

Научная статья
УДК 623.4
DOI: [10.34759/trd-2022-124-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-16)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗНОСТНОЙ ОШИБКИ СОПРОВОЖДЕНИЯ ЦЕЛИ БОРТОВЫМИ РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ СТАНЦИЯМИ

Сергей Николаевич Моисеев

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

(г. Воронеж), Россия

sergeimoiseev007@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена вопросу моделирования разностных ошибок сопровождения целей бортовыми радиолокационными и оптико-электронными станциями прицельно-навигационных комплексов воздушных судов в интересах исследования их точностных характеристик. В работе применяется имитационная модель, разработанная с целью получения статистических оценок точности бортовых высокоточных систем сопровождения цели на основе использования известных характеристик шумов эталонных средств измерений и каналов сопровождения исследуемых систем сопровождения цели. Показано, что разъюстировка между радиолокационными и оптико-локационными станциями

воздушных судов приводят к возникновению смещения в разностной ошибке сопровождения цели. Закон изменения смещения в разностной ошибке сопровождения цели подобен закону изменения ошибки разъюстировки. Это может быть использовано для оценки величины ошибки и программной ее минимизации.

Ключевые слова: ошибки сопровождения цели, имитационная модель систем сопровождения цели, корреляционные функции погрешностей датчиков параметров полета, ошибки разъюстировки между радиолокационной и оптико-электронной станциями воздушных судов

Для цитирования: Моисеев С.Н. Моделирование разностной ошибки сопровождения цели бортовыми радиолокационными и оптико-электронными станциями // Труды МАИ. 2022. № 124. DOI: [10.34759/trd-2022-124-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-16)

SIMULATION OF THE DIFFERENCE ERROR IN TARGET TRACKING BY AIRBORNE RADAR AND OPTOELECTRONIC STATIONS

Sergey N. Moiseev

Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (Voronezh), Russia

sergeimoiseev007@yandex.ru

Abstract. The article deals with the task of modeling differential errors of target tracking by the onboard radar and optoelectronic stations of navigation and weapon-aiming

complexes of aircraft in the interests of studying their accuracy characteristics. The presented work employs simulation model, developed for obtaining statistical estimation of the onboard high-precision target tracking systems based on employing well-known noise characteristics of reference measuring means and tracking channels of target tracking systems under study. The article demonstrates that the misalignment between the aircraft radar and optoelectronic stations leads to the shift occurrence in the differential error of the target tracking. The law of the shift in the differential error changing of the target tracking is similar to the misalignment error changing. This may be used for the error value evaluation and its program minimization.

Keywords: target tracking errors, simulation model of target tracking systems, correlation functions of errors in flight parameters sensors, misalignment errors between aircraft radar and optoelectronic stations

For citation: Moiseev S.N. Simulation of the difference error in target tracking by airborne radar and optoelectronic stations. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. DOI: [10.34759/trd-2022-124-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-16)

Введение

Решение задачи развития высокоточных систем сопровождения цели (ССЦ), диктует необходимость разработки моделей для исследования их точностных характеристик в целях оптимизации параметров самих ССЦ и повышении эффективности применения авиационных комплексов [1-7].

В статье предложена имитационная модель (ИМ) разностных ошибок сопровождения целей бортовыми радиолокационными станциями (РЛС) и оптико-

локационными станциями (ОЭС) прицельно-навигационных комплексов воздушных судов (ВС). Она разработана с целью получения статистических оценок точности бортовых ССЦ на основе использования известных характеристик шумов эталонных средств измерений и каналов сопровождения исследуемых ССЦ [8-10].

В состав ИМ входят [1]:

1. Частная модель (ЧМ) пространственного движения двух ВС – ВС с исследуемой ССЦ и самолета-цели в земной системе координат $Ox_g y_g z_g$.
2. ЧМ эталонных средств измерений.
3. ЧМ датчиков параметров полета (ДПП) носителя.
4. ЧМ прицельной системы (ПС), в состав которой входят ЧМ ОЭС, ЧМ РЛС и алгоритм определения параметров движения цели (ОПДЦ).
5. Блок определения точностных характеристик РЛС.
6. Блок определения точностных характеристик ОЭС.

Разработанная ИМ имеет модульную структуру, схема приведена на рисунке 1 [11-15].

