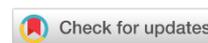


# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

## MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.375. (075.8)

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-150-160>

Научная статья

### Исследование системы автоматического управления стабилизации изображения бортовых оптико-электронных приборов наведения и слежения



К. А. Бурдинов , К. М. Шашкина , Эхсан Шагхаей 

Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, АНО ВО «Университет Иннополис», Российская Федерация, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 1

✉ [sainquake@gmail.com](mailto:sainquake@gmail.com)

#### Аннотация

**Введение.** Движение носителя и внешние факторы (влияние атмосферы, температуры и давления) существенно ухудшают качество изображения смотрящих оптико-электронных систем (ОЭС) и точность позиционирования излучающих ОЭС. Рассматриваются проблемы повышения качества изображения и вероятность удержания изображения объекта наблюдения (ОН) на оптической оси следящей ОЭС.

**Материалы и методы.** Создание системы автоматического управления оптико-электронного прибора (САУ ОЭП) предполагает решение многокритериальной задачи оптимизации с учетом ряда противоречивых технико-экономических (ТЭ) требований. Определение допустимых динамических погрешностей (ДДП) стабилизации изображения является ключевым вопросом в разработке бортовых оптико-электронных приборов (БОЭП). Уравнения Лагранжа II рода и смешанный метод Жильбера позволили получить математическую модель ОУ ОЭП. Затем выполнили декомпозицию двухсвязной САУ с нелинейными перекрестными связями в ОУ. Представлена функциональная схема модели формирования изображения БОЭП. Перечислены параметры матричного фотоприемника и требования, предъявляемые к динамической погрешности САУ ОЭП с учетом допустимой ФПМ ОЭП. Визуализированы функции передачи модуляции, линейного, гармонического и вибрационного сдвига изображения, соответствующие допустимым и достигнутым ДДП. В среде Mathcad созданы логарифмические частотные характеристики. Двухсвязная система управления ОЭП при заданных параметрах ОУ для рассматриваемого движения представлена как два независимых канала управления по азимуту и углу места.

**Результаты исследования.** Приведены процессы управления БОЭП в режимах стабилизации и слежения. Для исследования динамики пространственного управления БОЭП в соответствии с методикой САУ разработана компьютерная имитационная модель (КИМ) ЦСАУ ОЭП. Она реализована в среде Matlab и состоит из КИМ ОУ, приводов, пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов с учетом нелинейностей, центрального вычислительного устройства (ЦВУ), программного устройства наведения, КИМ-носителя, реализующего уравнения движения. Описаны гармонические колебания носителя. Определены погрешности слежения и стабилизации в режиме слежения при дополнительно введенном управляющем воздействии в виде постоянной скорости. Исследована динамика пространственного управления БОЭП. Визуализированы компьютерная имитационная модель цифровой системы автоматического управления оптико-электронным прибором, результаты моделирования ЦСАУ ОЭП без учета движения борта и процессы управления ОЭП с учетом движения.

**Обсуждение и заключения.** Для исследованных случаев рассчитана точность стабилизации. Установлено, что она в десятки раз превосходит заявленные ранее показатели, и это в десятки раз снижает требования к сходимости лазерного пучка и мощности излучения лазера при разработке оптического тракта рассматриваемого изделия. Предложенную КИМ можно использовать при разработке БОЭП. В этом случае применение представленной методики и КИМ поможет снизить трудозатраты и минимизировать ошибки.

**Ключевые слова:** система автоматического управления, функция передачи модуляции, следящая система, оптимизация, оптико-электронный прибор.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность руководству программы Центра компетенций НТИ по направлению «Технологии компонентов робототехники и мехатроники» за помощь в подготовке данной статьи.

**Для цитирования:** Бурдинов, К. А. Исследование системы автоматического управления стабилизации изображения бортовых оптико-электронных приборов наведения и слежения / К. А. Бурдинов, К. М. Шашкина, Эхсан Шагхаей // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 2. — С. 150–160. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-150-160>

Original article

## Investigation of ACS image stabilization of on-board optoelectronic guidance and tracking devices

К. А. Burdinov  , К. М. Shashkina , Ehsan Shaghaei 

Centre for Robotics and Mechatronics Components, Innopolis University, 1, Universitetskaya St., Innopolis, Russian Federation

 [sainquake@gmail.com](mailto:sainquake@gmail.com)

### Abstract

**Introduction.** The movement of the carrier and external factors (the effects of the atmosphere, temperature and pressure) degrade significantly the image quality of the servo optoelectronic systems (OES) and the positioning accuracy of the emitting OES. The issues of image quality improvement and the probability of keeping the image of the observation object (OO) on the optical axis of the servo EOS are considered.

**Materials and Methods.** The development of an automatic control system for an optoelectronic device (ACS OED) involved solving a multi-criteria optimization problem taking into account a number of conflicting technical-and-economic (TE) requirements. The determination of tolerated dynamic errors (TDE) of image stabilization was a key issue in the development of on-board optoelectronic devices (OOED). Lagrange equations of the second kind and the mixed Gilbert method made it possible to obtain a mathematical model of the CO OED. Then, the decomposition of a two-link ACS with nonlinear cross-couplings in the CO was performed. A functional diagram of the image formation model of the OOED was presented. The parameters of the matrix photodetector and the requirements for the dynamic error of the ACS OED, taking into account the permissible MTF of the OED, were listed. The functions of transferring modulation, as well as linear, harmonic and vibrational shift of the image corresponding to the permissible and achieved TDE were visualized. Logarithmic frequency characteristics were created in the Mathcad environment. The two-link control system of the OED with the specified parameters of the CO for the considered movement was presented as two independent azimuth and elevation control channels.

**Results.** The processes of control of the on-board optoelectronic system in the stabilization and tracking modes were described. To study the dynamics of spatial control of the OOEP in accordance with the ACS methodology, a computer simulation model (CSM) of the digital automatic control systems (DACS) of the OED was developed. It was implemented in the Matlab environment and consisted of CSM CO, drives, proportional-integral-derivative (PID) controllers taking into account non-linearities, a central computing device (CCD), a guidance software device, a CSM-carrier that implemented the equations of motion. Harmonic vibrations of the carrier were described. The errors of tracking and stabilization in the tracking mode with an additional control action introduced in the form of a constant speed were determined. The dynamics of spatial control of the OOED was investigated. A computer simulation model of a digital automatic control system of an optoelectronic device, the results of modeling the DACS OED without considering the board movement, and the processes of OED control subject to movement were visualized.

