



УДК 629.7.054.07
ГРНТИ 78.25.31

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ КОЛЬЦЕВОГО МОНОБЛОЧНОГО ГИРОСКОПА БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Н.А. УС, доктор технических наук, профессор
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
А.А. АВЕРШИИ
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье предложена методика расчета оптимальной оптической схемы кольцевого моноблочного гироскопа. Данная методика позволяет проектировать устойчивую оптическую схему по критерию максимальной добротности в соответствии с заданными тактико-техническими требованиями к объекту управления для последующего использования в качестве совокупности резервируемых датчиков угловых скоростей бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата военного назначения. На ее основе разработан алгоритм расчета оптимальной оптической схемы кольцевого моноблочного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом.

Ключевые слова: гироскоп, резонатор Фабри-Перо, добротность, резонатор-расщепитель, оптический смеситель.

THE MILITARY STRAP DOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM RING MONOBLOCK GYROSCOPE OPTICAL SCHEME CALCULATION METHOD

*N.A. US, Doctor of Technical sciences, Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
A.A. AVERSHIN
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The paper proposes a method for calculating the optimal optical scheme of a ring monoblock gyroscope. This technique allows to design a stable optical scheme according to the criterion of maximum Q-factor in accordance with the specified tactical and technical requirements for the control object for subsequent use as a set of reserved angular velocity sensors of a strapdown inertial navigation system of a military unmanned aerial vehicle. On its basis, an algorithm for calculating the optimal optical scheme of a ring monoblock gyroscope with a semiconductor laser diode has been developed.

Keywords: gyroscope, Fabry-Perot resonator, Q factor, splitter resonator, optical mixer.

Введение. Беспилотные летательные аппараты (БЛА) – неотъемлемая часть современных боевых действий в конфликтах различного рода. Они применяются для ведения разведки, наведения высокоточного оружия, радиоэлектронной борьбы и сами могут являться ударными средствами поражения. Однако, на сегодняшний день большинство БЛА – дистанционно управляемые летательные аппараты, которые критически зависят от командных пунктов управления (ПУ) и спутниковых навигационных систем (СНС). Именно против этих коммуникационных систем, в первую очередь, направлены действия противника с целью их подавления путем применения средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Одновременно



предпринимаются попытки перехвата контуров управления летательного аппарата. Все это приводит к срыву боевого задания БЛА.

Актуальность. Автономный полет БЛА предполагает наличие высокоточной и надежной навигационной системы, реализующей помехозащищенный режим работы. Данный режим возможен при использовании бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), использующих чувствительные элементы (ЧЭ) тактического и стратегического уровней, к которым относятся лазерные гироскопы. В настоящее время в авиации нашли применение лазерные гироскопы типа кольцевой газовой гироскоп (КГЛ) и волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) [1]. Однако, применение датчиков угловых скоростей (ДУС) такого типа пока не позволяет создавать блоки ЧЭ с резервированием таких элементов. Перспективным, в этом плане, является ЧЭ на основе кольцевого моноблочного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом (КМГ с ПЛД) [2].

Применение средств инерциальной навигации является необходимым условием использования БЛА в обстановке активного радиоэлектронного противодействия со стороны противника. Они позволяют беспилотным системам выполнять разведывательные и ударные миссии даже в случае полной потери связи с ПУ и подавления сигналов от СНС. По мнению зарубежных и отечественных специалистов, единственным на сегодня, надежным решением для выполнения БЛА боевого задания в условиях противодействия современных средств РЭБ является установка на его борт БИНС комплексированной со специальными устройствами, которые распознают вмешательство в управление аппаратом и переводят его полностью в автономный режим. В этом случае навигация осуществляется за счёт координат, выдаваемых БИНС, и летательный аппарат продолжает выполнять боевое задание по заранее запрограммированному полету.

