка
Смещения точек на снимке, вызванные наклоном оптической оси	На наклонном снимке точки смещены от положений, которые они должны занимать на горизонтальном снимке, полученном той же камерой из того же центра проекции. Основным источником возникновения погрешностей являются ошибки определения углов ориентации БЛА с помощью бортовой БИНС

4. Оценка влияния погрешности бортового высотомера на точность позиционирования

Приближенная оценка погрешности измерения текущей высоты полета с помощью радиовысотомера (РВ) на высотах от 60 до 750 м над равнинной местностью с вероятностью 95 % может быть рассчитана по формуле $\Delta H = \pm 0,06H$. В литературе [21] приводится вариант оценки СКО ошибки измерения истинной высоты с помощью радиовысотомера:

$$\sigma_H = \frac{c}{4\pi\nu q T_H}, \quad (6)$$

где c – скорость света в вакууме; ν – скорость изменения частоты; q – отношение сигнал/шум; T_H – длина интервала наблюдения.

На рис. 2 показано графическое представление влияния погрешности определения высоты на точность позиционирования без учета изменений рельефа местности. Ошибка позиционирования, обусловленная погрешностью определения высоты полета БЛА, может быть рассчитана по формуле [20]

$$\sigma_{PB, OЭС}^H = r \frac{\sigma_H}{H}. \quad (7)$$

Также на рис. 2 представлены результаты моделирования при следующих начальных условиях: $H = 500$ м, $\sigma_H = 10$ м. Координата ННО (точка А) отдалается от проекции главной точки (точка О на рис. 2) до момента выхода за пределы ПЗС-матрицы (картинной плоскости). При этом в каждой точке производится измерение координат проекции ННО. Распределение оценок СКО проекций ННО на ПЗС-матрицу показано на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что при увеличении отдаления координаты ННО от проекции главной точки картинной плоскости происходит увеличение значений СКО проекций ННО на плоскость изображения.

5. Оценка влияния рельефа местности на точность позиционирования

Согласно инструкции¹ местность по характеру рельефа делится на группы (табл. 2).

Смещение точек на кадре, вызванное влиянием рельефа местности, объясняется тем, что масштаб их изображений крупнее масштаба средней плоскости снимка при поло-

¹ Инструкция по топографической съемке: [ГКИНП-02-033-82: введен 01.01.1983]. М.: Недра, 1985. 151 с.

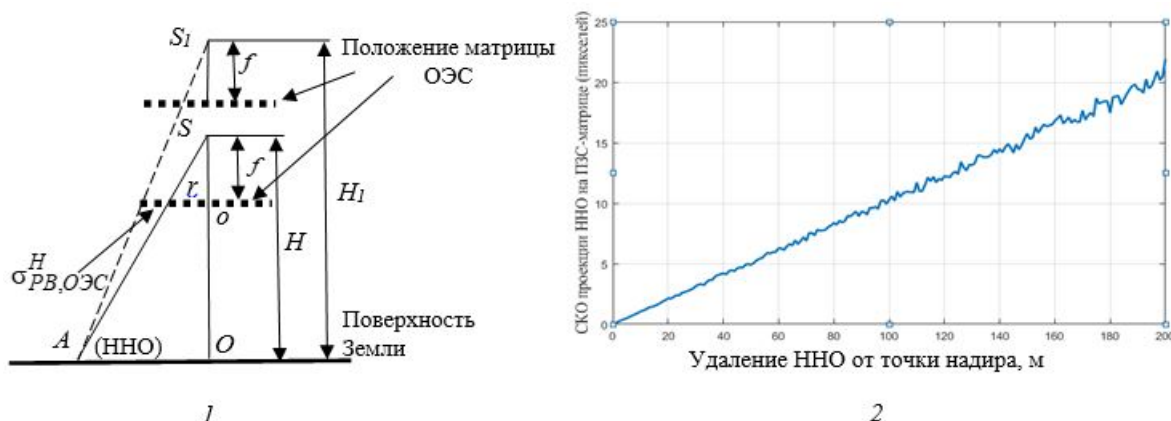


Рис. 2. Влияние погрешностей высотомера на точность позиционирования:
1 – графическое представление влияния погрешности определения высоты;
2 – смещение проекции ННО

Fig. 2. Effect of altimeter lapses on the positioning accuracy:
1 – graphical representation of the lapse effect of determining height; 2 – TR projection offset

Таблица 2
Table 2

Классификация рельефа по крутизне земной поверхности
Classification of the relief according to earth's surface gradient

Тип рельефа	Угол наклона α_m , град	Перепад рельефа h_m на 100 м, м
Равнинно-плоский	до 0,5	до 0–9
Равнинно-волнистый	0,5–1	0,9–1,75
Равнинно-холмистый	1–4	1,75–7
Холмистый	4–7	7–12,3
Гористый	7–24	12,3–44,5

