

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРАМ. В. Степченко¹, Е. Д. Иванова^{1,2*}¹ Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“, Санкт-Петербург, Россия² БГТУ „Военмех“ им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

* lena210600@mail.ru

Аннотация. Рассматривается оптико-электронный прибор, в котором реализована трехосная система гиросtabilизации, обеспечивающая эффективное функционирование в условиях качки. Выполнен расчет конечно-элементной модели оптико-электронного прибора при действии гармонической вибрации и механических ударов, связанных с условиями его эксплуатации. Исследовано влияние динамических воздействий на положение осей визирования оптических устройств, входящих в состав прибора. Полученные в результате расчета отклонения осей визирования при действии гармонической вибрации превышают допустимые значения. С целью уменьшения влияния динамических воздействий на точностные характеристики оптико-электронного прибора даны рекомендации по доработке конструкции, позволяющие повысить виброустойчивость.

Ключевые слова: оптико-электронный прибор, гиросtabilизатор, трехосная система стабилизации, лазерный дальномер, оси визирования, виброустойчивость

Ссылка для цитирования: Степченко М. В., Иванова Е. Д. Оценка влияния динамических воздействий на характеристики оптико-электронного прибора // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 2. С. 153–159. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-153-159.

EVALUATION OF THE EFFECT OF DYNAMIC INFLUENCES ON THE CHARACTERISTICS
OF AN OPTICAL-ELECTRONIC DEVICEM. V. Stepchenko¹, E. D. Ivanova^{1,2*}¹ Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg, Russia² D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, St. Petersburg, Russia

* lena210600@mail.ru

Abstract. An optoelectronic device is considered, which implements a three-axis gyrostabilization system that ensuring effective operation in pitching conditions. A finite element model of the optoelectronic device functioning under the action of harmonic vibration and mechanical shocks associated with its operating conditions is calculated. The effect of dynamic influences on the position of the axes of sight of the optical devices included in the device is investigated. The deviations of the sighting axes obtained as a result of the calculation under the action of harmonic vibration exceed the permissible values. In order to reduce the influence of dynamic effects on the accuracy characteristics of the optoelectronic device, recommendations are given for refining the design to improve vibration tolerance.

Keywords: optical-electronic device, gyrostabilizer, three-axis stabilization system, laser rangefinder, sighting axes, vibration tolerance

For citation: Stepchenko M. V., Ivanova E. D. Evaluation of the effect of dynamic influences on the characteristics of an optical-electronic device. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 2. P. 153–159 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-153-159.

Оптико-электронный прибор (ОЭП), используемый в морских условиях и предназначенный для получения визуальной информации об окружающей обстановке, представляет собой устройство, в котором имеются узкопольный телевизионный канал, узкопольный тепловизионный канал и канал лазерного дальномера.

Для обеспечения требуемой точности в условиях качки в ОЭП реализована трехосная система гиросtabilизации [1, 2], схема которой приведена на рис. 1 (I — ось визирования; q — угол курса; h — угол места; α — угол поперечной стабилизации).

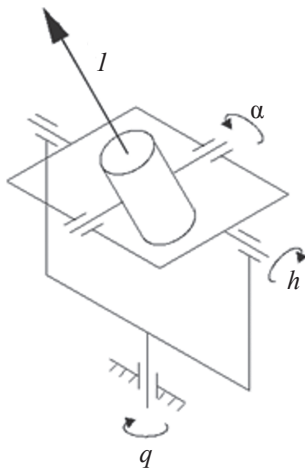


Рис. 1

Входящий в состав ОЭП гиросtabilизатор предназначен для стабилизации, горизонтирования и ориентирования оси визирования прибора в пространстве при качке [3–5].

Пределы поворотов оси визирования ОЭП составляют:

— по курсовому углу в плоскости палубы — 360° ;

— по углу места относительно плоскости палубы — от -30 до $+90^\circ$.

Выбранная схема обеспечивает возможность наблюдения на любых углах места вплоть до зенитной области при высоких угловых скоростях и ускорениях качки.

Оси визирования телевизионного и тепловизионного каналов, а также лазерного дальномера (далее — оптических устройств) должны быть направлены на один и тот же удаленный объект, в связи с чем важно учитывать факторы, способные спровоцировать расхождение этих осей. Однако для обеспечения требований, предъявляемых к прибору при эксплуатации, необходимо учитывать также влияние

ударных и вибрационных воздействий на положение осей визирования, это и является целью настоящей работы.