Цель исследования – разработка методики оптимизации оптической схемы КМГ БИНС БЛА военного назначения для применения в качестве резервируемого ДУС блока ЧЭ.

Существующая методика построения структурной схемы БИНС БЛА такого типа определяет требования к реализации ДУС следующих возможностей: управление чувствительностью гироскопа за счет масштабирования треугольного оптического моноблока КМГ и варьирования мощностью оптического излучения ПЛД; организацию нормального режима блока ЧЭ под управлением информационно-управляющей системы БЛА в сочетании с контролем системы функционирования драйверов микроощного ПЛД, условиями работоспособности ДУС и совмещенной системой компенсации ошибок его номера в процессе замещения отказавших элементов [3].

Разработанная методика оптимизации оптической схемы КМГ базируется на разработанных математических моделях элементов обвязки оптического контура: 1) оптическом резонаторе-расщепителе (РР); 2) зеркалах полного отражения; 3) интерференциальном смесителе (СМ), совмещенным с юстировочной схемой оптического контура; 4) объемных цилиндрических резонаторах в узлах оптического контура моноблока по типу Фабри-Перо.

В качестве критерия в методике предлагается использовать показатель максимальной добротности. В этом случае динамический диапазон управления предельной чувствительностью датчика будет максимальным, а снижение энергетического режима в системе накачки оптического контура повысит надежность источника лазерного излучения и улучшит температурный режим моноблока, что определяет в конечном итоге точность и надежность БИНС БЛА военного назначения.

Исследуемая оптическая схема КМГ является модификацией треугольной базовой оптической схемы КМГ с ПЛД и ориентирована на купирование возможных энергетических потерь за счет технологических погрешностей в процессе производства прибора. Схема отличается симметрией относительно линии «резонатор-расщепитель – смеситель – фотоприемник» (РР–СМ–ФП), что позволяет преодолеть возможный захват частот в оптической схеме за счет создания автоматической внутренней взаимной фазовой модуляции [4].



Разработанный алгоритм (рисунок 1) реализует механизм выбора оптимальной оптической схемы для КМГ с ПЛД, позволяющей выполнить тактико-технические требования (ТТТ) к ЧЭ БИНС БЛА военного назначения.

Представленный алгоритм проектирования оптимальной оптической схемы КМГ для БИНС объединяет три этапа.