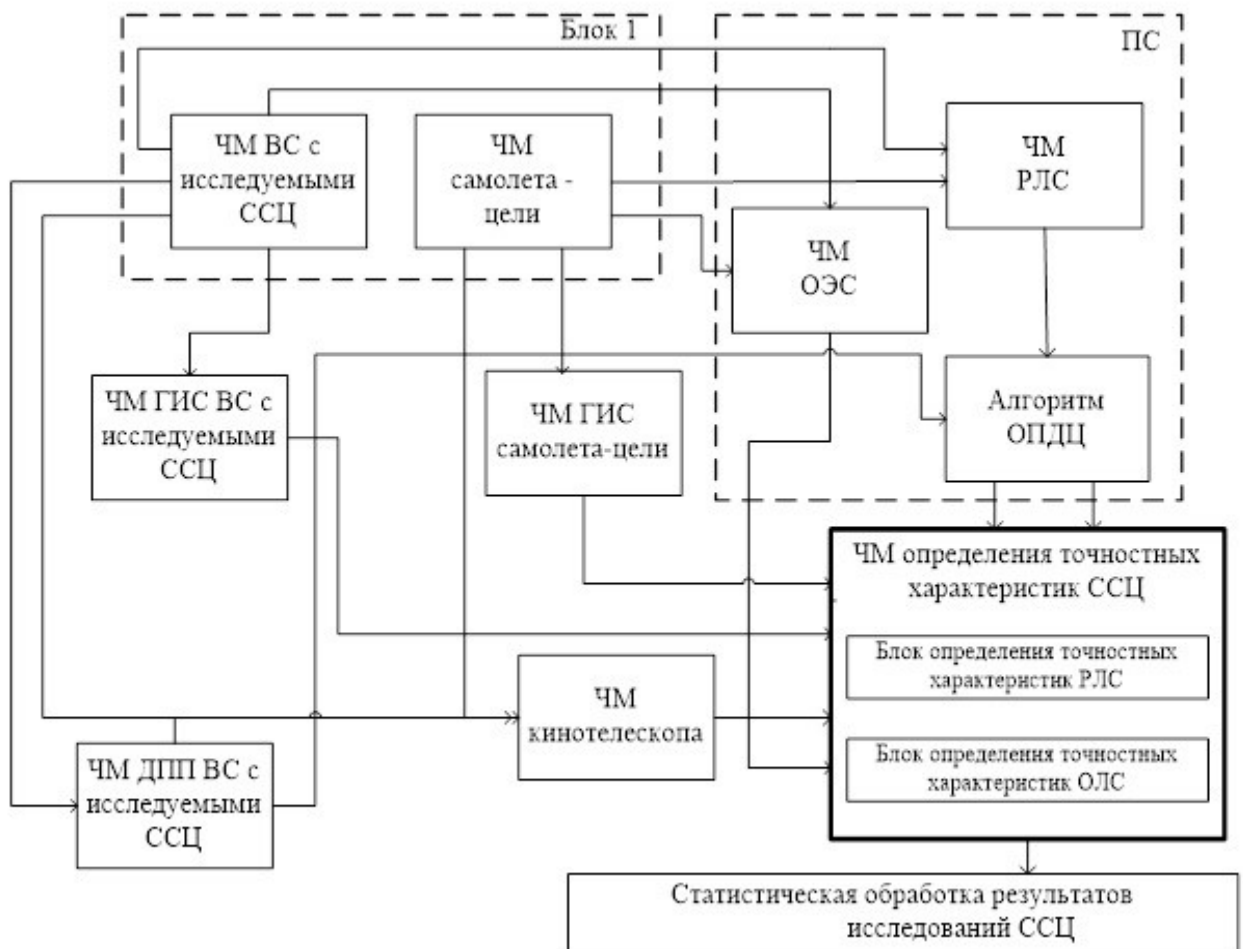


Рисунок 1. Структура имитационной модели бортовых ССЦ ВС

Блок 1 на рисунке 1 пространственного движения двух ВС включает в себя две идентичные частные модели:

- модель ВС с исследуемыми ССЦ в земной системе координат $Ox_g V_g Z_g$;
- модель самолета-цели в земной системе координат $Ox_g V_g Z_g$.

Управление в выше перечисленных ЧМ полета ВС производится заданием соответствующих значений вектора тяги двигателей, углов отклонения рулей: высоты δ_6 , направления δ_n и элеронов δ_s . Кинематические уравнения движения центра масс ВС были определены в работе [2].

В ходе проведенных исследований вероятностные характеристики шумов информационных систем (исследуемых ССЦ, эталонных средств измерений, ДПП ВС с исследуемыми ССЦ) были известны и взяты из работы [3].

Тип корреляционной функции погрешностей указанных датчиков [1], принимался – экспоненциальным:

$$k_x(\tau) = \sigma_x^2 \cdot e^{-\alpha|\tau|}, \quad (1)$$

где σ_x – среднее квадратическое отклонение; α – параметр функции.

Процесс появления белого шума представляется согласно следующей зависимости [3]:

$$\dot{x} = -\alpha \cdot x + \sigma_x \sqrt{2\alpha} \cdot n \quad (2)$$

где n – гауссовский единичный белый шум.

В таблице 1 приведены характеристики корреляционных функций погрешностей ДПП ВС с исследуемыми ССЦ и эталонных средств измерений (ГИС, ОЭС) [1].

Таблица 1 – Характеристики погрешностей датчиков

Тип датчика	Измеряемая величина и размерность среднее квадратическое отклонения	Среднеквадратическое отклонение, σ	Параметр корреляционной функции, $\alpha[1/c]$
СВС	воздушная скорость, м/с	$\sigma_v \leq 0,02 \cdot V$	$\alpha_v = 0,25$
ОЭС	дальность, м	$\sigma_{D_{OЭС}} \leq 3$	$\alpha_{D_0} = 1,8$
ДУА	угол атаки и скольжения, рад	$\sigma_{\alpha_{ат}} \leq 0,0125$ $\sigma_{\beta_{ск}} \leq 0,015$	$\alpha_{\alpha} = 20$ $\alpha_{\beta} = 25$
ГИС	угловая скорость, рад/с	$\sigma_{\omega_{др\psi}} \leq 4,85 \cdot 10^{-7}$ $\sigma_{\omega_{др\gamma}} \leq 4,83 \cdot 10^{-7}$ $\sigma_{\omega_{др\nu}} \leq 4,83 \cdot 10^{-7}$	$\alpha_{др\psi} = 0,5$ $\alpha_{др\gamma} = 0,48$ $\alpha_{др\nu} = 0,48$

Для имитации функционирования всей совокупности датчиков, случайная составляющая которых может быть описана корреляционной функцией вида (1), используется один генератор случайных процессов (ГСП), формирующий последовательность независимых (некоррелированных) между собой чисел $N_1 \dots N_n$, распределенных по нормальному закону с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1. Схема организации функционирования ГСП и ОЗУ показана на рисунке 2. На рисунке 2 D_n означает тип имитируемого датчика.