**Discussion and Conclusions.** The stabilization accuracy was calculated for the studied cases. It was established that the stabilization tens of times exceeded the previously stated indicators, and it tens of times reduced the requirements for the convergence of the laser beam and the laser radiation power when developing the optical path of the product in question. The proposed CSM can be used in the development of the on-board optoelectronic systems. In this case, the application of the presented methodology and CSM will help to reduce labor costs and minimize errors.

**Keywords:** automatic control system, modulation-transfer function, servo system, optimization, optoelectronic device.

**Funding information:** the authors would like to thank the management of the NTI Competence Center program “Technologies in Robotics and Mechatronics Components” for their assistance in preparing this article.

**For citation:** K. A. Burdinov, K. M. Shashkina, Ehsan Shaghahi. Investigation of ACS image stabilization of on-board optoelectronic guidance and tracking devices. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 150–160. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-150-160>

**Введение.** При проектировании современных бортовых оптико-электронных приборов (ОЭП) и комплексов широко используются методы компьютерного моделирования оптико-электронных систем (ОЭС). Над этими задачами работали такие авторы, как Ю. Г. Якушенков, В. В. Тарасов, И. П. Торшина, В. П. Иванов, В. А. Балоев, В. А. Овсянников, В. Л. Филиппов. Компьютерное моделирование позволяет решать задачи рационального выбора структуры, параметров, элементной базы ОЭС, обеспечивающих требуемые показатели эффективности при заданных ограничениях без дорогостоящих натурных исследований и испытаний.

Движение носителя и внешние факторы (температура, давление) существенно ухудшают качество изображения для смотрящих ОЭС и точность позиционирования для излучающих ОЭС. Сокращается вероятность удержания изображения объекта наблюдения (ОН) на оптической оси следящей ОЭС. Для излучающих ОЭС снижается точность позиционирования и вероятность выполнения задач наблюдения. Для удержания изображения ОН в поле зрения или в секторе облучения необходимо захватить довольно большой телесный угол обзора. Значит, нужно увеличивать габариты оптических систем и мощностей силовой электроники. Чтобы этого избежать, применяют управляемые излучающие ОЭС. Указанные выше особенности ОЭП ограничивают разработки САУ ОЭП. Эту проблему рассматривали В. А. Стрежнев, В. М. Матросов, А. С. Земляков, Н. Н. Маливанов, Е. И. Сомов, А. И. Маликов, В. А. Кренев, А. И. Карпов, Д. А. Молин, А. В. Михалицын. При проектировании управляемых ОЭП, работающих в режимах наведения и слежения, установлен следующий факт: время наведения и точность стабилизации оптической оси, а также динамика подсистем ОЭП существенно влияют на качество изображения.

Таким образом, актуальна задача минимизации времени и увеличения точности наведения и удержания изображения ОН в поле зрения управляемого ОЭП. В этой связи необходимы:

- разработка математических моделей ОЭП как объектов управления;
- синтез алгоритмов управления;
- создание компьютерных имитационных моделей (КИМ);
- исследование систем управления, учитывающих динамику движения управляемого ОЭП;
- определение параметров, влияющих на динамические свойства и качество изображения.

Цель работы — улучшение точностных характеристик и повышение качества изображения ОЭП, работающих в режимах наведения, стабилизации и слежения, за счет рационального выбора их параметров при синтезе и моделировании.

**Материалы и методы.** Разработка САУ ОЭП начинается с решения многокритериальной задачи оптимизации, учитывающей противоречивые технико-экономические (ТЭ) требования. В развитие работы [1] предложена модифицированная методика проектирования САУ ОЭП. За критерий качества САУ примем совокупность динамических характеристик каналов управления, удовлетворяющих условиям:

$$\begin{aligned} T_{\text{ОЭП}}(v_H) \geq T_{\text{ОЭП}}^{\text{доп}}(v_H), \delta(\omega) \leq \delta^{\text{доп}}(\omega), \Delta\alpha_k \leq \Delta\alpha_k^{\text{доп}}, \Delta\dot{\alpha}_k \leq \Delta\dot{\alpha}_k^{\text{доп}}, \\ M \leq M^{\text{доп}}, |\Delta\varphi| \geq \Delta\varphi^{\text{доп}}, |\Delta L| \geq \Delta L^{\text{доп}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $T_{\text{ОЭП}}^{\text{доп}}(v_H)$ ,  $T_{\text{ОЭП}}(v_H)$  — допустимая и реализованная функция передачи модуляции (ФПМ) ОЭП на частоте Найквиста,  $\delta(\omega)$ ;  $\delta^{\text{доп}}$  — амплитудная частотная характеристика перекрестных связей и ее допустимое значение декомпозиции;  $\Delta\alpha_k^{\text{доп}}$ ,  $\Delta\dot{\alpha}_k^{\text{доп}}$ ,  $\Delta\alpha_k$ ,  $\Delta\dot{\alpha}_k$  — допустимые и установившиеся значения динамических погрешностей САУ по углу и угловой скорости при действии возмущений в условиях, близких к реальной эксплуатации САУ;  $k = 1, 2, \dots$  — номер канала управления, обеспечивающего качество изображения;  $M_{\text{доп}} = 1,05-1,25$  — показатель колебательности,  $\Delta\varphi$ ;  $\Delta L$  — запасы устойчивости по фазе и по амплитуде.

Ключевой вопрос в разработке ОЭП — определение допустимых динамических погрешностей (ДДП) стабилизации изображения.

Схема формирования изображения бортового оптико-электронного прибора (БОЭП) представлена на рис. 1.