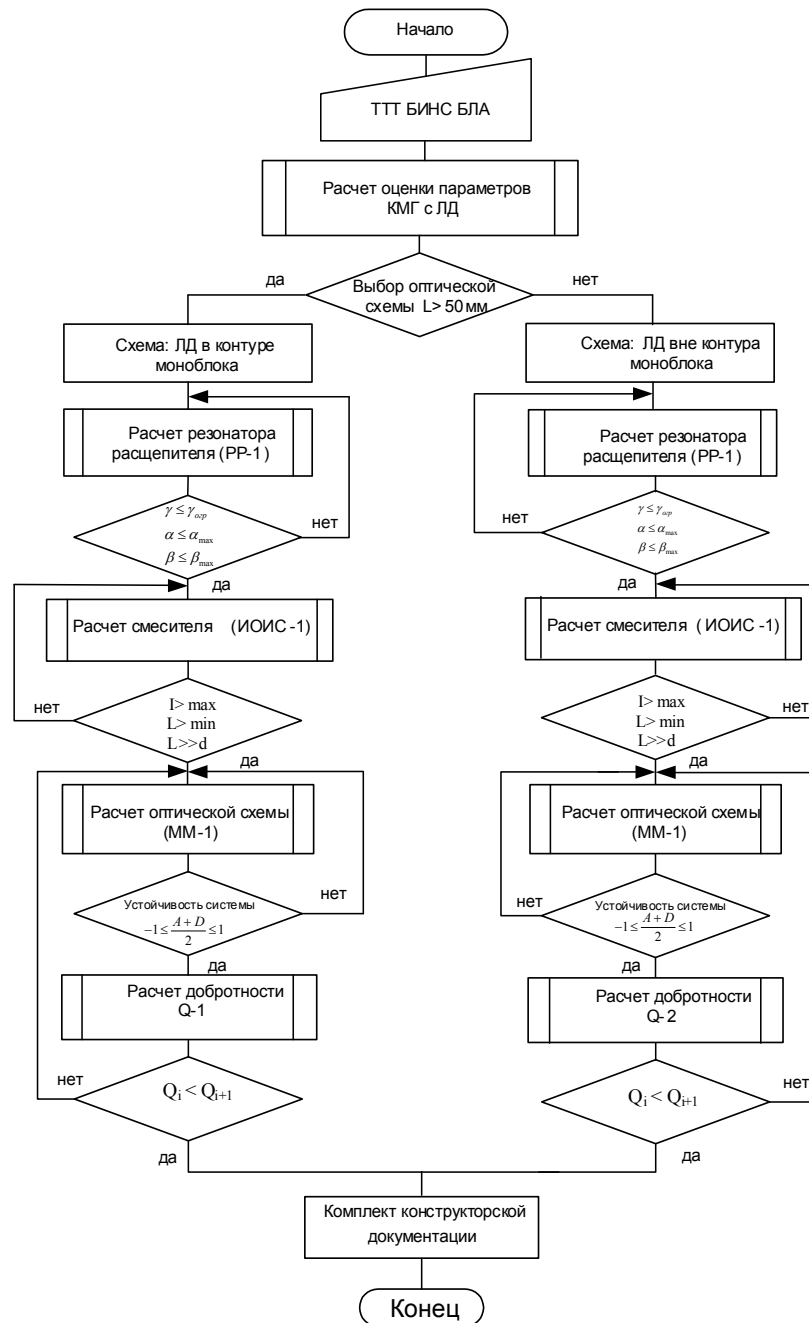


Рисунок 1 – Алгоритм расчета оптимальной оптической схемы КМГ с ПЛД

На первом этапе формируются ТТТ к ЧЭ БИНС БЛА и рассчитываются предельные параметры КМГ с ПЛД.

На втором этапе реализуется расчет оптимальных конструктивных параметров элементов КМГ с ПЛД на основе вариативных базовых конструктивно-технологических решений по критерию максимальной добротности с учетом ее устойчивости.



База данных конструктивно-технологических решений КМГ с ПЛД включает два варианта размещения ПЛД относительно треугольного оптического контура и вариативную составляющую длины линейного участка оптического контура в диапазоне 50–200 мм.

На третьем этапе – разрабатывается комплект конструктивной документации на КМГ с ПЛД, удовлетворяющего ТТТ БИНС БЛА военного назначения.

Методика предполагает последовательное математическое моделирование всех элементов обвязки оптического контура КМГ при варьировании совокупности конструктивных параметров с целью достижения их оптимальных параметров по соответствующим критериям.

Оценки значений требуемой чувствительности КМГ с ПЛД и среднеквадратической ошибки измерения угловой скорости вращения определяют порог регистрации измеряемого параметра и рассчитываются следующим образом:

$$\frac{\delta\varphi_c}{\sqrt{\Delta f}} = \sqrt{\frac{h \cdot c}{0,5 P \lambda_0}}, \quad (1)$$

$$\frac{\delta\Omega_{\min}}{\sqrt{\Delta f}} = \frac{1}{8\pi \cdot S_0} \cdot \sqrt{\frac{h \cdot \lambda_0 c^3}{0,5 \cdot P_0}}, \quad (2)$$

где $\delta\varphi_c$ – изменение фазы Саньяка, c – скорость света, h – постоянная Планка, P – мощность входного излучения, поступающего в КМГ от ПЛД, Δf – полоса пропускания системы регистрации информационного сигнала, λ_0 – рабочая длина волны гироскопа, $\delta\Omega_{\min}$ – изменение угловой скорости вращения гироскопа, S_0 – площадь оптического контура.