Решение поставленной задачи подразумевает создание конечно-элементной модели ОЭП, определение ее собственных частот, проведение динамических расчетов при воздействии на ОЭП ударов и вибрации с целью определения численных значений отклонений осей визирования оптических устройств.

Расчеты в настоящей работе выполнены численным методом в программном комплексе компьютерного инженерного анализа. К численным относятся метод конечных разностей и метод конечных элементов [6]. Поскольку использование первого затруднительно для задач со сложной геометрией и непростыми граничными условиями, рассматриваемую задачу предлагается решать методом конечных элементов [7].

Метод конечных элементов основан на представлении реальной конструкции ее дискретной моделью и замене системы дифференциальных уравнений (целевой функции), описывающих напряженно-деформированное состояние сплошных тел, системой линейных алгебраических уравнений [7, 8].

Уравнение движения тела включает в себя три матрицы: масс $\mathbf{M}$, демпфирования $\mathbf{B}$ и жесткости $\mathbf{K}$, а также три вектора: перемещений Δ , скоростей $\dot{\Delta}$ и ускорений $\ddot{\Delta}$. В правой части уравнения записывается вектор узловых сил $\mathbf{P}(t)$, действующих на систему [8]:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\Delta} + \mathbf{B} \cdot \dot{\Delta} + \mathbf{K} \cdot \Delta = \mathbf{P}(t). \quad (1)$$

Уравнение собственных колебаний (2) является частным случаем уравнения движения тела (1):

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\Delta} + \mathbf{K} \cdot \Delta = \mathbf{0}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) видно, что собственные характеристики динамической системы не зависят от внешнего воздействия и определяются исключительно ее жесткостными и массовыми характеристиками.

Формы и частоты собственных колебаний являются собственными характеристиками динамической системы, а процесс нахождения этих характеристик называется модальным анализом. Оценив спектр собственных частот колебаний конструкции на стадии проектирования, можно оптимизировать конструкцию с целью достижения условия частотной виброустойчивости [9].

В целях рационализации задачи некоторые элементы реальной конструкции были заменены эквивалентными массами. Так, в состав расчетной модели, представленной на рис. 2, входят

опора (1), кронштейн (2) и узел телевизионно-дальномерный, УТД (3), внутри которого расположены лазерный дальномер (4), объектив телевизионного канала, ТВК (5) и тепловизор (6).

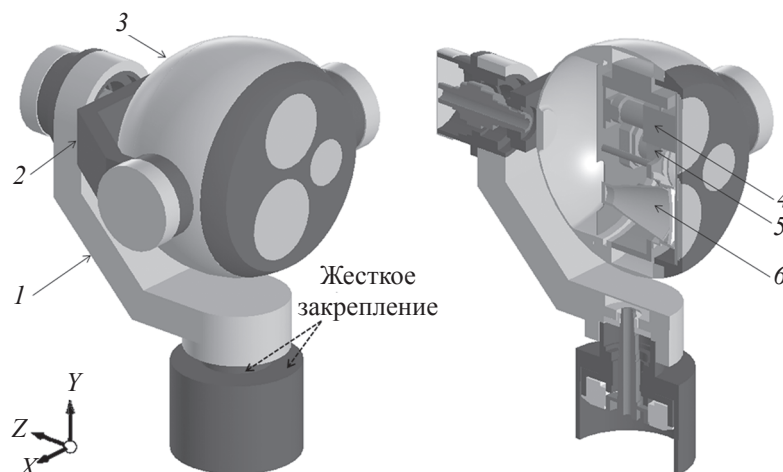


Рис. 2

Масса рассматриваемого ОЭП составляет 78 кг, его габаритные размеры — $727 \times 540 \times 524$ мм. Корпус УТД, а также опора и кронштейн выполнены из алюминиевого сплава Д16, плотность которого равна 2770 кг/м^3 , модуль упругости — $7,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ [10].

Закрепление расчетной модели в программе осуществляется по указанным на рис. 2 поверхностям с помощью функции, ограничивающей все степени свободы выбранных поверхностей.

Для решения задачи необходимо разбить расчетную модель: полученная в процессе генерации сетки конечно-элементная модель ОЭП имеет 292 823 узла и 94 628 элементов (рис. 3).