жительном превышении и мельче при отрицательном превышении. Линейное искаже-

ние, обусловленное перепадом рельефа h_m , может быть оценено следующим образом:

$$\sigma_{OЭC}^{PM} = \frac{h_m r \cos \alpha_m}{H h_m} \sqrt{1 + \frac{f^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_m}{r^2} + 2 \frac{f \operatorname{tg} \alpha_m}{r} \cdot \sin \varphi}, \quad \sigma_{OЭC}^{PM} = r \frac{h_m}{H} \quad \text{при } \alpha_m = 0. \quad (8)$$

Графическое представление влияния перепада рельефа на положение проекции ННО в кадре, смещение проекции для различных типов рельефа показано на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что, если ННО располагается на средней плоскости снимка (совпадает с точкой надира), смещение точек отсутствует. Для уменьшения влияния перепада рельефа местности следует увеличивать высоту съемки либо фокусное расстояние.

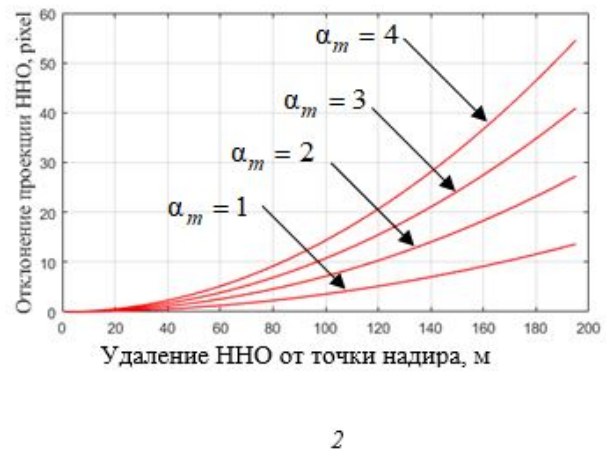
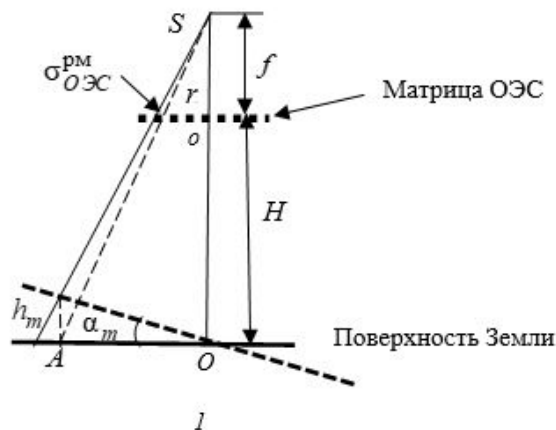


Рис. 3. Влияние перепада рельефа на положение проекции ННО на матрицу ОЭС:
1 – графическое представление влияния перепада рельефа; 2 – смещение проекции ННО для различных α_m

Fig. 3. Influence of relief difference on the TR projection position on the EOS matrix:
1 – graphical representation of relief difference effect; 2 – TR projection offset for various α_m

6. Оценка влияния смещения оптической оси цифровой камеры на точность определения координат БЛА инерциально-оптическим навигационным комплексом

На малоразмерных БЛА ОЭС жестко закреплена в корпусе фюзеляжа. При таком исполнении угол наклона оптической оси цифровой камеры определяется по данным бортовой БИНС. Погрешности определения углов крена и тангажа в момент съемки влияют на точность определения положения ННО в координатной системе изображения. На наклонном снимке точки смещены от положений, которые они должны занимать на горизонтальном снимке, полученном той же ОЭС из того же центра проекции (рис. 4).

Оценка смещения точки на снимке, вызванного его наклоном, находилась следующим образом [20]:

$$\sigma_{\text{ИОНК}}^{\text{БИНС}} = \frac{r^2 \cos \varphi \sin(\alpha_c \sigma_9^{\text{БИНС}})}{f}, \quad (9)$$

где r – радиус-вектор от точки нулевых искажений до точки на снимке; α_c – суммарный угол наклона снимка; φ – угол поворота радиус-вектора против часовой стрелки от полярной оси, который характери-

зует точку проекции ННО на ПЗС-матрицу ОЭС.