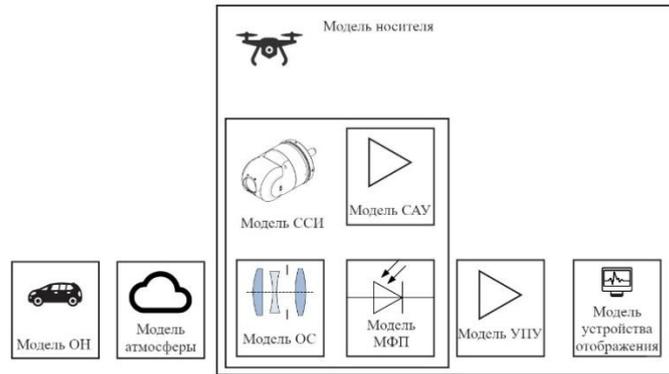


Рис. 1. Функциональная схема модели формирования изображения БОЭП: ОН — объект наблюдения; ОС — оптическая система; МФП — матричный фотоприемник; УПУ — усилительно-преобразовательное устройство; ССИ — система стабилизации изображения

ФПМ БОЭП должна удовлетворять условию, обеспечивающему допустимое качество изображения [2]:

$$T_{\text{ОЭС}}(v) = T_{\text{ат}}(v)T_{\text{об}}(v)T_{\text{фп}}(v)T_{\text{упу}}(v)T_{\text{ССИ}}(v) > T_{\text{ОЭС}}^{\text{доп}}(v), \quad (2)$$

$$T_{\text{ОЭС}}^{\text{доп}}(v) = 2 \left( \text{Sinc} \left( N \frac{v_{\text{л}}}{2} \right) \right)^{-1} \exp \left[ -\frac{(N v_{\text{р}})^2}{16 \ln(2m)} \right].$$

Здесь  $T_{\text{ОЭС}}(v)$  — ФПМ ОЭП;  $N$  — пространственная частота;  $T_{\text{ОЭС}}^{\text{доп}}(v)$  — допустимая ФПМ ОЭП;  $T_{\text{ат}}(v)$  — ФПМ атмосферы;  $T_{\text{об}}(v)$  — ФПМ объектива;  $T_{\text{фп}}(v)$  — ФПМ фотоприемника;  $T_{\text{упу}}(v)$  — ФПМ преобразования оптической информации [1];  $T_{\text{ССИ}}(v)$  — ФПМ сдвига изображения (динамической погрешности ССИ), зависящая от вида динамического смещения изображения: линейного (Л) —  $x(t) = Vt$ , гармонического (Г) —  $x(t) = a_0 \sin(t)$ , случайного (СЛ) и расфокусировки.

Допустимая ФПМ системы стабилизации изображения включает системы слежения, стабилизации, виброзащиты (СВ) и автоматической фокусировки (САФ) [3]:

$$T_{\text{ССИ}}(N) = T_{\text{Л}}(N)T_{\text{Г}}(N)T_{\text{В}}(N)T_{\text{Ф}}(N) \geq T_{\text{ССИ}}^{\text{доп}}(N) = \frac{T_{\text{ОЭП}}^{\text{доп}}(N)}{T_{\text{ст}}(N)},$$

$$T_{\text{Л}}(v) = \text{sinc}(\pi \Delta \alpha_{\text{Л}} v), T_{\text{Г}}(v) = J_0(2\pi \Delta \alpha_{\text{Г}} v), T_{\text{В}}(v) = \exp[-2(\pi \Delta \alpha_{\text{В}} v)^2], \quad (3)$$

$$T_{\text{Ф}}(v) = \frac{2J_1(\Delta_{\text{Ф}})}{\Delta_{\text{Ф}}}, \Delta_{\text{Ф}} = 28\pi\sigma \left( \frac{\lambda_{\text{ср}} v}{D} \right) \left( 1 - \frac{\lambda_{\text{ср}} v}{D} \right),$$

$$T_{\text{ст}}(N) = T_{\text{ат}}(N)T_{\text{об}}(N)T_{\text{фп}}(N)T_{\text{упу}}(N).$$

Здесь  $T_{\text{Л}}(N)$  — погрешность линейного смещения изображения;  $T_{\text{Г}}(N)$  — амплитуда погрешности синусоидального колебания;  $T_{\text{В}}(N)$  — среднее значение погрешности амплитуды вибраций;  $J_0$  — функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $J_1(\Delta_{\text{Ф}})$  — функция Бесселя первого рода первого порядка;  $\Delta_{\text{Ф}}$  — погрешность фокусировки (мм);  $\sigma$  — среднее значение волновой аберрации в долях длины волны;  $\lambda_{\text{ср}}$  — средняя длина волны спектрального диапазона.

Будем исходить из условия, что каждая подсистема САУ должна вносить одинаковую долю изменения качества изображения ОЭП и  $T_{\text{ст}}(N) = \text{const}$  за время наблюдения. Тогда упростится определение допустимых ФПМ ССЛ, СВ, САФ (3):

$$T_j^{\text{доп}}(v) = \sqrt[4]{\frac{T_{\text{ОЭС}}^{\text{доп}}(v)}{T_{\text{ст}}(v)}} \quad (j = \text{Л, Г, В, Ф}). \quad (4)$$

Разложим функции  $T_{\text{Л}}(N), T_{\text{Г}}(N), T_{\text{В}}(N), T_{\text{Ф}}(N)$  (3) в ряд и получим выражения, определяющие ДДП:

$$\Delta \alpha_{\text{Л}}^{\text{доп}} \leq \frac{0,824 \sqrt{1 - T_{\text{Л}}^{\text{доп}}(v_{\text{н}})}}{v_{\text{н}}}, \Delta \alpha_{\text{Г}}^{\text{доп}} \leq \frac{0,335 \sqrt{1 - T_{\text{Г}}^{\text{доп}}(v_{\text{н}})}}{v_{\text{н}}}, \quad (5)$$

$$\Delta \alpha_{\text{Ф}}^{\text{доп}} \leq 3,018 \sqrt{1 - T_{\text{Ф}}^{\text{доп}}(v_{\text{н}})}, \Delta \alpha_{\text{В}}^{\text{доп}} \leq \frac{\sqrt{0,5 \ln[T_{\text{В}}^{\text{доп}}(v_{\text{н}})]^{-1}}}{\rho v_{\text{н}}}.$$

Здесь  $v_{\text{н}}$  — частота Найквиста.