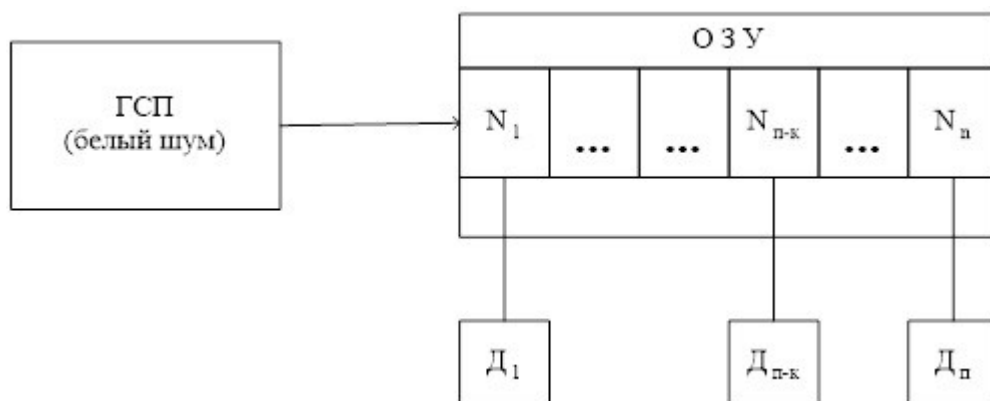


Рисунок 2. Организация функционирования ГСП и ОЗУ

Следовательно, для каждого датчика допускается использовать лишь один ГСП, в результате чего на каждом этапе уменьшается количество $(n-1)N$ операторов, где n – число моделируемых датчиков, N – число операторов по вычислению. В предлагаемой модели процесса исследований для ИМ РЛС и ОЭС экономится время выполнения от 150 до 250 операторов.

В ЧМ ДПП ВС с исследуемыми ССЦ формируются и передаются в ММ ПС реальные (измеренные) значения модуля воздушной скорости $|\vec{V}|$ и углов α_{am} и $\beta_{ск}$:

$$\begin{cases} \alpha_{am} = \alpha_{am}^{\partial} + \Delta \alpha_{am} \\ \beta_{ck} = \beta_{ck}^{\partial} + \Delta \beta_{ck} \\ |\vec{V}| = |\vec{V}^{\partial}| + |\Delta \vec{V}| \end{cases} ; \quad (3)$$

Величины $\Delta \alpha_{am}$, $\Delta \beta_{ck}$, $|\Delta \vec{V}|$ определяются по следующим формульным зависимостям [4]:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\alpha}_{am} = -\alpha_{\alpha_{am}} \cdot \Delta \alpha_{am} + \sigma_{\Delta \alpha_{am}} \cdot \sqrt{2 \cdot \alpha_{\alpha_{am}}} \cdot \eta_4 \\ \Delta \dot{\beta}_{ck} = -\alpha_{\beta_{ck}} \cdot \Delta \beta_{ck} + \sigma_{\Delta \beta_{ck}} \cdot \sqrt{2 \cdot \alpha_{\beta_{ck}}} \cdot \eta_5 \\ \Delta \dot{V} = -\alpha_V \cdot \Delta V + \sigma_{\Delta V} \cdot \sqrt{2 \cdot \alpha_V} \cdot \eta_6 \end{cases} ; \quad (4)$$

где η_4 , η_5 , η_6 - случайные независимые величины, распределенные по нормальному закону с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1.

В процессе данной работы при формировании ЧМ ДПП, ОЭС проведена идентификация по точности погрешностей $\Delta D_{оэс}$, $\Delta \alpha_{am}$, $\Delta \beta_{ck}$, $|\Delta \vec{V}|$, определявшаяся степенями совпадения значений параметров $(\alpha_{\alpha_{am}}^M, \alpha_{\beta_{ck}}^M, \alpha_V^M, \alpha_{D_{оэс}}^M, \sigma_{\alpha_{am}}^M, \sigma_{\beta_{ck}}^M, \sigma_V^M, \sigma_{D_{оэс}}^M)$ и корреляционных функций ошибок ДПП $\Delta \alpha_{am}, \Delta \beta_{ck}, |\Delta \vec{V}|$, ОЭС ($\Delta D_{оэс}$), полученных при их математическом моделировании (рисунки 3-6) с величинами $(\alpha_{\alpha_{am}}, \alpha_{\beta_{ck}}, \alpha_V, \alpha_{D_{оэс}}, \sigma_{\alpha_{am}}, \sigma_{\beta_{ck}}, \sigma_V, \sigma_{D_{оэс}})$ корреляционных функций (таблица 1).