На рис. 5 показаны результаты моделирования смещения проекции ННО на ПЗС-матрицу ОЭС при изменении координаты ННО. При полете БЛА над ННО на высоте $H = 500$ м, когда оптическая ось направлена на надир ($\alpha_c = 0$), точность бортовой БИНС при определении углов тангажа и крена составляет $\sigma_9^{\text{БИНС}} = \sigma_\gamma^{\text{БИНС}} = 0,5^\circ$. ННО находится на линии заданного пути ($\varphi = 0$). Также на рис. 5 показаны результаты моделирования в случае установки оптической оси ОЭС на угол $\alpha_c = 15^\circ$ при угле φ равном: $\varphi = 0^\circ, \varphi = 30^\circ, \varphi = 60^\circ, \varphi = 90^\circ$.

Из рис. 5 видно, что величина искажения $\sigma_{\text{ИОНК}}^{\text{БИНС}}$ тем больше, чем больше угол наклона α_c и чем меньше фокусное расстояние камеры f . При постоянных значениях α_c и f величина искажения зависит от положения точки на снимке, т. е. от величин угла φ и радиуса вектора r . На линии неискаженных масштабов $h_c - h_c$ величины искажений $\sigma_{\text{ИОНК}}^{\text{БИНС}}$ равны нулю. Результирующее соот-

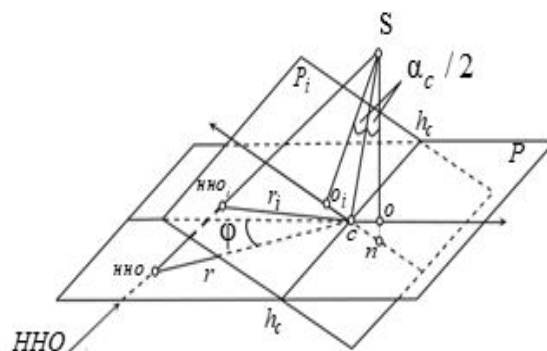


Рис. 4. Смещение точек в кадре, обусловленное углами крена и тангажа
Fig. 4. Shift of points in the image specified with roll and pitch angles

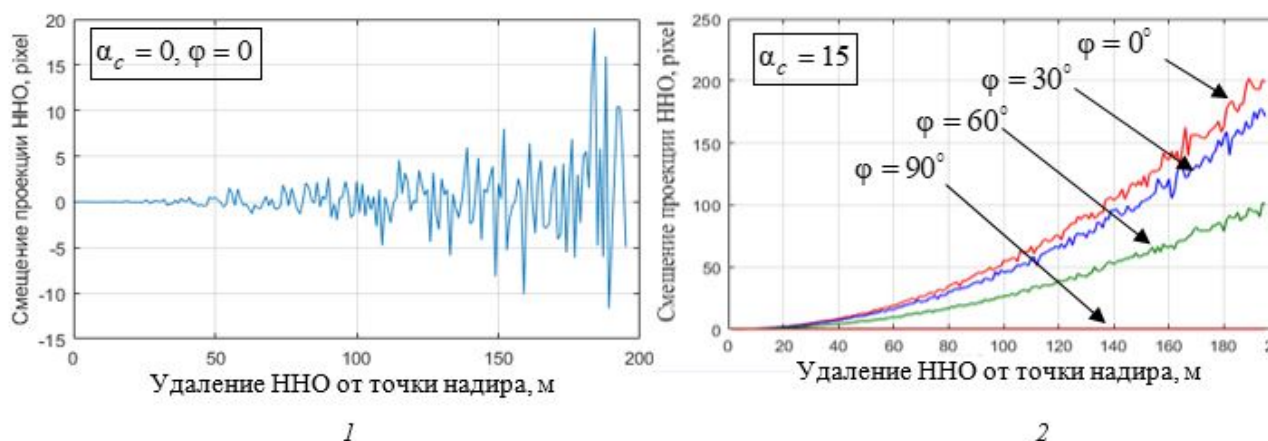


Рис. 5. Линейные искажения, вызванные влиянием угла наклона плоскости изображения:
1 – смещение проекции ННО при $\alpha_c = 0$, $\varphi = 0$; 2 – смещение проекции ННО при $\alpha_c = 15$
Fig. 5. Linear distortions caused by the effect of the inclination angle of the image plane:
1 – TR projection offset at $\alpha_c = 0$, $\varphi = 0$; 2 – TR projection offset at $\alpha_c = 15$

ношение для расчета СКО ошибок определения координат БЛА имеет вид

$$\sigma_R = \sqrt{(\sigma_{PB, OЭС}^H)^2 + (\sigma_{OЭС}^{PM})^2 + (\sigma_{ИОНК}^{БИНС})^2}. \quad (10)$$

В результате проведенных исследований получена математическая модель ошибок ИОНК (включающего БИНС, ОЭС и РВ) (рис. 6).

В процессе исследований проведено моделирование пролета БЛА, оснащенного ИОНК (включающим БИНС, РВ и ОЭС).