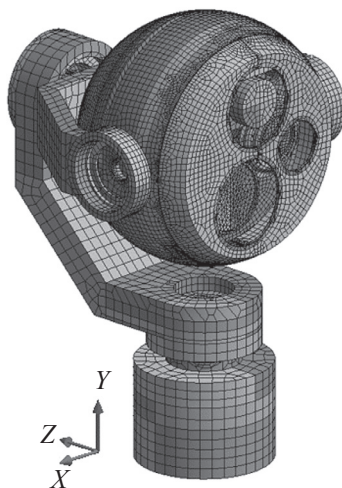


Рис. 3

Будем рассматривать случай, когда на ОЭП в процессе эксплуатации вдоль каждой оси действуют следующие динамические нагрузки: гармоническая вибрация с амплитудой виброускорения $2g$ в диапазоне частот от 1 до 60 Гц; одиночный механический удар полусинусоидальной формы с амплитудой $5g$ и длительностью 0,5–2 мс.

В результате модального анализа были найдены значения первых десяти собственных частот колебаний конструкции (рис. 4).

При проведении модального анализа исследовались все собственные частоты, вносящие существенный вклад в колебания конструкции, для чего использовалось отношение между эффективными массами и полной массой рассматриваемого изделия [11].

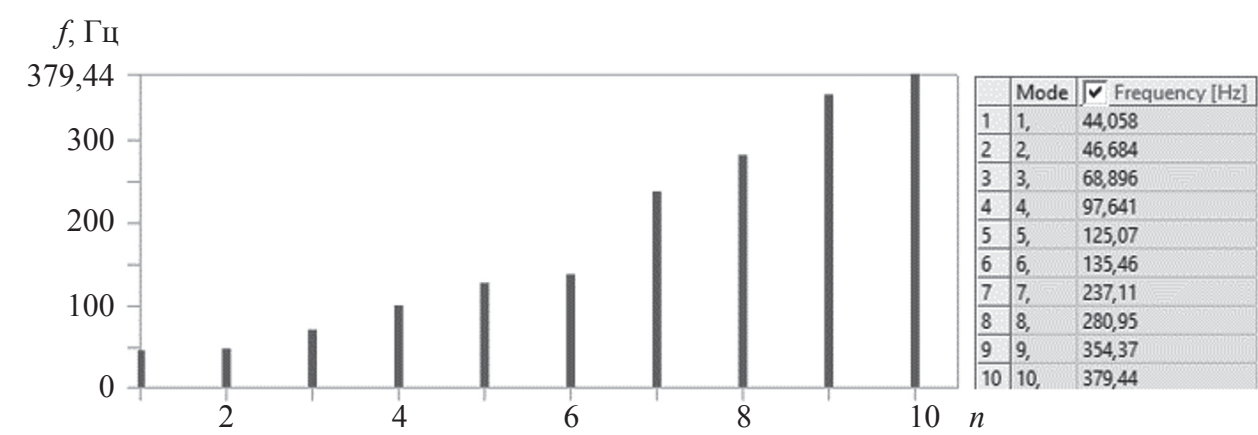


Рис. 4

Как показывают расчеты, наибольший вклад в колебания конструкции вносят первые три собственные частоты: по оси X — 44,1 Гц, по оси Y — 46,7 Гц, по оси Z — 68,9 Гц.

Полученные в результате динамического расчета [11] значения отклонений осей визирования оптических устройств (4)–(6) (рис. 2) при вибрационных и ударных воздействиях представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оптическое устройство	Отклонение осей визирования ОЭП, ...", при					
	гармонической вибрации			одиночном ударе		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Дальномер	81,6	92,4	52,3	35,6	44,4	22,1
Тепловизор	82,1	91,4	56,5	35,8	43,5	24,9
Объектив ТВК	78,6	89,9	52,5	34,2	43,0	22,7

Из табл. 1 видно, что максимальные отклонения осей визирования происходят при вибрации и ударе, действующих вдоль оси Y . Полученные значения отклонений осей визирования при действии вибрации превышают допустимые, поскольку для обеспечения требуемой точности ОЭП отклонения осей визирования не должны превышать 45".