Предельная пространственная частота, которую должен разрешать ОЭП в процессе наблюдения, определяются критерием Джонсона:

$$v_{\text{пр}} = \frac{N_{\text{ДЛ}}}{h_{\text{кр}}}, v_{\text{н}} = 0,5 v_{\text{пр}}, \quad (6)$$

где  $\nu_{\text{пр}}$  — угловая (штр/рад) предельная пространственная частота;  $N_{\text{д}}$  — число элементов разрешения (числа Джонсона);  $L$  — расстояние до ОН;  $h_{\text{кр}}$  — критический размер ОН.

При разложении отбрасываются все члены ряда, кроме первых, поэтому полученные допуски следует уточнить путем градиентного спуска.

Представленные выше рассуждения позволили решить задачу определения точности стабилизации изображения бортовой оптико-электронной системы (БОЭС) для режимов слежения и стабилизации. Были разработаны методика и программа расчета ФПМ и допусков (патент RU2021660340<sup>1</sup>).

Назовем требования, предъявляемые к динамической погрешности САУ ОЭП с учетом допустимой ФПМ ОЭП. Исходные данные для расчета:

- диаметр входного зрачка —  $D = 90$  мм,
- фокусное расстояние ОС —  $f^* = 100$  мм,
- длина волны —  $\lambda = 4$  мкм,
- расстояние до объекта наблюдения —  $L = 10$  км,
- метеорологическая видимость —  $SM = 15$  км,
- высота полета —  $H = 5$  км,
- количество элементов МФП —  $256 \times 256$ ,
- частота кадров —  $F = 400$  Гц,
- вероятность правильного обнаружения —  $P_{\text{обн}} = 0,8$ ,
- вероятность ложной тревоги —  $P_{\text{лт}} = 10^{-4}$ ,
- отношение сигнал/шум усилителя — оптимального фильтра —  $m = 1,105$ ,
- угловой размер объекта наблюдения —  $\gamma_s = 5 \cdot 10^{-5}$  рад,
- угловое расстояние между двумя соседними целями —  $\gamma_p = 3,34 \cdot 10^{-3}$  рад.

Параметры МФП:

- $d = 0,25a$  — толщина фоточувствительного слоя,
- $\epsilon_n = 4 \cdot 10^{-5}$  — неэффективность переноса заряда,
- $\alpha_c = 2$  — число выборок на 1 элемент,
- $k_3 = 0,6$  — коэффициент заполнения,
- $\tau = 5,4 \cdot 10^{-9}$  с — время считывания,
- $\tau_{\text{пр}} = 5 \cdot 10^{-10}$  с — постоянная времени преобразователя.

На рис. 2 приведены ФПМ линейного, гармонического и вибрационного сдвига изображения, соответствующие допустимым и достигнутым ДДП САУ БОЭС.

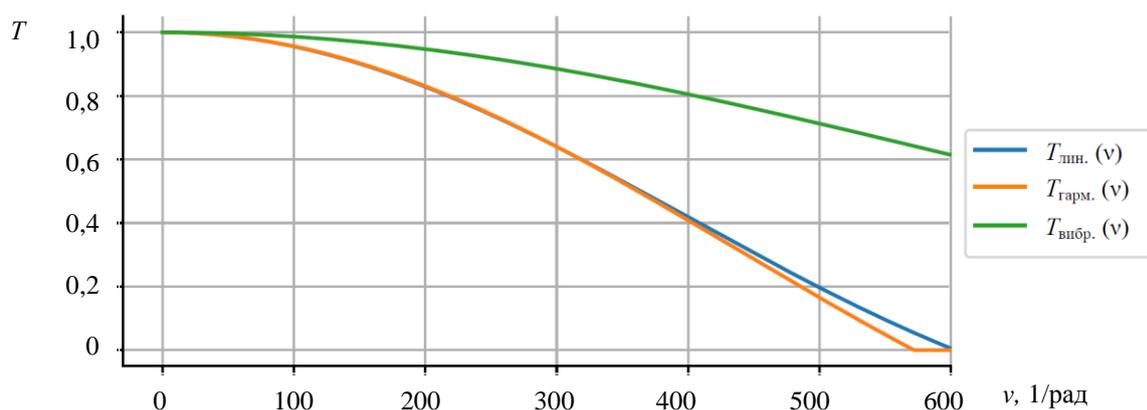


Рис. 2. Функции передачи модуляции  $T_j^{\text{доп}}(\nu)$

В соответствии с (3)–(5) и исходными данными для расчета вычислили:  $\nu_{\text{пр}} = 600$  рад<sup>-1</sup> канала наблюдения БОЭС в инфракрасной области с вероятностью обнаружения  $P = 0,8$ . Для ФПМ БОЭС и ДДП САУ:  $\Delta\alpha_{\text{л}} = 3,5$  угл. мин,  $\Delta\alpha_{\text{г}} = 3,1$  угл. мин,  $\Delta\alpha_{\text{в}} = 3,0$  угл. мин.

<sup>1</sup> Программа вычисления функции передачи модуляции оптико-электронного прибора, базирующегося на БПЛА : патент 2021660340 Рос. Федерация / К. А. Бурдинов ; Университет Иннополис. № 2021619174; заявл. 11.06.2021 ; опубл. 24.06.2021, Бюл. № 7, 1 с.

На основе уравнений Лагранжа II рода и смешанного метода Жильбера получили математическую модель ОУ ОЭП [4] наведения и слежения в виде трех информационных каналов, приводимых в движение электродвигателями типа ДБМ по осям Карданова подвеса. Представили ее в матричном виде<sup>2</sup>:

$$A(q)\ddot{q} + B(t, q)\dot{q} + F(q, \dot{q}) + W(t, q) + Q(t, q) = M_{дв} - M_{тр}. \quad (7)$$

Здесь  $q = (\alpha \ \beta)^T$ ,  $\alpha, \beta$  — углы поворота ОУ по азимуту и углу места.