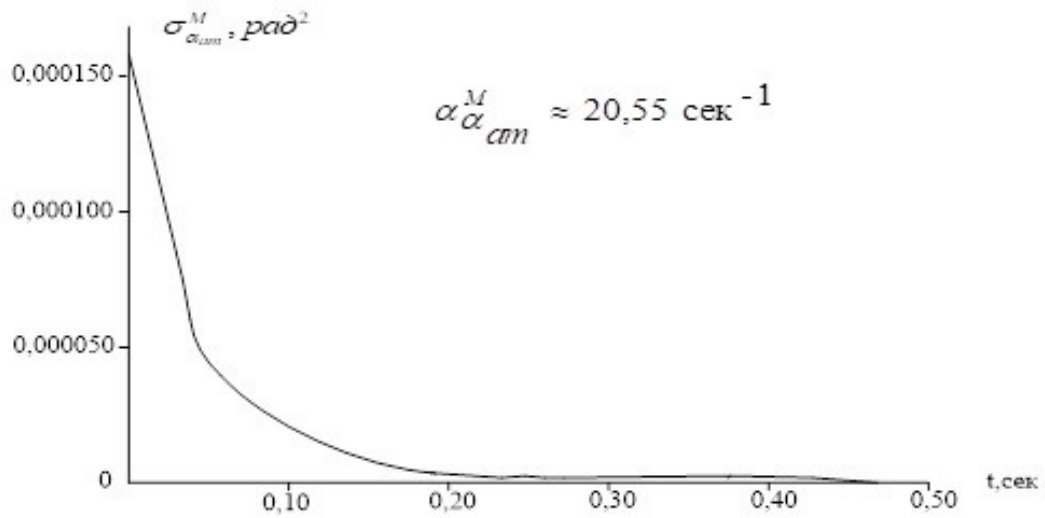


Рисунок 3. Изменение $\sigma_{\alpha_{at}}^M$

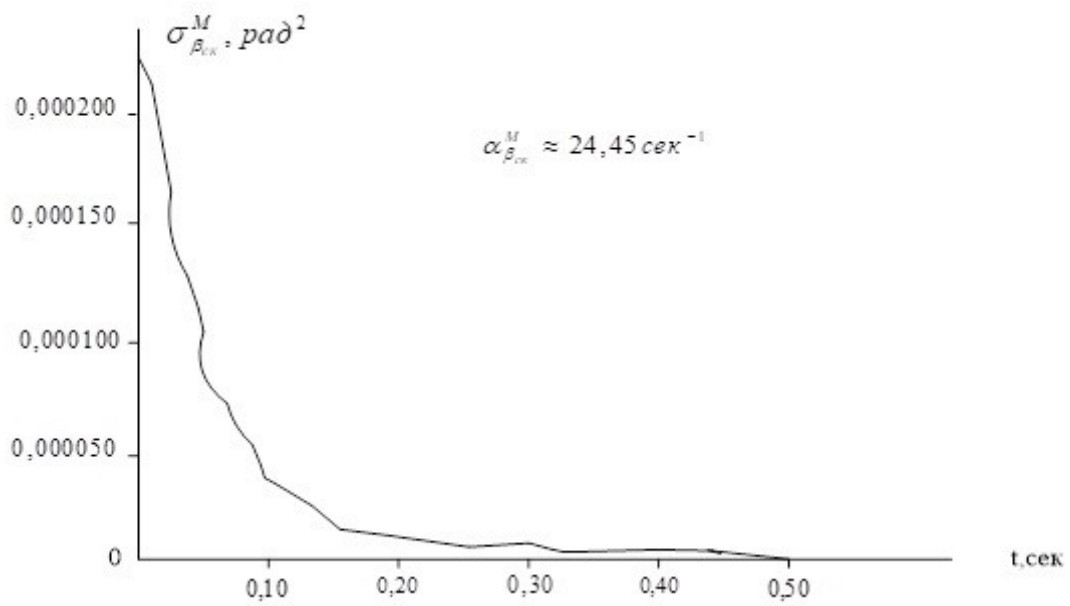


Рисунок 4. Изменение $\sigma_{\beta_{sk}}^M$

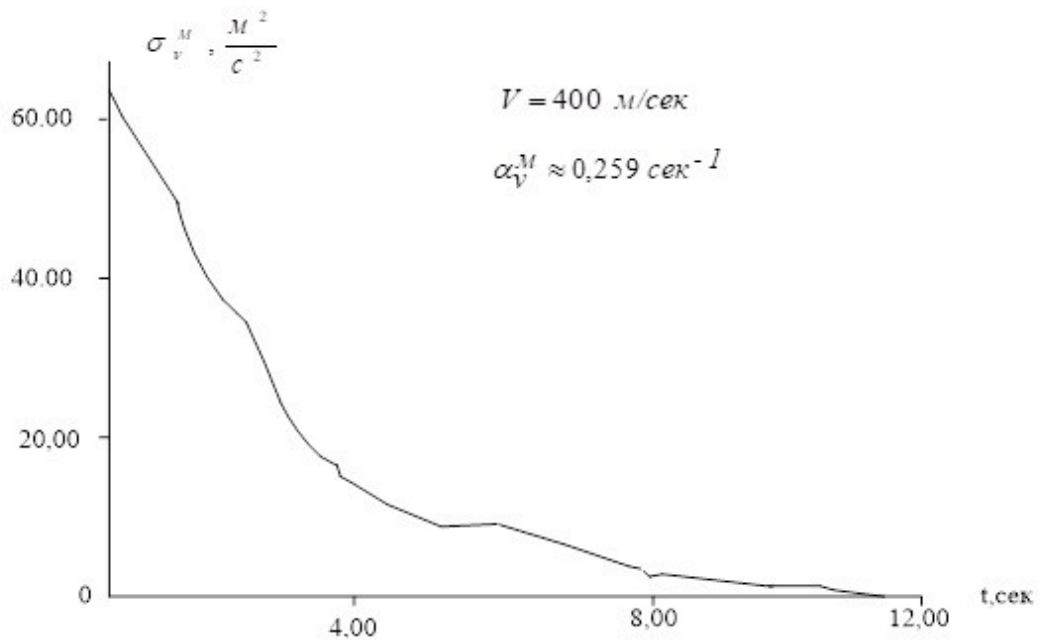


Рисунок 5. Изменение σ_V^M

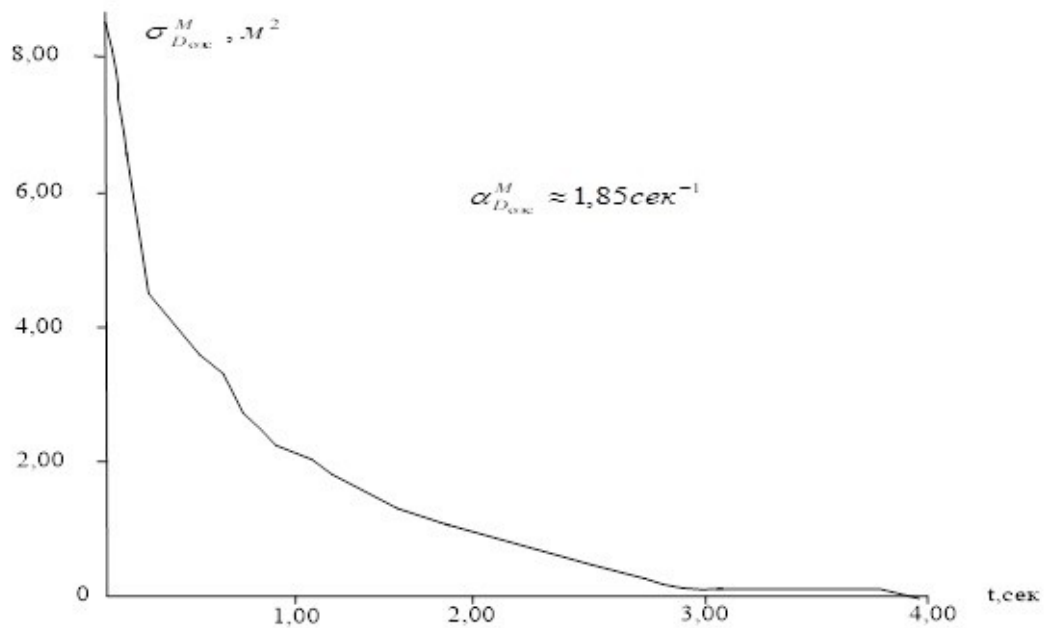


Рисунок 6. Изменение $\sigma_{D_{оэс}}^M$

Анализ рисунков 3-6 показывает, что корреляционные функции ошибок ДПП

$\Delta \alpha_{ам}, \Delta \beta_{ск}, |\Delta \vec{V}|$ и ОЭС ($\Delta D_{оэс}$), полученных при их математическом моделировании,