В результате анализа напряженно-деформированного состояния конструкции установлено, что недопустимые отклонения осей визирования обусловлены недостаточной жесткостью конструкции [12]. Одним из вариантов решения проблемы является принятие мер по повышению собственных частот ОЭП с целью повышения виброустойчивости. Для этого требуется либо повысить жесткость конструкции, либо уменьшить ее массу [13, 14].

Вариант № 1. Повысить жесткость конструкции можно посредством изменения форм и размеров деталей [12], а именно: опору (рис. 5, 1; красным пунктиром отмечена геометрия опоры и кронштейна до принятых изменений) и кронштейн (2) сделать более округлой формы; увеличить толщину опоры на 25 мм, толщину кронштейна — на 8 мм; а также увеличить диаметр вала, обеспечивающего поворот ОЭП вокруг оси Z , до 88 мм (в месте посадки кронштейна). В результате такой доработки конструкция ОЭП примет вид, представленный на рис. 5.

В таком случае общая масса ОЭП составит 92 кг, а первые три собственные частоты колебаний конструкции: по оси X — 75,9 Гц, по оси Y — 73,3 Гц, по оси Z — 78,5 Гц.

Полученные с учетом изменения форм и размеров деталей значения отклонений осей визирования оптических устройств при действии вибрации и ударов представлены в табл. 2.

После изменения форм и размеров опоры, кронштейна и вала отклонения осей визирования при действии рассматриваемых динамических нагрузок не превысили допустимых значений. Однако такая доработка конструкции привела к увеличению массы устройства.

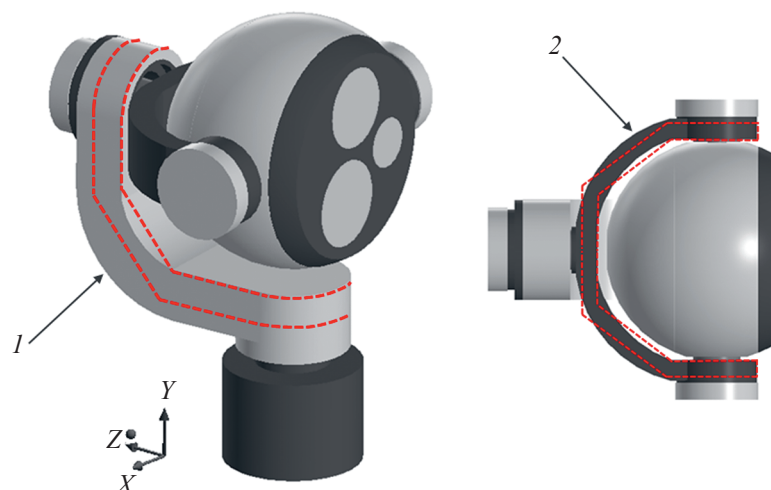


Рис. 5

Таблица 2

Оптическое устройство	Отклонение осей визирования ОЭП, ...", при					
	гармонической вибрации			одиночном ударе		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Дальномер	34,1	43,0	24,4	16,6	22,3	11,2
Тепловизор	34,7	42,2	27,7	16,9	21,8	12,8
Объектив ТВК	31,1	41,6	24,2	15,3	21,4	11,1

Вариант № 2. Повысить жесткость конструкции, не утяжеляя ее и не изменяя геометрические размеры, можно путем использования конструкционных композиционных материалов (композитов), обладающих относительно низкой плотностью и высоким модулем упругости [15].

Композиционные материалы представляют собой объемное сочетание компонентов с четко выраженной границей раздела, они состоят из матрицы (связующего) и равномерно распределенных в ней армирующих наполнителей. Свойства композитов в основном зависят от физико-механических свойств компонентов и прочности связи между ними [16].

Матрица придает изделию из композиционного материала заданную форму и монолитность. Свойства матрицы определяют эксплуатационные характеристики и технологические режимы получения композиционных материалов. Армирующие наполнители вводят в композиционные материалы с целью увеличения прочности, жесткости и пластичности, а также изменения характеристик в различных направлениях или отдельных местах изделия.

Полимерный композиционный материал, содержащий в качестве армирующего наполнителя переплетенные нити углеродного волокна, называется углепластиком (карбоном), он характеризуется высокой прочностью, жесткостью и малой плотностью [16].