$$A(q) = \begin{pmatrix} B_1 + B(\beta) & -D(\beta) \\ -D(\beta) & C_2 \end{pmatrix}, B(t, q) = \begin{pmatrix} 0 & b_{\alpha\beta}(t, \alpha, \beta) \\ -b_{\alpha\beta}(t, \alpha, \beta) & 0 \end{pmatrix},$$

$$F(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} -2\dot{\alpha}\dot{\beta}F(\alpha, \beta) - \dot{\beta}^2 E(\beta) \\ \dot{\alpha}^2 F(\beta) \end{pmatrix}, W(t, q) = \begin{pmatrix} w_\alpha(t, q) \\ w_\beta(t, q) \end{pmatrix},$$

$$Q(t, q) = \begin{pmatrix} r_\alpha(q) \\ r_\beta(q) \end{pmatrix} (\tilde{a}_o(t) + A, A, \tilde{g}), M_{дв} = \begin{pmatrix} M_{дв.1} \\ M_{дв.2} \end{pmatrix}, M_{тр} = \begin{pmatrix} M_{тр.1} \text{sign}(\dot{\alpha}) \\ M_{тр.2} \text{sign}(\dot{\beta}) \end{pmatrix},$$

$$b_{\alpha\beta}(t, \alpha, \beta) = \{(2A_2(\beta) - C_2) \cos \alpha - 2E(\beta) \sin \alpha\} \omega_{x_y}(t) - 2F(\beta) \omega_{y_y}(t) - \{(2A_2(\beta) - C_2) \sin \alpha + 2E(\beta) \cos \alpha\} \omega_{z_y}(t),$$

$$w_\alpha(t, q) = \{-\dot{\omega}_{x_y}(t)F(\alpha, \beta) + \dot{\omega}_{y_y}(t)(B_1 + B(\beta)) - \dot{\omega}_{z_y}(t)D(\alpha, \beta)\} + \{E(\alpha, \beta)\Omega_{x_y}^2(t) - E(\alpha, \beta)\omega_{z_y}^2(t) + D(\alpha, \beta)\omega(t)\omega_{y_y}(t) + 2A_1(\alpha, \beta)\omega_{x_y}(t)\omega_{z_y}(t) - F(\alpha, \beta)\omega_{y_y}(t)\omega_{z_y}(t)\},$$

$$w_\beta(t, q) = \{-\dot{\omega}_{x_y}(t)[E(\beta) \cos(\alpha) - C_2 \sin(\alpha)] - \dot{\omega}_{y_y}(t)D(\beta) + \dot{\omega}_{z_y}(t)[E(\beta) \sin(\alpha) + C_2 \cos(\alpha)]\} - \frac{1}{2} \{ [F(\beta)(1 + \cos(2\alpha)) + D(\beta) \sin(2\alpha)] \omega_{x_y}^2(t) - 2F(\beta)\omega_{y_y}^2(t) + [F(\beta)(1 - \cos(2\alpha)) - D(\beta) \sin(2\alpha)] \omega_{z_y}^2(t) + 2[2A_2(\beta) \cos(\alpha) - E(\beta) \sin(\alpha)] \omega_{x_y}(t)\omega_{y_y}(t) - 2[F(\beta) \sin(2\alpha) - D(\beta) \cos(2\alpha)] \omega_{x_y}(t)\omega_{z_y}(t) - 2[E(\beta) \cos(\alpha) + 2A_2(\beta) \sin(\alpha)] \omega_{y_y}(t)\omega_{z_y}(t) \},$$

$$r_\alpha(q) = m_1 \begin{pmatrix} -x_{c_1} \sin(\alpha) + z_{c_1} \cos(\alpha) \\ 0 \\ -x_{c_1} \cos(\alpha) - z_{c_1} \sin(\alpha) \end{pmatrix}^T +$$

$$+ m_2 \begin{pmatrix} -(x_{c_2} \cos(\beta) - y_{c_2} \sin(\beta)) \sin(\alpha) + z_{c_2} \cos(\alpha) \\ 0 \\ -(x_{c_2} \cos(\beta) - y_{c_2} \sin(\beta)) \cos(\alpha) - z_{c_2} \sin(\alpha) \end{pmatrix}^T,$$

$$r_\beta(q) = m_2 \begin{pmatrix} -(x_{c_2} \sin(\beta) - y_{c_2} \cos(\beta)) \cos(\alpha) \\ x_{c_2} \cos(\beta) - y_{c_2} \sin(\beta) \\ (x_{c_2} \sin(\beta) + y_{c_2} \cos(\beta)) \sin(\alpha) \end{pmatrix}^T.$$

Следующий этап разработки — декомпозиция двухсвязной САУ [5] с нелинейными перекрестными связями в ОУ, каким и является исследуемый ОЭП. Линеаризованные уравнения движения относительно траектории имеют вид:

$$\alpha \times_{вх}(t) = \dot{\alpha}_0 t \in 0 \div 2\pi; \beta \times_{вх}(t) = \dot{\beta}_0 t \in 0 \div \pi/2,$$

$$(a_{10} + a_{11})\Delta\ddot{\alpha} + (b_{10} + b_{11})\Delta\dot{\alpha} + c_{11}\Delta\alpha + a_{12}\Delta\ddot{\beta} + b_{12}\Delta\dot{\beta} + c_{12}\Delta\beta = K_{u1}\Delta u_1,$$

$$a_{21}\Delta\ddot{\alpha} + b_{21}\Delta\dot{\alpha} + a_{20}\Delta\ddot{\beta} + b_{20}\Delta\dot{\beta} + c_{22}\Delta\beta = K_{u2}\Delta u_2, \quad (8)$$

$$\Delta u_1 = R_1(p)\Delta\varepsilon_1, \Delta\varepsilon_1 = \Delta\alpha_{вх}^* - \Delta\alpha^*; \Delta u_2 = R_2(p)\Delta\varepsilon_2, \Delta\varepsilon_2 = \Delta\beta_{вх}^* - \Delta\beta^*.$$

Построив переменные коэффициенты системы (8), определим их значения при  $t = t_k^*$  в «опасных» точках, в которых параметры значительно изменяются или меняют знаки в диапазоне углов ( $\beta^* = 0 \div \pi/2$ ,  $\alpha^* = 0 \div 2\pi$ ). Тогда, сведя систему (8) (при  $t = t_k^*$ ) к системе с постоянными параметрами и используя правило Крамера, выразим ее в форме передаточных функций (ПФ) в точках  $t = t_k^*$ :

$$\Delta\alpha = W_{11}(p, t_k^*)\Delta u_1 - W_{12}(p, t_k^*)\Delta u_2, \quad (9)$$

$$\Delta\beta = W_{22}(p, t_k^*)\Delta u_2 - W_{21}(p, t_k^*)\Delta u_1.$$

Полученные ПФ (9) с учетом (8) для каждого выбранного момента времени ( $t = t_k^*$ ) можно представить в виде структурной схемы с прямыми перекрестными связями (ПС, рис. 3). Здесь и далее для простоты записи ПФ обозначим  $W_{kij}(p) = W_{ij}(p, t_k^*)$ .