Имитировался пролет БЛА над точкой, представляющей собой центр ННО, с известными координатами. Во время пролета ОЭС фиксировала ее координаты с частотой 10 кадров/с. Далее по полученной информации, с учетом погрешностей определения высоты и угловой ориентации носителя, рассчитывались координаты БЛА в неподвижной СК. В качестве бортовой ОЭС была выбрана цифровая камера Sony ILCE-600. Значения параметров моделирования указаны в табл. 3 [22].

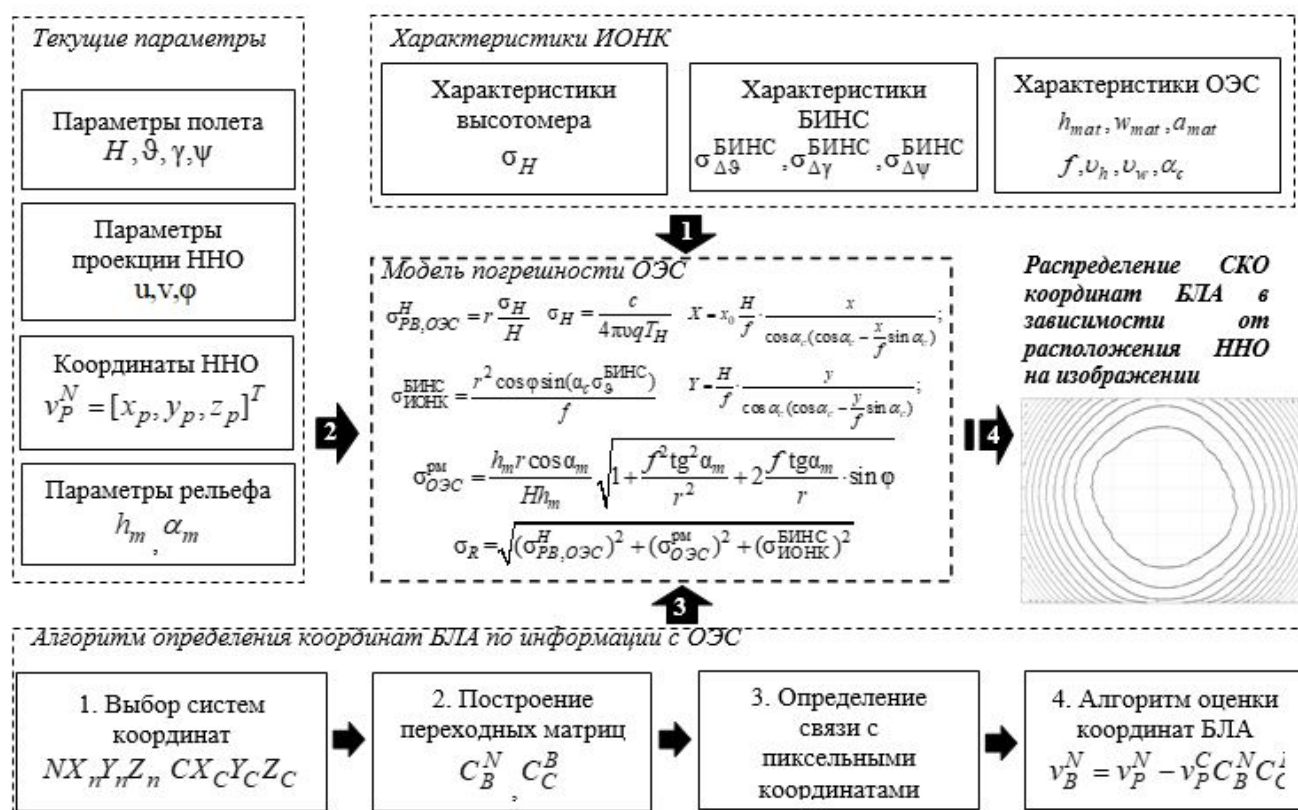


Рис. 6. Математическая модель ошибок ИОНК
Fig. 6. Mathematical model of IONC errors

Таблица 3
Table 3

Параметры моделирования
Simulation parameters

Параметр	Значение
Высота полета, м	500
Погрешность высотомера (СКО, м)	20
Значения углов ориентации БЛА, град (γ, ϑ, ψ)	0–15, 0–15, 0–15
Погрешность БИНС при определении углов ориентации	(0,5; 0,5; 1)
Размер матрицы ОЭС, мм	15,6 × 23,5
Разрешение снимка, пиксели	6000 × 4000
Фокусное расстояние, мм	20
Значение перепада рельефа h_m на 100 м, м	2

Результаты исследования

В процессе моделирования были получены графики распределения значений СКО

ошибок определения координат БЛА в зависимости от высоты полета БЛА, угла установки оптической оси ОЭС и удаления ННО от точки надира (рис. 7).