определяются экспоненциальным законом и их параметры

$(\alpha_{\alpha_{am}}^M, \alpha_{\beta_{ck}}^M, \alpha_V^M, \alpha_{D_{oэс}}^M, \sigma_{\alpha_{am}}^M, \sigma_{\beta_{ck}}^M, \sigma_V^M, \sigma_{D_{oэс}}^M)$ отличаются от соответствующих

характеристик $(\alpha_{\alpha_{am}}, \alpha_{\beta_{ck}}, \alpha_V, \alpha_{D_{oэс}}, \sigma_{\alpha_{am}}, \sigma_{\beta_{ck}}, \sigma_V, \sigma_{D_{oэс}})$ корреляционных функций

(таблица 2), используемых при моделировании погрешностей $\Delta \alpha_{am}, \Delta \beta_{ck}, |\Delta \vec{V}|,$

$\Delta D_{oэс}$ на величину, составляющую от 5 до 6 %. Это позволяет сделать вывод о том,

что в ИМ ДПП, ОЭС – их погрешности $\Delta \alpha, \Delta \alpha_{am}, \Delta \beta_{ck}, |\Delta \vec{V}|, \Delta D_{oэс}$ сформированы

достаточно точно. На выходе блока определения точностных характеристик ССЦ

формируются данные исследуемой ССЦ.

Результаты моделирования разностных ошибок сопровождения цели бортовыми РЛС и ОЭС ВС представлены на рисунках 7-11 [16-20].

Таблица 2 – Величины, используемые для формирования ошибок измерений

Среднеквадратическое отклонение, σ	Параметр корреляционной функции, α
$\sigma_{\omega_{x_D}} = \sigma_{\omega_{y_D}} = \sigma_{\omega_{z_D}} = \sigma_{\omega}$ $\sigma_{\omega} = 0,012 \text{ рад/с}$	$\alpha_{\omega_{x_D}} = \alpha_{\omega_{y_D}} = \alpha_{\omega_{z_D}} = \alpha_{\omega}$ $\alpha_{\omega} = 3,3 \text{ сек}^{-1}$
$\sigma_{\varphi_y} = \sigma_{\varphi_z} = \sigma_{\varphi}$ $\sigma_{\varphi} = 0,0025 \text{ рад}, D \leq 1000 \text{ м};$ $\sigma_{\varphi} = 0,002 \text{ рад}, 1000 \text{ м} < D \leq 1250 \text{ м};$ $\sigma_{\varphi} = 0,003 \text{ рад}, 1200 \text{ м} < D \leq 3000 \text{ м}$	$\alpha_{\varphi_y} = \alpha_{\varphi_z} = \alpha_{\varphi}$ $\alpha_{\varphi} = 0,68 \text{ сек}^{-1}, D \leq 1000 \text{ м};$ $\alpha_{\varphi} = 0,7 \text{ сек}^{-1}, 1000 \text{ м} < D \leq 1250 \text{ м};$ $\alpha_{\varphi} = 0,73 \text{ сек}^{-1}, 1250 \text{ м} < D \leq 3000 \text{ м}$
$\sigma_D = 25 \text{ м}, D \leq 750 \text{ м};$ $\sigma_D = 35 \text{ м}, 750 \text{ м} < D \leq 1250 \text{ м};$ $\sigma_D = 45 \text{ м}, 1250 \text{ м} \leq D \leq 2500 \text{ м};$ $\sigma_D = 75 \text{ м}, D > 2500 \text{ м}$	$\alpha_D = 1,7 \text{ сек}^{-1}, D \leq 750 \text{ м};$ $\alpha_D = 1,71 \text{ сек}^{-1}, 750 \text{ м} < D \leq 1250 \text{ м};$ $\alpha_D = 1,73 \text{ сек}^{-1}, 1250 \text{ м} \leq D \leq 2500 \text{ м};$ $\alpha_D = 1,77 \text{ сек}^{-1}, D > 2500 \text{ м}$

$\sigma_{\dot{D}} = 4 м/с, \quad D = 750 м;$ $\sigma_{\dot{D}} = 2,5 м/с, \quad 750 м \leq D \leq 1250 м;$ $\sigma_{\dot{D}} = 5 м/с, \quad 1250 м \leq D \leq 2250$ $м;$ $\sigma_{\dot{D}} = 9 м/с, \quad D > 2250 м$	$\alpha_{\dot{D}} = 1,55 сек^{-1}, \quad D \leq 750 м;$ $\alpha_{\dot{D}} = 1,6 сек^{-1}, \quad 750 м \leq D \leq 1250 м;$ $\alpha_{\dot{D}} = 1,63 сек^{-1}, \quad 1250 м \leq D \leq 2250 м;$ $\alpha_{\dot{D}} = 1,68 сек^{-1}, \quad D > 2250 м$
--	---

Они отражают результаты сопровождения цели по азимуту (рисунки 7, 8) в процессе полета ВС (результаты сопровождения цели по другой координате подобны). При моделировании во входные воздействия ССЦ искусственно выдавалась ошибка разъюстировки между РЛС и ОЭС $\Delta\theta$. На графиках рисунков 7-9 она принималась $\Delta\theta = k, (k = 0,2)$, на графике рисунка 10 $\Delta\theta = ax + b, (a = 0,05, b = -0,2)$, на графике рисунка 11 $\Delta\theta = ax^2 + bx + c, (a = 2, b = 0,2, c = 0,3)$.