<sup>2</sup> Математическая модель и синтез системы автоматического управления бортового оптико-электронного прибора / К. А. Бурдинов [и др.] // XII Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики : сб. тр. Уфа, 2019. С. 190–192.



Определены:  $\max \delta_k(\omega) = 0,0136$  (-37,3 дБ)  $< \delta^{\text{доп}} = 0,0335$  (-29,5 дБ),  $\Delta L = M^{\text{доп}} / (M^{\text{доп}} + 1) = 0,535$  (-5,43 дБ) при  $M_{10} = M_{20} = 1,1$ ;  $M^{\text{доп}} = 1,15$ .

Таким образом, двухсвязную систему управления (8) ОЭП при заданных параметрах ОУ для рассматриваемого движения можно представить как два независимых канала управления по азимуту и углу места.

**Результаты исследования.** На рис. 6–7 показаны процессы управления БОЭП в режимах стабилизации и слежения. Масштаб графиков рассогласования увеличен в 600 раз. Графики программного управления и выходной величины визуально совпадают.

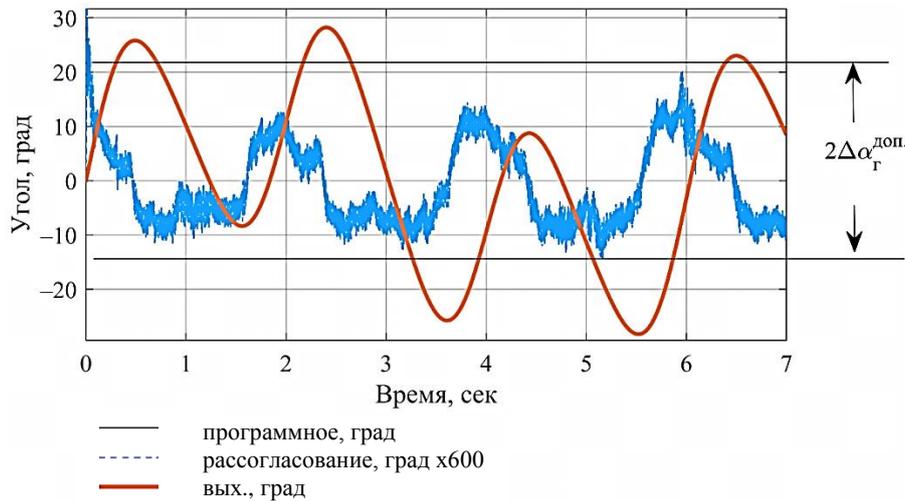


Рис. 6. Процессы стабилизации БОЭП по азимуту

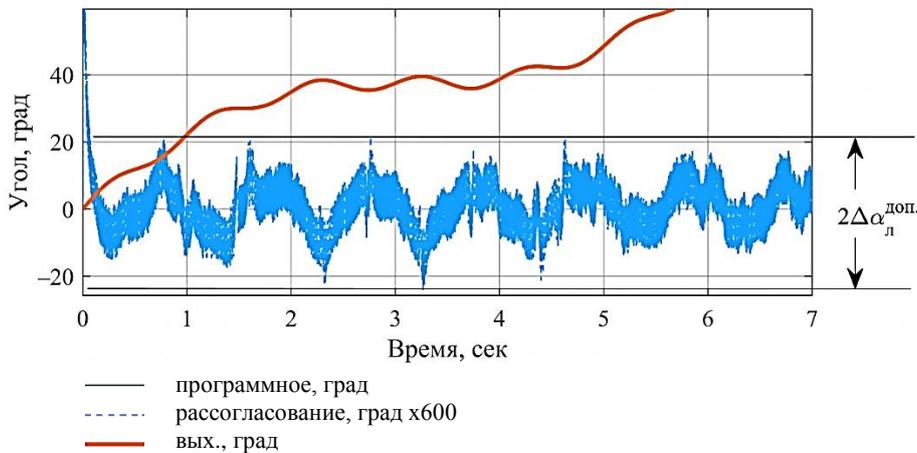


Рис. 7. Процессы слежения БОЭП по азимуту

Опишем гармонические колебания носителя:  $A_1 = A_2 = 2^0$  (амплитуды),  $T_1 = T_2 = 1$  с (периоды колебаний) и  $A_1 = A_2 = 12^0$ ,  $T_1 = T_2 = 6,28$  с. Укажем моменты нагрузки:  $M_{\text{дв}1} = 2,2$  Нм,  $M_{\text{дв}2} = 0,3$  Нм. При таких гармонических колебаниях и моментах нагрузки погрешность стабилизации оси визирования не превышает:

- по азимуту — 1,2 угл. мин,
- по углу места — 1,6 угл. мин.

В режиме слежения при дополнительно введенном управляющем воздействии в виде постоянной скорости  $12^{\text{град/с}}$  погрешность слежения и стабилизации не превышает 1,7 угл. мин по азимуту и 1,3 угл. мин по углу места.

Для исследования динамики пространственного управления БОЭП в соответствии с методикой САУ разработана КИМ цифровой системы автоматического управления (ЦСАУ) ОЭП конкретного назначения (рис. 8) [1].