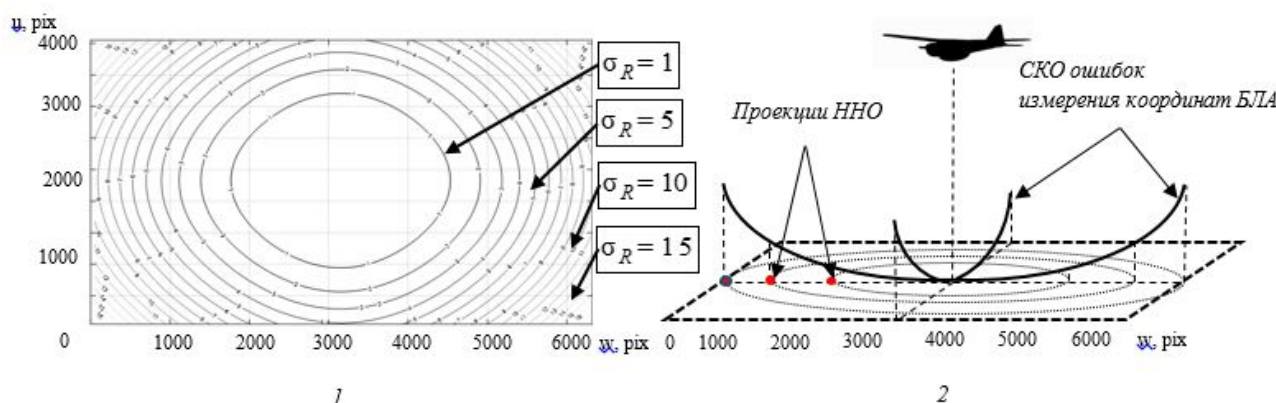


Рис. 7. Распределение значений СКО ошибок определения координат БЛА:
1 – на плановом снимке; 2 – в трехмерном представлении
Fig. 7. Distributions of standard deviation values of identifying UAV coordinates:
1 – in the routine image; 2 – in the three-dimensional representation

Обсуждение полученных результатов

Анализ результатов моделирования показал, что при оценке координат БЛА по перспективным изображениям погрешность значительно увеличивается. Наименьшее значение ошибок определения координат БЛА достигается при нахождении ННО в центре планового снимка. Таким образом, исследования показали, что имеется возможность существенно снизить погрешности определения координат БЛА и тем самым повысить точность позиционирования БЛА в условиях радиоэлектронного подавления. Так, например, при высоте полета БЛА $H = 500$ м над равнинным рельефом, скорости полета 20 м/с, расстоянии до ННО 3000 м, СКО оценок истинной высоты радиовысотометром $\sigma_H = 10$ м, СКО оценок углов ориентации БИНС $\sigma_{\gamma}^{\text{БИНС}} = \sigma_{\theta}^{\text{БИНС}} = 0,5^\circ$ бортовой ОЭС на базе цифровой камеры Sony ILCE-600, установленной в нади́р, можно снизить (по сравнению с БИНС) ошибку определения координат на порядок (с 150 до 14 м). На рис. 8

показаны результаты сравнительного анализа точности БИНС и ИОНК. Коррекция навигационной информации БИНС по данным ОЭС производилась по разомкнутой схеме комплексирования [23].

Проверка адекватности разработанной математической модели ИОНК осуществлялась путем сравнения результатов моделирования с результатами полунатурного эксперимента. Полеты БЛА С-350 Supercam с камерой, схожей по характеристикам с камерой Sony ILCE-600, осуществлялись на высотах 300, 500, 900 м, координаты ННО получались по данным картографического сервиса Google Maps, также использовались данные телеметрии БЛА. В результате сделан вывод: расчетная и экспериментальные выборки оцениваемых параметров качества (ошибка определения координат БЛА) принадлежат одной и той же генеральной совокупности по критерию Пирсона χ^2 [24, 25]. Полученная степень адекватности математической модели – высокая (доверительная вероятность результатов математического моделирования более 0,9 при относительной погрешности не более 10 %).