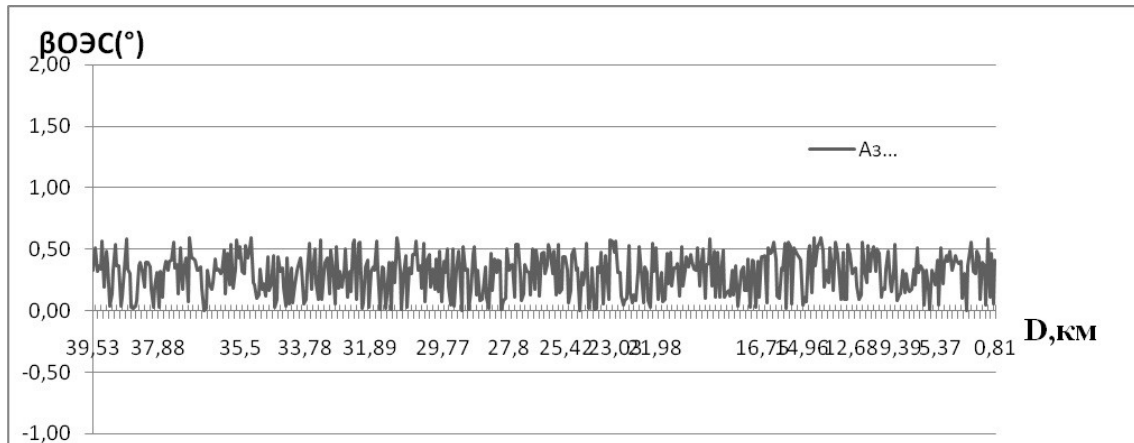


Рисунок 7. Результат моделирования сопровождения цели по азимуту ОЭС $\Delta\theta = k$

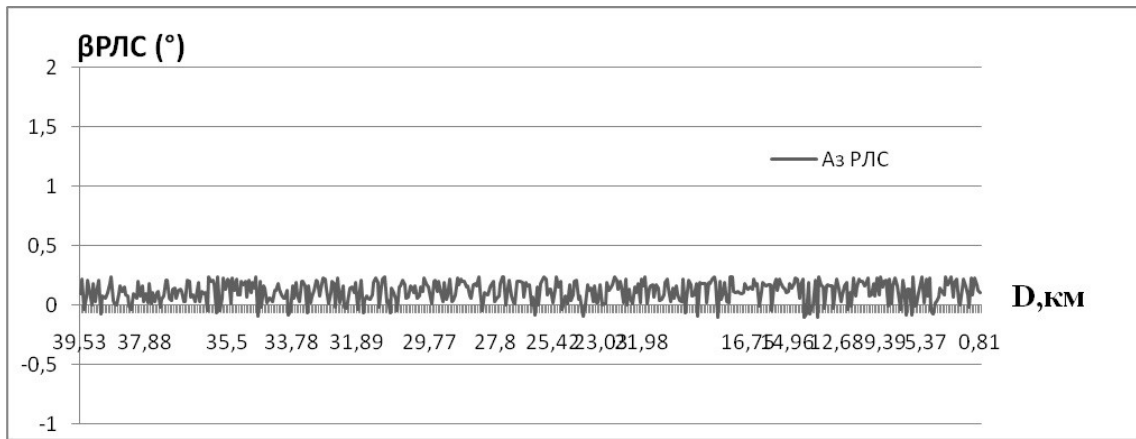


Рисунок 8. Результат моделирования сопровождения цели по азимуту РЛС $\Delta \theta = k$

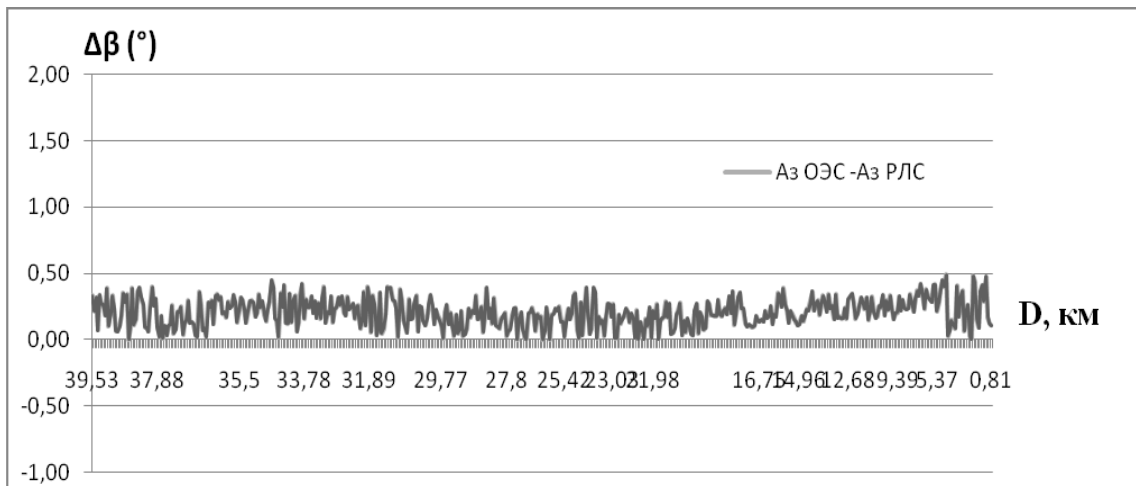


Рисунок 9. Результат моделирования разностных ошибок сопровождения цели бортовыми РЛС и ОЭС $\Delta \theta = k$