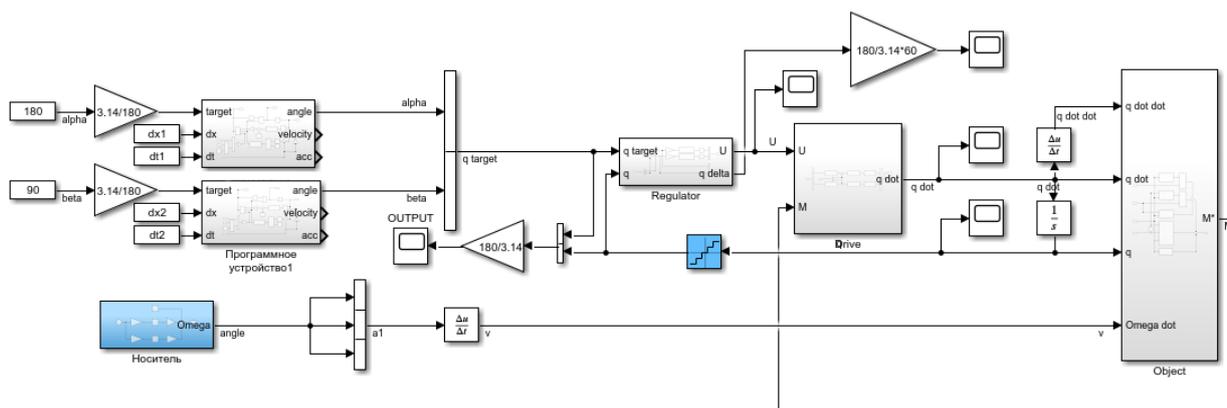


Рис 8. Компьютерная имитационная модель цифровой системы автоматического управления опико-электронным прибором

Решение реализовано в среде Matlab Simulink. Его элементы:

- КИМ ОУ (Object), полученная согласно (7);
- КИМ приводов (Drive);
- КИМ ПИД-регуляторов (Regulator) с учетом нелинейностей и ЦВУ;
- КИМ программного устройства наведения;
- КИМ носителя, реализующего уравнения движения носителя.

На рис. 6 и 7 приведены результаты моделирования ЦСАУ ОЭП без учета движения борта. При этом:

- погрешность наведения не превышает по азимуту 18 угл. мин, по углу места — 10 угл. мин;
- погрешность слежения — 0,6 угл. мин по азимуту, 0,6 угл. мин по углу места;
- погрешность стабилизации — 0,45 угл. мин. по азимуту, 0,6 угл. мин по углу места.

На рис. 9 показаны процессы управления ОЭП с учетом его движения. Погрешность наведения по азимуту — 2 угл. мин, по углу места — 5 угл. мин. Погрешность слежения и стабилизации — 0,8 угл. мин по азимуту, 1,3 угл. мин по углу места.

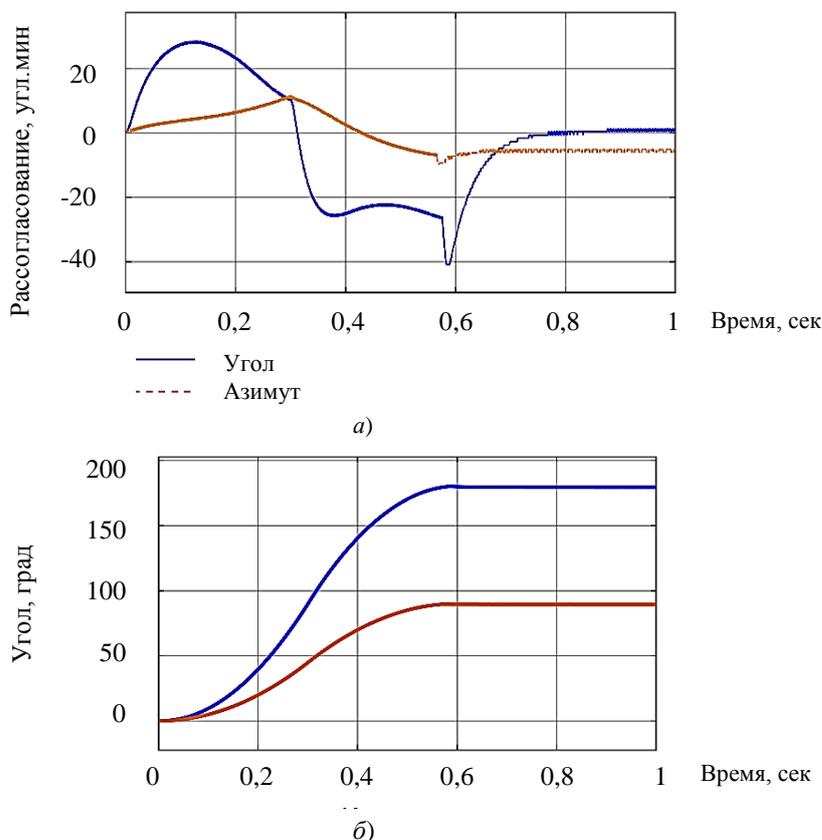


Рис. 9. Результаты моделирования системы в режиме наведения по двум каналам (градусы): а — расхождение системы; б — графики переходных процессов. Во втором случае визуально совпадают график программного управления (alpha target, beta target) и выходной величины (alpha, beta)

**Обсуждение и заключения.** Полученные результаты представлены ниже.

1. Предложена методика оценки допусков на точность стабилизации изображения БОЭП в условиях управляемых и температурных воздействий (патент RU2021660340). Представлены аналитические оценки ДДП стабилизации изображения по (4), (5) для режимов слежения и стабилизации на основе ФПМ ОЭП. Получены требования к САУ, обеспечивающие решение задачи обнаружения ОН в инфракрасной области.

2. Назван критерий приемлемости декомпозиции, описана методика декомпозиции двухсвязной САУ ОЭП с применением компьютерных технологий. Для конструктивных параметров ОУ реального прибора определены требования, позволяющие синтезировать САУ ОЭП как два независимых канала управления.

3. Предложены КИМ САУ ОЭП для исследования динамики изолированных каналов управления и пространственного управления. При этом учтены нелинейность и нестационарность ОУ конкретного назначения.

4. Разработана механическая модель ОЭП, получены уравнения динамики пространственного движения (7) ОУ.

5. Синтезированы параметры ПИД-регуляторов, обеспечивающие устойчивое наведение и стабилизацию ОЭП при всех заданных режимах. Добротность по скорости:  $K_{v1} = (3700 \div 4000)c^{-1}$ ,  $K_{v2} = (3000 \div 3300) c^{-1}$ . Корректирующие звенья:  $T_{k11} = T_{k12} = 0,05c$ ,  $T_{k21} = T_{k22} = 5 \times 10^{-5} c$ . Это обеспечивает более точную работу системы планирования полета и построение траектории [6–8].