Рабочая длина волны и ограничения по мощности на излучение ПЛД формируются априори по данным ТТТ на БИНС БЛА.

Работа алгоритма на втором этапе начинается после выбора вариативной оптической схемы, где осуществляется расчет оптимальных параметров внешнего оптического РР (подпрограмма РР-1). Расчет оптимальной конструкции РР, реализующего функцию двунаправленного расщепления оптического луча ПЛД на два равных по мощности, но противоположных по фазе оптических потока, реализуется по критерию минимизации числа переотражений в объеме РР и угла выхода расщепленного сигнала относительно осевой линии оптического канала контура. Модель прохождения оптического излучения через внешний оптический РР по типу «усеченная призма» определяется системой уравнений:

$$\begin{cases} \gamma = 90 - \beta - \arcsin \left(n_2 \sin \left(\beta - \alpha + \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n_2} \right) \right) \right), \\ h_1 = a_n \operatorname{tg} \beta \end{cases} \quad (3)$$

где γ – угол выхода оптического сигнала из РР, β – угол при основании РР, α – угол в зоне сопряжения лазерного диода и РР, n_2 – коэффициент преломления оптического стекла, a_n – расстояние от начала боковой грани призмы до точки выхода оптического сигнала, h_1 – расстояние от основания до точки выхода оптического сигнала [5].

Коэффициент полезного действия РР при заданных ограничениях может достигать значения 35–40 %. В качестве конструкционного материала используется оптическое стекло, которое для реализации объемного резонатора покрывается снаружи металлической пленкой методом вакуумного напыления толщиной 1,0–1,5 мкм и защитной пленкой монооксида кремния.



В опытном экземпляре использовались оптическое стекло К-8 и металлическая пленка на основе алюминия типа А1-999.

Конструкция СМ выполняет следующие совмещенные функции: элемента замыкания оптического контура гироскопа, юстировки оптических лучей с целью устранения несоосности оптических каналов и формирования интерференционной картины на выходе прибора. Подпрограмма СМ-1 позволяет рассчитать оптимальную конструктивно-технологическую схему по критерию максимальной интенсивности и минимальной удаленности фотоприемника от СМ при заданной ширине интерференционной полосы:

$$I_0 = (8 \times P_0) / (\pi \times \omega_0^2) \times \cos((\pi \times x \times d) / (\lambda \times l))^2, \quad (4)$$

где P_0 – выходная мощность ПЛД, d – расстояние между лучами на выходе смесителя, ω – радиус пучка лазерного излучения от ПЛД, λ – рабочая длина волны оптического канала, l – расстояние до фотоприемника.

Учитывая, что расчет зеркал полного отражения определяется их конструктивно-технологическим решением и зависит от типа отражающего покрытия, в методике используется классическое зеркало на основе оптической стеклянной пластины, на которую последовательно нанесена методом вакуумного напыления пленка алюминия типа А1-999 толщиной 1,0-1,5 мкм и защитная пленка монооксида кремния. Данный конструктив внесен в качестве исходных данных наряду с результатами расчета подпрограммы РР и СМ-1, которые совместно определяют оптимальные параметры элементов обвязки оптического контура КМГ.