Таким образом, альтернативным способом обеспечения допустимых отклонений является повышение жесткости кронштейна путем замены материала этих элементов (алюминиевого сплава) на карбон, модуль упругости которого достигает $2 \cdot 10^5$ МПа [17]. Также при этом снижается масса корпуса УТД, поскольку карбон характеризуется малой плотностью (1450 кг/м^3) [17]. В таком случае масса корпуса УТД уменьшится почти на 50 %, а общая масса ОЭП не превысит 66 кг при неизменных размерах деталей.

Первые три собственные частоты колебаний ОЭП составят: по оси X — 76,4 Гц, по оси Y — 72,4 Гц, по оси Z — 70,7 Гц.

Полученные в результате замены материала отклонения осей визирования при действии вибрации и ударов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Оптическое устройство	Отклонение осей визирования ОЭП, ...", при					
	гармонической вибрации			одиночном ударе		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Дальномер	36,3	36,6	39,8	19,3	21,8	19,1
Тепловизор	36,8	35,5	41,3	19,6	20,6	21,6
Объектив ТВК	33,4	34,3	40,3	17,4	20,1	19,7

Таким образом, после замены материала кронштейна и корпуса УТД на карбон отклонения осей визирования при действии рассматриваемых динамических нагрузок также не превысили допустимых значений.

В работе выполнен численный расчет конечно-элементной модели оптико-электронного прибора при воздействии гармонической вибрации и механических ударов. Проведена оценка влияния указанных динамических воздействий на положение осей визирования оптических устройств, входящих в состав прибора. Полученные в результате расчета значения отклонений осей визирования показали, что для обеспечения требуемой точности необходимо снизить влияние вибрационных воздействий либо за счет изменения форм и размеров деталей конструкции, либо путем замены материала кронштейна и корпуса телевизионно-дальномерного узла. Предлагается заменить изначально используемый алюминиевый сплав конструкционным композиционным материалом — карбоном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пельпор Д. С. Гироскопические системы. Теория гироскопических стабилизаторов. М.: Высш. шк., 1986. 423 с.
2. Пельпор Д. С. Гироскопические системы ориентации и стабилизации: справочное пособие. М.: Машиностроение, 1982. 165 с.
3. Серегин В. В. Прикладная теория и принципы построения гироскопических систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 78 с.
4. Лысов А. Н., Лысова А. А. Теория гироскопических стабилизаторов. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2009. 117 с.
5. Мосягин Г. М., Немтинов В. Б., Лебедев Е. Н. Теория оптико-электронных систем. М.: Машиностроение, 1990. 432 с.
6. Каменев С. В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях. Оренбург: ОГУ, 2019. 110 с.
7. Макаров Е. Г. Метод конечных элементов в прочностных расчетах. СПб: БГТУ „Военмех“ им. Д.Ф. Устинова, 2017. 136 с.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 26–59 с.
9. Гавриков А. В., Ворона Н. А. Механические колебания. М.: МФТИ, 2011. 37 с.
10. Белецкий В. М., Кривов Г. А. Алюминиевые сплавы: состав, свойства, технология, применение / Под общ. ред. академика РАН И.Н. Фридляндера. Киев: КОМИНТЕХ, 2005. 365 с.
11. Арсеньев С. И., Буткарева Н. Г., Мишин А. М., Санников В. А., Титух И. Н. Численные методы решения динамических задач механики деформируемого твердого тела. СПб: БГТУ „Военмех“ им. Д.Ф. Устинова, 1997. 71 с.
12. Аркуша А. И. Техническая механика: теоретическая механика и сопротивление материалов. М.: ЛЕНАНД, 2016. 352 с.
13. Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П. Сопротивление материалов. М.: Высш. шк., 2003. 560 с.
14. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
15. Леонов В. В., Артемьева О. А., Кравцова Е. Д. Материаловедение и технология композиционных материалов. Красноярск: СФУ, 2007. 241 с.
16. Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб: Профессия, 2008. 560 с.
17. Мелешко А. И., Половников С. П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2007. 192 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Максим Владимирович Степченко** — ЦНИИ „Электроприбор“, отдел БИНС на ЭСГ и гироскопических чувствительных элементов; начальник сектора; E-mail: smv_gtn@mail.ru
- Елена Денисовна Иванова** — магистрант; БГТУ „Военмех“ им. Д.Ф. Устинова, кафедра „Механика деформируемого твердого тела“; ЦНИИ „Электроприбор“; инженер; E-mail: lena210600@mail.ru

Поступила в редакцию 10.07.24; одобрена после рецензирования 09.09.24; принята к публикации 25.12.24.