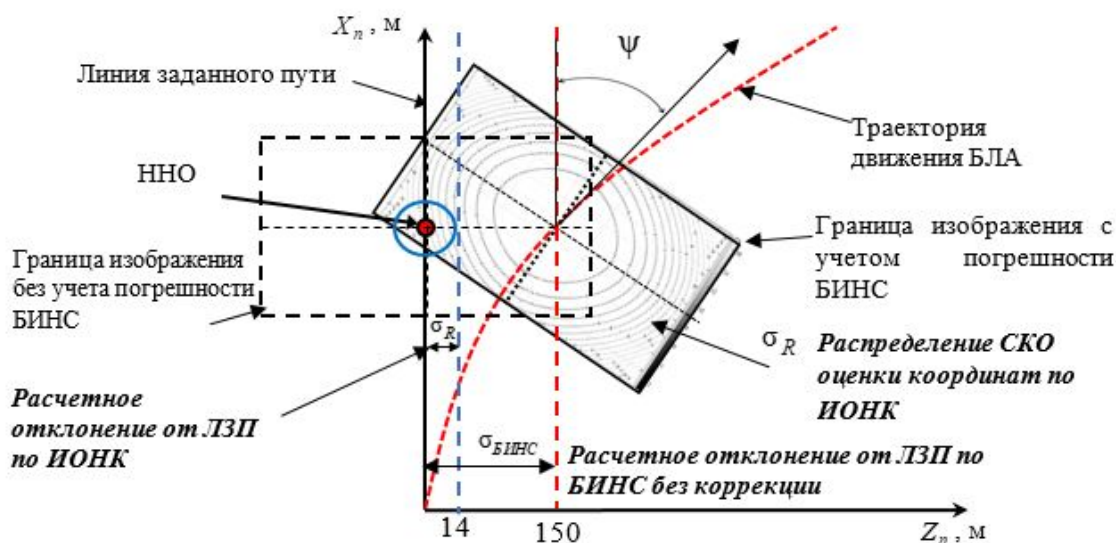


Рис. 8. Результаты сравнительного анализа точности БИНС и ИОНК, работающих автономно

Fig. 8. Results of the comparative analysis of self-contained SINS and IONC accuracy

Заключение

Таким образом, разработанная математическая модель ИОНК БЛА отличается учетом погрешности определения истинной высоты полета БЛА, погрешностей определения углов ориентации БЛА, что позволяет обосновать требования к характеристикам элементов ИОНК: цифровой камере, бортовому высотомеру и БИНС БЛА. В случае удовлетворения этих требований точность определения координат предлагаемым навигационным комплексом может на порядок превышать точность определения координат БИНС БЛА в условиях отсутствия внешних радиосигналов управления и сигналов спутниковых радионавигационных систем.

Список литературы

1. Теодорович Н.Н., Строганова С.М., Абрамов П.С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами [Электронный ресурс] // Интернет-журнал Науковедение. 2017. Т. 9, № 1. С. 13. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf> (дата обращения: 09.08.2022).
2. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: моно-

графия. СПб.: Научные технологии, 2020. 204 с.

3. Akos D.M. Who's afraid of the spoofer? GPS/GNSS spoofing detection via automatic gain control (AGC) // Journal of the Institute of Navigation. 2012. Vol. 59, no.4. Pp. 281–290. DOI: 10.1002/navi.19

4. Seong-Hun S. Effect of spoofing on unmanned aerial vehicle using counterfeited GPS signal / S. Seong-Hun, L. Byung-Hyun, I. Sung-Hyuck, J. Gyu-In // Journal of Positioning Navigation and Timing. 2015. Vol. 4, iss. 2. Pp. 57–65. DOI: 10.11003/JPNT.2015.4.2.057

5. Алалуев Р.В., Ладонкин А.В., Малиутин Д.М. и др. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / Под ред. В.Я. Распопова. М.: Машиностроение, 2011. 184 с.

6. Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Способы коррекции навигационных систем и комплексов летательных аппаратов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2012. № 3 (3). С. 44.

7. Сырякин В.И., Шидловский В.С. Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы. Томск: Изд-во Томского университета, 2010. 316 с.

8. **Аванесов Г.А.** Принципы построения астроинерциальной системы авиационного применения / Г.А. Аванесов, Р.В. Бессонов, А.Н. Куркина, М.Б. Людомирский, И.С. Каютин, Н.Е. Ямщиков // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2013. Т. 10, № 2. С. 9–29.

9. **Амелин К.С.** Метод ориентирования сверхлегкого БПЛА при редком обновлении данных о его местоположении // Стохастическая оптимизация в информатике. 2014. Т. 10, № 2. С. 3–14.

10. **Веремеенко К.К., Желтов С.Ю., Ким Н.В.** Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / Под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова. М.: Физматлит, 2009. 272 с.

11. **Алешин Б.С.** Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Б.С. Алешин, А.А. Афонин, К.К. Веремеенко, Б.В. Кошелев, В.Е. Плеханов. М.: Физматлит, 2006. 421 с.

12. **Lerner R., Rivlin E.** Direct method for video-based navigation using a digital terrain map // IEEE Trans Pattern Anal Mach Intelligence. 2011. Vol. 33, no. 2. Pp. 406–411. DOI: 10.1109/TPAMI.2010.171

13. **Биард Р., Маклэйн Т.** Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. М.: Техносфера, 2015. 312 с.