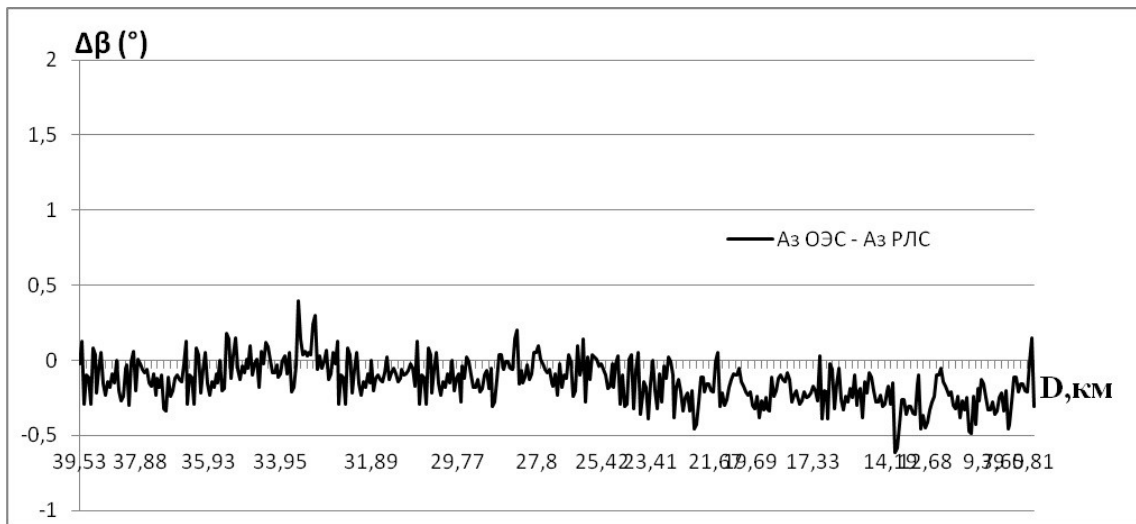


Рисунок 10. Результат моделирования разностных ошибок сопровождения цели бортовыми РЛС и ОЭС $\Delta\theta = ax + b$

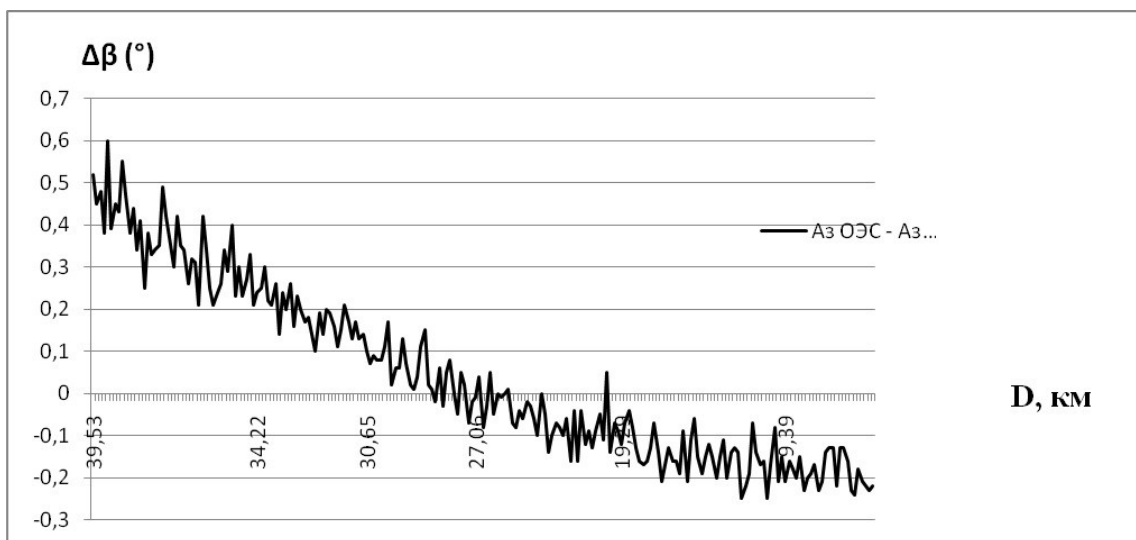


Рисунок 11. Результаты моделирования разностных ошибок сопровождения цели бортовыми РЛС и ОЭС $\Delta\theta = ax^2 + bx + c$

Выводы

Из приведенных результатов видно, что ошибки разъюстировки между РЛС и ОЭС ВС приводит к возникновению смещения в разностной ошибке сопровождения цели. Его закон изменения подобен закону изменения ошибки разъюстировки. Это

может быть использовано для оценки упомянутой ошибки и программной минимизации значений последней. В силу возможной нестационарности искомой ошибки задачу ее определения необходимо ставить не как задачу оценки, а как задачу фильтрации.

Полученные в данной работе результаты способствуют повышению точности работы бортовых РЛС и ОЭС ВС.

Список источников

1. Моисеев С.Н., Герасимов И.В., Кирпичников А.С., Олешко В.С., Потапов А.Н., Ткаченко Д.П. Математическая модель процесса исследований точностных характеристик радиолокационных систем сопровождения воздушных целей // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 23. С. 235-241.
2. Авиационные прицельные системы. / Под редакцией А.М. Краснова. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. – 623 с.
3. Потапов А.Н., Моисеев С.Н. Методическое обеспечение летных исследований точностных характеристик радиолокационных систем сопровождения воздушных целей // 14 Международная научно-методическая конференция «Информатика: проблемы, методология, технологии»: сборник трудов. (6-8 февраля 2014, Воронеж). – Воронеж: ВГУ, 2014. Т. 1. С. 491-498.
4. Леонов С.А. Основы теории точности радиолокационных измерений с подвижных объектов. – Л.: Судостроение, 1991. – 167 с.
5. Шаракшанэ А.С., Железнов И.Г. Испытания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1974. – 184 с.