6. Показано, что с помощью КИМ можно получить требуемое время и погрешность наведения, стабилизации и слежения. При этом скорость наведения — 0,6 с. Соответствующий показатель зарубежных аналогов —  $1 c^3$ .

7. В [9] рассматривается система лазерного противодействия. Ее технические характеристики позволяют выполнять задачу при  $W = 1000$  Вт/стерадиан и мощности лазера  $P = 3,1$  Вт. В [10] показано, что необходима мощность излучения  $W = 2700$  Вт/стерадиан при мощности лазера  $P = 200$  мВт.

Рассчитаем требуемую точность стабилизации для каждого из представленных случаев по формуле  $\Delta = \frac{2 \times 180 \times 60}{\pi} \arccos\left(1 - \frac{P}{2\pi W}\right)$  [угл. мин] и сведем в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение требуемой точности стабилизации

	Мощность излучения ( $W$ ), Вт/стерадиан	Мощность лазера ( $P$ ), Вт	Требуемая точность стабилизации ( $\Delta$ ), угл. мин
Установка [11]	2700	0,2	33,4
Установка [10]	1000	3,1	216,1
Изделие			1,3

Таким образом, точность стабилизации предлагаемой системы в десятки раз превосходит требуемую в статьях [9, 10]. И это в десятки раз снижает требования к сходимости лазерного пучка и мощности излучения лазера при разработке оптического тракта рассматриваемого изделия.

#### Список сокращений и условных обозначений

ОЭС — оптико-электронная система,  
 ОЭП — оптико-электронный прибор,  
 ОН — объект наблюдения,  
 КИМ — компьютерная имитационная модель,  
 САУ — система автоматического управления,  
 ФПМ — функция передачи модуляции,  
 ДДП — допустимая динамическая погрешность,  
 ССИ — система стабилизации изображения,  
 МФП — матричный фотоприемник.

<sup>3</sup> Directed Infrared Countermeasure (DIRCM) / EMSOPEDIA // [emsopedia.org](https://www.emsopedia.org/entries/directed-infrared-countermeasure-dircm/) : [сайт]. — URL: <https://www.emsopedia.org/entries/directed-infrared-countermeasure-dircm/> (дата обращения: 01.05.2022).

**Список литературы**

1. Методика разработки и испытаний систем управления и виброзащиты бортовых оптико-электронных приборов / В. А. Балоев, К. А. Бурдинов, А. И. Карпов [и др.] // Оптический журнал. — 2021. — Т. 88, № 3. — С. 13–26 <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-03-24-36>.
2. Молин, Д. А. Применение функции передачи модуляции для оценки допустимых характеристик оптико-электронных приборов / Д. А. Молин // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. — 2011. — № 1. — С. 68–75.
3. Сокольский, М. Н. Допуски и качество оптического изображения / М. Н. Сокольский. — Ленинград : Машиностроение, 1989. — 220 с.
4. Балоев, В. А. Имитационное моделирование двухступенчатой системы управления сканирующим устройством бортового базирования / В. А. Балоев, А. И. Карпов, В. А. Кренев [и др.] // Оптический журнал. — 2017. — Т. 84, № 3. — С. 6–14.
5. Гаркушенко, В. И. Синтез многосвязной нестационарной системы управления при неполной информации / В. И. Гаркушенко // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. — 2003. — № 3. — С. 47–49.
6. Bangura, M. Real-time model predictive control for quadrotors / M. Bangura, R. Mahony // IFAC Proceedings Volumes. — 2014. — Vol. 47. — P. 11773–11780 <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00203>
7. Real-time long range trajectory replanning for MAVs in the presence of dynamic obstacles / Geesara Kulathunga, R. Fedorenko, S. Kopylov, A. Klimchik // URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9162605> (accessed: 13.06.2022) <https://doi.org/10.1109/ACIRS49895.2020.9162605>.
8. Optimization-Based Trajectory Tracking Approach for Multi-Rotor Aerial Vehicles in Unknown Environments / Geesara Prathap Kulathunga, Hany Hamed, D. Devitt, A. Klimchik // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2022. — Vol. 7. — P. 4598–4605.
9. Development of a mid-infrared laser for study of infrared countermeasures techniques / H. H. P. Th. Bekman, J. C. van den Heuvel, F. J. M. van Putten, R. Schleijsen // URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/5615/0000/Development-of-a-mid-infrared-laser-for-study-of-infrared/10.1117/12.578214.short?SSO=1> (accessed: 13.06.2022) <https://doi.org/10.1117/12.578214>
10. Optical countermeasures against CLOS weapon systems / A. Toet, K. W. Benoist, J. N. J. van Lingen, R. H. M. A. Schleijsen // URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/8898/1/Optical-countermeasures-against-CLOS-weapon-systems/10.1117/12.2028342.short> (accessed: 13.06.2022) <http://dx.doi.org/10.1117/12.2028342>

Поступила в редакцию 05.05.2022

Поступила после рецензирования 01.06.2022

Принята к публикации 03.06.2022

*Об авторах:*

**Бурдинов Константин Алексеевич**, старший инженер Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники, АНО ВО «Университет Иннополис» (420500, РФ, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 1), [ResearcherID](#), [ORCID](#), [sainquake@gmail.com](mailto:sainquake@gmail.com).

**Шашкина Ксения Михайловна**, руководитель лаборатории беспилотных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники, АНО ВО «Университет Иннополис» (420500, РФ, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), [k.shashkina@innopolis.ru](mailto:k.shashkina@innopolis.ru).

**Эхсан Шагхаей**, инженер Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники, АНО ВО «Университет Иннополис» (420500, РФ, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 1), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), [e.shaghaei@innopolis.university](mailto:e.shaghaei@innopolis.university).

*Заявленный вклад соавторов:*

К. А. Бурдинов — научное руководство, разработка методики, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. Э. Шагхаей — расчеты, подготовка текста, формулирование выводов. К. Шашкина — вычитка и доработка текста.

*Конфликт интересов.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*