14. **Хекер П.** Позиционирование ЛА по видеоданным для контроля интегрированной навигационной системы при заходе на посадку / П. Хекер, У. Бестманн, С.Ю. Волков, М. Ангерманн, А. Декирт // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27, № 4 (107). С. 29–51. DOI: 10.17285/0869-7035.0011

15. **Антонов Д.А.** Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений / Д.А. Антонов, М.В. Жарков, И.М. Кузнецов, Е.М. Лунев, А.Н. Пронькин [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 1–26. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=75632> (дата обращения: 14.06.2022).

16. **Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В.** Перспективы интеллектуализации систем управ-

ления ЛА за счет применения технологий машинного зрения // Труды МФТИ. 2009. Т. 1, № 4. С. 164–181.

17. **Алпатов Б.А.** Исследование эффективности применения алгоритмов анализа изображений в задаче навигации беспилотных летательных аппаратов / Б.А. Алпатов, В.С. Муравьев, В.В. Стротов, А.Б. Фельдман // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 3. С. 29–34.

18. **Lee D., Kim Y., Bang H.** Vision-based terrain referenced navigation for unmanned aerial vehicles using homography relationship // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2013. No. 69. Pp. 489–497. DOI: 10.1007/s10846-012-9750-1

19. **Николаев С.В.** Определение в испытаниях вероятности обнаружения наземных объектов с борта летательного аппарата // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 5. С. 131–144. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-131-144

20. **Назаров А.С.** Фотограмметрия. Минск: ТетраСистемс, 2006. 368 с.

21. **Монаков А.А.** Теоретические основы радионавигации: учеб. пособие. СПб.: СПбГУАП, 2002. 70 с.

22. **Матвеев В.В.** Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. № 9-2. С. 251–267.

23. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации: монография. СПб.: ГНЦ РФ: ЦНИИ «Электроприбор», 1998. 370 с.

24. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. М.: Академия, 2005. 576 с.

25. **Козбарь А.И.** Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников / Под ред. В.С. Ороловича. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2012. 816 с.

References

1. **Teodorovich, N.N., Stroganova, S.M. & Abramov, P.S.** (2017). *Methods for detection and control of small-sized unmanned aerial vehicles*. Internet-zhurnal Naukovedeniye, vol. 9,

no. 1, p. 13. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf> (accessed: 09.08.2022). (in Russian)

2. **Makarenko, S.I.** (2020). [*Countermeasures against unmanned aerial vehicles: Monography*]. St. Petersburg: Naukoyemkiye tehnologii, 204 p. (in Russian)

3. **Akos, D.M.** (2012). *Who's afraid of the spoofer? GPS/GNSS spoofing detection via automatic gain control (AGC)*. Journal of the Institute of Navigation, vol. 59, no. 4, pp. 281–290. DOI: 10.1002/navi.19

4. **Seong-Hun, S., Byung-Hyun, L., Sung-Hyuck, I. & Gyu-In, J.** (2015). *Effect of spoofing on unmanned aerial vehicle using counterfeited GPS signal*. Journal of Positioning Navigation and Timing, vol. 4, issue 2, pp. 57–65. DOI: 10.11003/JPNT.2015.4.2.057

5. **Alaluev, R.V., Ladonkin, A.V. & Malyutin, D.M. et al.** (2011). [*Microsystems of orientation of unmanned aerial vehicles*], in Raspopov V.Ya. (Ed.). Moscow: Mashinostroyeniye, 184 p. (in Russian)

6. **Proletarsky, A.V. & Neusypin, K.A.** (2012). *Methods for correction of navigation systems and complexes of flying vehicles*. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman, no. 3 (3), p. 44. (in Russian)

7. **Syryamkin, V.I. & Shidlovskiy, V.S.** (2010). [*Correlation-extreme radio navigation systems*]. Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo universiteta, 316 p. (in Russian)

8. **Avanesov, G.A., Bessonov, R.V., Kurkina, A.N., Ludomirskiy, M.B., Kayutin, I.S. & Yamshikov, N.E.** (2013). *The principles of creating airborne stellar-inertial system*. Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa, vol. 10, no. 2, pp. 9–29. (in Russian)

9. **Amelin, K.S.** (2014). [*Positioning methods for ultra-light unmanned aerial vehicles with a rare update of its location data*]. Stokhasticheskaya optimizatsiya v informatike, vol. 10, no. 2. pp. 3–14. (in Russian)

10. **Veremeenko, K.K., Zheltov, S.Yu. & Kim, N.V.** (2009). [*Modern IT technologies for unmanned maneuverable aerial vehicles navigating and guidance*], in Krasilshchikov M.N.,