REFERENCES

1. Pelpor D.S. *Гироскопические системы. Теория гироскопических стабилизаторов* (Gyroscopic Systems. Theory of Gyroscopic Stabilizers), Moscow, 1986, 423 p. (in Russ.)
2. Pelpor D.S. *Гироскопические системы ориентации и стабилизации* (Gyroscopic Systems of Orientation and Stabilization), Moscow, 1982, 165 p. (in Russ.)
3. Seregin V.V. *Прикладная теория и принципы проектирования гироскопических систем* (Applied Theory and Principles of Designing Gyroscopic Systems), St. Petersburg, 2007, 78 p. (in Russ.)
4. Lysov A.N., Lysova A.A. *Теория гироскопических стабилизаторов* (Theory of Gyroscopic Stabilizers), Chelyabinsk, 2009, 117 p. (in Russ.)
5. Mosyagin G.M., Nemtinov V.B., Lebedev E.N. *Теория оптико-электронных систем* (Theory of Optical-Electronic Systems), Moscow, 1990, 432 p. (in Russ.)
6. Kamenev S.V. *Osnovy metoda konechnykh elementov v inzhenernykh prilozheniyakh* (Fundamentals of the Finite Element Method in Engineering Applications), Orenburg, 2019, 110 p. (in Russ.)
7. Makarov E.G. *Metod konechnykh elementov v prochnostnykh raschetakh* (Finite Element Method in Strength Calculations), St. Petersburg, 2017, 136 p. (in Russ.)
8. Zienkiewicz O.C. *The finite element method in engineering science*, London, 1971.
9. Gavrikov A.V., Vorona N.A. *Mekhanicheskiye kolebaniya* (Mechanical Vibrations), Moscow, 2011, 37 p. (in Russ.)
10. Beletskiy V.M., Krivov G.A. *Alyuminiyevyye splavy: sostav, svoystva, tekhnologiya, primeneniye* (Aluminum Alloys: Composition, Properties, Technology, Application), Kiyev, 2005, 365 p. (in Russ.)
11. Arsenyev S.I., Butkareva N.G., Mishin A.M., Sannikov V.A., Tituh I.N. *Chislennyye metody resheniya dinamicheskikh zadach mekhaniki deformiruyemogo tverdogo tela* (Numerical Methods for Solving Dynamic Problems of Mechanics of Deformable Solids), St. Petersburg, 1997, 71 p. (in Russ.)
12. Arkusha A.I. *Tekhnicheskaya mekhanika: teoreticheskaya mekhanika i soprotivleniye materialov* (Technical Mechanics: Theoretical Mechanics and Strength of Materials), Moscow, 2016, 352 p. (in Russ.)
13. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Soprotivleniye materialov* (Strength of Materials), Moscow, 2003, 560 p. (in Russ.)
14. Feodosyev V.I. *Soprotivleniye materialov* (Strength of Materials), Moscow, 1999, 592 p. (in Russ.)
15. Leonov V.V., Artemyeva O.A., Kravtsova E.D. *Materialovedeniye i tekhnologiya kompozitsionnykh materialov* (Material Science and Technology of Composite Materials), Krasnoyarsk, 2007, 241 p. (in Russ.)
16. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. *Polimernyye kompozitsionnyye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya* (Polymer Composite Materials: Structure, Properties, Technology), St. Petersburg, 2008, 560 p. (in Russ.)
17. Meleshko A.I., Polovnikov S.P. *Uglerod, uglerodnyye volokna, uglerodnyye kompozity* (Carbon, Carbon Fibers, Carbon Composites), Moscow, 2007, 192 p. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- Maxim V. Stepchenko** — Concern CSRI Elektropribor, Department of Electrostatic Gyroscope SINS and Gyroscopic Sensing Elements; Head of a Sector; E-mail: smv_gtn@mail.ru
- Elena D. Ivanova** — Concern CSRI Elektropribor, Department of Electrostatic Gyroscope SINS and Gyroscopic Sensing Elements; Engineer; D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, Department of Mechanics of Deformable Solids; Student; E-mail: lena210600@mail.ru

Received 10.07.24; approved after reviewing 09.09.24; accepted for publication 25.12.24.