6. Кирпичников А.П., Моисеев С.Н., Лебедев В.В., Сухарев В.А., Герасимов И.В., Олешко В.С., Ткаченко Д.П. Оптимизация методов технического обслуживания радиотехнических систем // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 14. С. 178-180.
7. Моисеев С.Н., Кирпичников А.П., Олешко В.С., Потапов А.Н., Ткаченко Д.П. Структура математической модели исследований точностных характеристик радиолокационных систем сопровождения целей // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 21. С. 319-322.
8. Моисеев С.Н., Зырянов Ю.Т., Кирпичников А.П., Красильников О.А., Лебедев В.В., Олешко В.С., Ткаченко Д.П. Алгоритм расчета параметров энергетической системы робототехнического комплекса снаряжения самолетов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 9. С. 289-291.
9. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Петров С.В. Моделирование радиолокационных станций в отечественной системе автоматизированного проектирования радиолокационных станций // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2021. № 1(12). С. 11-17.
10. Калабин А.Л., Морозов А.К. Компьютерное моделирование эксперимента по имитации наличия целей для радиолокационной станции // Программные продукты и системы. 2021. № 2. С. 269-280. DOI: [10.15827/0236-235X.134.269-280](https://doi.org/10.15827/0236-235X.134.269-280)
11. Абраменков В.В., Васильченко О.В., Муравский А.П. Обоснование подхода к построению системы селекции движущихся целей радиолокационной станции обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Журнал

Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 12. № 7. С. 780-791. DOI: [10.17516/1999-494X-0178](https://doi.org/10.17516/1999-494X-0178)

12. Чижов А.А., Костомаров И.Н. Модель радиолокационной станции обнаружения малоразмерных целей // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов. 2013. № 11 (54). С. 65.

13. Азаров А.В., Караваев М.Н., Рожков С.С., Славянский А.О., Смолка К.А. Синтез малогабаритного фазового пеленгатора авиационного базирования // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165549>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-12)

14. Орешкин В.И., Мелёшин Ю.М., Цветков В.К. Повышение точности пеленга сигнала в цифровой антенной решётке // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161424>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-10)

15. Генералов А.Г., Гаджиев Э.В., Салихов М.Р. Применение спиральных антенн для бортовых систем и комплексов // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=105576>

16. Криков Д.С. Синтезаторы сетки частот в радиоэлектронных системах // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90403>

17. Бельский А.Б. Требования к бортовым оптико-электронным средствам воздушной разведки летательных аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165561>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-16)

18. Чернецкая И.Е., Спевакова С.В. Мультиспектральное оптико-электронное устройство для автономной мобильной платформы экологического мониторинга //

Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=119001>.

DOI: [10.34759/trd-2020-114-14](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-14).

19. Ананьев А.В., Иванников К.С., Кажанов А.П. Модель авиационного поражения целей на основе нестационарных марковских случайных процессов //

Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165564>.

DOI: [10.34759/trd-2022-123-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-18)

20. Ефанов В.В., Закота А.А., Гунькина А.С. Методика оценки вероятности наведения истребителя в зону разрешенных пусков управляемых ракет в условиях неполного приборного обеспечения // Труды МАИ. 2021. № 118. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=158262>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-21](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-21)

References

1. Moiseev S.N., Gerasimov I.V., Kirpichnikov A.S., Oleshko V.S., Potapov A.N., Tkachenko D.P. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, no. 23, pp. 235-241.

2. Krasnov A.M. *Aviation sighting systems* (Aviation sighting systems), Moscow, VVIA im. prof. N.E. Zhukovsky, 2006, 623 p.

3. Potapov A.N., Moiseev S.N. *14 Mezhdunarodnaya nauchno-metodicheskaya konferentsiya «Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii»: sbornik trudov*, Voronezh, VGU, 2014, vol. 1, pp. 491-498.

4. Leonov S.A. *Osnovy teorii tochnosti radiolokatsionnykh izmerenii s podvizhnykh ob"ektov* (Fundamentals of the theory of accuracy of radar measurements from moving objects), Leningrad, Sudostroenie, 1991, 167 p.
5. Sharakshane A.S., Zheleznov I.G. *Ispytaniya slozhnykh system* (Testing of complex systems), Moscow, Vysshaya shkola, 1974, 184 p.
6. Kirpichnikov A.P., Moiseev S.N., Lebedev V.V., Sukharev V.A., Gerasimov I.V., Oleshko V.S., Tkachenko D.P. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, no. 14, pp. 178-180.
7. Moiseev S.N., Kirpichnikov A.P., Oleshko V.S., Potapov A.N., Tkachenko D.P. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, no. 21, pp. 319-322.
8. Moiseev S.N., Zyryanov Yu.T., Kirpichnikov A.P., Krasil'nikov O.A., Lebedev V.V., Oleshko V.S., Tkachenko D.P. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 9, pp. 289-291.
9. Konoval'chik A.P., Konopel'kin M.Yu., Petrov S.V. *Vestnik Yaroslavskogo vysshego voennogo uchilishcha protivovozdushnoi oborony*, 2021, no. 1(12), pp. 11-17.
10. Kalabin A.L., Morozov A.K. *Programmnye produkty i sistemy*, 2021, no. 2, pp. 269-280. DOI: [10.15827/0236-235X.134.269-280](https://doi.org/10.15827/0236-235X.134.269-280)
11. Abramenzkov V.V., Vasil'chenko O.V., Muravskii A.P. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, 2019, vol. 12, no. 7, pp. 780-791. DOI: [10.17516/1999-494X-0178](https://doi.org/10.17516/1999-494X-0178)
12. Chizhov A.A., Kostomarov I.N. *Khroniki ob"edinennogo fonda elektronnykh resursov*, 2013, no. 11 (54), pp. 65.

13. Azarov A.V., Karavaev M.N., Rozhkov S.S., Slavyanskii A.O., Smolka K.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165549>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-12)
14. Oreshkin V.I., Meleshin Yu.M., Tsvetkov V.K. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161424>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-10)
15. Generalov A.G., Gadzhiev E.V., Salikhov M.R. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105576>
16. Krikov D.S. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90403>
17. Bel'skii A.B. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165561>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-16)
18. Chernetskaya I.E., Spevakova S.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 114. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=119001>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-14](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-14).
19. Anan'ev A.V., Ivannikov K.S., Kazhanov A.P. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165564>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-18)
20. Efanov V.V., Zakota A.A., Gun'kina A.S. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158262>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-21](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-21)

Статья поступила в редакцию 29.04.2022

Статья после доработки 30.04.2022

Одобрена после рецензирования 23.05.2022

Принята к публикации 21.06.2022

The article was submitted on 29.04.2022; approved after reviewing on 23.05.2022; accepted for publication on 21.06.2022.