Расчет оптимальной треугольной оптической схемы КМГ с дополнительной симметрией в плоскости РР–СМ–ФП реализован для устойчивой схемы на основе критерия максимальной добротности с использованием матричного метода [6]. Купирование неоднозначностей конструктивно-технологического исполнения оптических элементов КМГ существенно влияющих на потери в оптическом контуре, предложено за счет введения в узлы оптической схемы трех дополнительных высокодобротных объемных цилиндрических резонаторов по типу Фабри-Перо. Расчетная математическая модель такой треугольной оптической схемы имеет следующий вид:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{2 \cdot n_g} - S \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - \frac{4 \cdot n_c \cdot S}{r \cdot n_g} & \frac{2 \cdot S}{n_g} \\ \frac{8 \cdot n_c^2 \cdot S}{r^2 \cdot n_g} - \frac{4 \cdot n_c}{r} & 1 - \frac{4 \cdot n_c \cdot S}{r \cdot n_g} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n_g} - 2 \cdot S \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \frac{4 \cdot n_c^2 \cdot S^2}{r^2 \cdot n_g^2} - \frac{6 \cdot n_c \cdot S}{r \cdot n_g} + 1 & \frac{2 \cdot S}{n_g} - \frac{2 \cdot n_c \cdot S^2}{r \cdot n_g^2} \\ \frac{16 \cdot n_c^2 \cdot S}{r^2 \cdot n_g} - \frac{6 \cdot n_c}{r} - \frac{8 \cdot n_c^3 \cdot S^2}{r^3 \cdot n_g} & \frac{4 \cdot n_c^2 \cdot S^2}{r^2 \cdot n_g^2} - \frac{6 \cdot n_c \cdot S}{r \cdot n_g} + 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n_g} - 2 \cdot S \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5) \\ \begin{pmatrix} 1 - \frac{4 \cdot n_c \cdot S}{r \cdot n_g} & \frac{2 \cdot S}{n_g} \\ \frac{8 \cdot n_c^2 \cdot S}{r^2 \cdot n_g} - \frac{4 \cdot n_c}{r} & 1 - \frac{4 \cdot n_c \cdot S}{r \cdot n_g} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{2 \cdot n_g} - S \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где M – матрица векторного состояния оптической схемы гироскопа, L – длина оптического канала, n_g – коэффициент преломления в воздухе, n_c – коэффициент преломления в среде,



r – радиус кривизны зеркала, S – длина дополнительного объемного цилиндрического резонатора в узлах оптического контура моноблока по типу Фабри-Перо.

Циклический алгоритм, варьируя длиной оптического канала, последовательно реализует расчет оптимальных конструктивных параметров высокодобротной оптической схемы по критерию устойчивости (подпрограмма ММ-1) и значению максимальной добротности (подпрограмма Q-1). Условие устойчивости оптической схемы определяется следующим соотношением:

$$-1 \leq \frac{A+D}{2} \leq 1, \quad (6)$$

где A, D – элементы главной эквивалентной матрицы M .

Условие добротности оптической схемы КМГ реализуется полученным в работе следующим выражением:

$$Q = \frac{2\pi q}{4Lk + P_{\text{дифр}} + (1 - |\Gamma_1|^2) + (1 - |\Gamma_2|^2)}, \quad (7)$$

где q – положительное целое число, L – длина оптического канала, k – коэффициент затухания оптической волны, $P_{\text{дифр}}$ – относительные дифракционные потери мощности оптического излучения на краях зеркал, Γ_1 и Γ_2 – коэффициент отражения излучения по мощности от зеркал обвязки оптического контура [7].

На третьем этапе формируется комплект конструкторской документации для изготовления высокоточного и надежного ЧЭ, отвечающего его заданным ТТТ и позволяющего создать совокупность резервируемых ДУС для БИНС БЛА военного назначения.

Вывод. Исходя из проделанной работы следует отметить, что:

разработанная методика оптимизации оптической схемы КМГ и алгоритм ее реализации позволяют проектировать устойчивую оптическую схему по критерию максимальной добротности в соответствии с заданными ТТТ на объект управления для последующего использования в качестве совокупности резервируемых датчиков угловых скоростей БИНС БЛА военного назначения;

проектирование оптимальной оптической схемы КМГ позволяет минимизировать его шумовую составляющую, связанную с переотражением прямого и обратного оптических потоков в оптическом контуре, что обеспечивает повышение точности измеряемого углового перемещения и минимизацию его весогабаритных характеристик;