Serebryakov G.G. (Ed.). Moscow: Fizmatlit, 272 p. (in Russian)

11. **Alyoshin, B.S., Afonin, A.A., Veremeenko, K.K., Koshelev, B.V. & Plekhanov, V.E.** (2006). [*Positioning and navigation of moving objects: modern IT*]. Moscow: Fizmatlit, 423 p. (in Russian)

12. **Lerner, R. & Rivlin, E.** (2011). *Direct method for video-based navigation using a digital terrain map*. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intelligence, vol. 33, no. 2, pp. 406–411. DOI: 10.1109/TPAMI.2010.171

13. **Beard, R.W. & McLain, T.W.** (2012). *Small unmanned aircraft: theory and practice*. 2nd ed. Princeton University Press, 320 p.

14. **Hecker, P., Bestmann, U., Wolkow, S., Angermann, M. & Dekiert, A.** (2019). *Optical aircraft positioning for monitoring of the integrated navigation system during landing approach*. Giroskopiya i Navigatsiya, vol. 27, no. 4 (107), pp. 29–51. DOI: 10.17285/0869-7035.0011

15. **Antonov, D.A., Zarkov, M.V., Kuznecov, I.M., Lunev, E.M. & Pron'kin, A.N.** (2016). *Unmanned aerial vehicle positioning based on photographic image and inertial measurements*. Trudy MAI, no. 91, pp. 1–26. Available at: <https://pureportal.spbu.ru/publications> (accessed: 14.06.2022). (in Russian)

16. **Zhelto, S.Yu. & Vizilter, Yu.V.** (2009). [*Possibilities for the intellectualization of aircraft control systems through the use of machine vision technologies*]. Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology, vol. 1, no. 4, pp. 164–181. (in Russian)

17. **Alpatov, B.A., Muraviev, V.S., Strotov, V.V. & Feldmann, A.B.** (2012). [*Research of the effectiveness of the image application analysis algorithms in the problem of navigating unmanned aerial vehicles*]. Digital Signal Processing, no. 3, pp. 29–34. (in Russian)

18. **Lee, D., Kim, Y. & Bang, H.** (2013). *Vision-based terrain referenced navigation for unmanned aerial vehicles using homography relationship*. Journal of Intelligent & Robotic Systems, no. 69, pp. 489–497. DOI: 10.1007/s10846-012-9750-1

19. **Nikolaev, S.V.** (2017). *Test determination of probability of airborne detection of*

ground surface objects. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 5, pp. 131–144. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-131-144 (in Russian)

20. **Nazarov, A.S.** (2006). [*Photogrammetry*]. Minsk: TetraSystems, 368 p. (in Russian)

21. **Monakov, A.A.** (2002). [*Theoretical foundations of radio navigation: Tutorial*]. St. Petersburg: SPbGUAP, 70 p. (in Russian)

22. **Matveev, V.V.** (2014). *The engineering analysis of lapses of strapdown inertial navigational system*. Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiiye nauki, no. 9-2. pp. 251–267. (in Russian)

23. **Stepanov, O.A.** (1998). [*A use of the nonlinear filtering theory in the processing navigational information: monograph*]. St. Petersburg: GNTS RF: TSNII «Elektropribor», 370 p. (in Russian)

24. **Ventzel, E.S.** (2005). [*Probability theory*]. Moscow: Academiya, 576 p. (in Russian)

25. **Kozbar, A.I.** (2012). [*Applied mathematical statistics: for engineers and scientists*], in Orolovich V.S. (Ed.). 2nd ed., ispr. Moscow: Fizmatlit, 816 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Шейников Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры авиационной техники и вооружения учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», af.varb.ao@gmail.com.

Коваленко Александр Михайлович, старший преподаватель кафедры авиационной техники и вооружения авиационного факультета учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», AMKovalenko@outlook.com.

Санько Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры воздушных судов и авиационного оборудования военного факультета учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», nimiz75@mail.ru.

Information about the authors

Aleksey A. Sheinikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Postdoctoral Student of the Aeronautical Equipment and Weapons Chair, Educational Institution “Military Academy of the Republic of Belarus”, af.varb.ao@gmail.com.

Alexander M. Kovalenko, Senior Lecturer of the Aeronautical Equipment and Weapons Chair, Aviation Faculty, Educational Institution “Military Academy of the Republic of Belarus”, AM-Kovalenko@outlook.com.

Andrey A. Sanko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, The Head of the Aircraft and Aeronautical Equipment Chair, Military Faculty, Educational Institution “Belarussian State Aviation Academy”, nimiz75@mail.ru.

Поступила в редакцию 14.09.2022
Принята в печать 26.01.2023

Received 14.09.2022
Accepted for publication 26.01.2023