оптимизация оптической схемы КМГ позволяет минимизировать энергетическую составляющую полупроводникового лазерного диода в режиме накачки оптического контура, что понижает рабочую температуру объекта и повышает его надежность в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.
2. Пат. 2582900 Российская Федерация, МПК G01C19/66. Лазерный гироскоп / Архипов В.А., Полутов А.Г., Ус Н.А., Склярова О.Н., Задорожный С.П., Смирнов П.В.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-производственный комплекс «ЭЛАРА» имени Г.А. Ильенко (ОАО «ЭЛАРА»). № 2014154547/28; заявл. 31.12.2014; опубл. 27.04.2016; Бюл. № 12.
3. Соколов С.В., Погорелов В.А. Основы синтеза многоструктурных бесплатформенных инерциальных навигационных систем. М.: Физматлит, 2009. 312 с.



4. Модель треугольной оптической схемы с повышенной симметрией лазерного гироскопа / Ус Н.А. и др. // Вестник Воронежского института ФСИИ России. 2018. № 2 апрель-июнь. С. 15–24.
5. Моделирование внешнего оптического резонатора-расщепителя лазерного луча кольцевого моноблочного гироскопа / Ус Н.А. и др. // Вестник Воронежского института ФСИИ России. 2018. № 4 ноябрь-декабрь. С. 18–23.
6. Ломакин А.В. Матричные методы в расчете лазерных резонаторов: учебное пособие / А.В. Ломакин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 145 с.
7. Расчет добротности оптического контура кольцевого лазерного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом / Авершин А.А., Ус Н.А. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660692, заявлено 04.07.18; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28.08.18.

REFERENCES

1. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. Osnovy postroeniya besplatformennyh inercial'nyh navigacionnyh sistem. SPb.: CNII «Elektroprigor», 2009. 280 p.
2. Pat. 2582900 Rossijskaya Federaciya, MPK G01C19/66. Lazernyj giroskop / Arhipov V.A., Polutov A.G., Us N.A., Sklyarova O.N., Zadorozhnij S.P., Smirnov P.V.; zayavitel' i patentoobladatel' Otkrytoe akcionernoe obschestvo «Nauchno-proizvodstvennyj kompleks «ELARA» imeni G.A. Il'enko (OAO «ELARA»). № 2014154547/28; zayavl. 31.12.2014; opubl. 27.04.2016; Byul. № 12.
3. Sokolov S.V., Pogorelov V.A. Osnovy sinteza mnogostrukturnyh besplatformennyh inercial'nyh navigacionnyh sistem. M.: Fizmatlit, 2009. 312 p.
4. Model' treugol'noj opticheskoj shemy s povyshennoj simmetrijej lazernogo giroskopa / Us N.A. i dr. // Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii. 2018. № 2 april'-iyun'. pp. 15–24.
5. Modelirovanie vneshnego opticheskogo rezonatora-rasschepitelya lazernogo luchu kol'cevogo monoblochnogo giroskopa / Us N.A. i dr. // Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii. 2018. № 4 noyabr'-dekabr'. pp. 18–23.
6. Lomakin A.V. Matrichnye metody v raschete lazernyh rezonatorov: uchebnoe posobie / A.V. Lomakin. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2000. 145 p.
7. Raschet dobrotnosti opticheskogo kontura kol'cevogo lazernogo giroskopa s poluprovodnikovym lazernym diodom / Avershin A.A., Us N.A. // Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya `EVM № 2018660692, zayavleno 04.07.18; data gosudarstvennoj registracii v Reestre programm dlya `EVM 28.08.18.

© Ус Н.А., Авершин А.А., 2019

Ус Николай Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор 92 кафедры автоматизации управления летательными аппаратами (и вычислительны систем), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, us_n@mail.ru.

Авершин Александр Александрович, преподаватель 92 кафедры автоматизации управления летательными аппаратами (и вычислительны систем), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, aavershin@yandex.ru.