

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-803-811

УДК 629.7.036.621.373

Моделирование процесса корректировки формы роторов шаровых гироскопов

Маргарита Алексеевна Тит¹, Сергей Николаевич Беляев²,
Александр Григорьевич Щербак³, Ольга Сергеевна Юльметова⁴✉

^{1,2,3,4} АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

⁴ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ rita93.07.93.07@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0069-2940>

² serenible@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3765-9469>

³ asherbak1946@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8507-7653>

⁴ olga@yulmetova.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9899-5939>

Аннотация

Введение. Совершенствование технологии изготовления гироскопических приборов, являющихся автономными датчиками выработки параметров движения объектов, имеет стратегическое значение и является приоритетным направлением развития различных отраслей промышленности. Объектом исследования выступают роторы шаровых гироскопов, геометрические параметры которых определяют точностные характеристики прибора. В работе представлены результаты моделирования процесса корректировки формы ротора на стадии его изготовления в процессе напыления функционального покрытия. **Метод.** Предложенная математическая модель процесса напыления основана на размещении между ротором и источником подвижного экрана с отверстием. Ось экрана лежит на динамической оси ротора и обеспечивает нанесение покрытия на поверхность сферического сегмента. Целью для разработки математической модели послужила необходимость управления геометрией напыляемой поверхности. Управление можно выполнить с помощью экрана с отверстием при использовании точечного источника напыляемого материала. Перемещение экрана или ротора вдоль динамической оси ротора в процессе нанесения дополнительного слоя, а также вращение ротора вокруг динамической оси позволяет в широких пределах и с высокой точностью до сотых долей микрометра регулировать кривизну формируемого покрытия. **Основные результаты.** Разработана аналитическая модель технологического процесса корректировки формы сферических роторов шаровых гироскопов. Приведено математическое описание, управляющие факторы и значимые параметры процесса. Представлены результаты практической апробации разработанных моделей. **Обсуждение.** Представленная математическая модель позволяет осуществлять корректировку формы роторов при напылении функционального покрытия, расширяя технологические возможности процесса изготовления и обеспечивая повышение точности роторов.

Ключевые слова

покрытие, корректировка формы, напыление, моделирование, сферический ротор

Ссылка для цитирования: Тит М.А., Беляев С.Н., Щербак А.Г., Юльметова О.С. Моделирование процесса корректировки формы роторов шаровых гироскопов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 4. С. 803–811. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-803-811

Modeling of the process of spherical form correction for rotors of electrostatically suspended gyros

Margarita A. Tit¹, Sergey N. Belyaev², Alexandr G. Shcherbak³, Olga S. Yulmetova⁴✉

^{1,2,3,4} Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

⁴ ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ rita93.07.93.07@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0069-2940>

² serenible@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3765-9469>

³ asherbak1946@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8507-7653>

⁴ olga@yulmetova.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9899-5939>

© Тит М.А., Беляев С.Н., Щербак А.Г., Юльметова О.С., 2023

Abstract

Improvement of the manufacturing technology for gyroscopic devices, which autonomously generate motion parameters of moving objects, has strategic importance and priority for various industries. The object of current research is a spherical rotor of an electrostatically suspended gyroscope which geometric parameters determine the accuracy characteristics of the device. The paper presents results of the process modeling of spherical form correction for rotors of electrostatically suspended gyroscopes at the stage of its manufacture during the coating deposition process. The proposed mathematical model of the deposition process is based on the placement of a movable screen with a hole between a rotor and a spray source. The axis of the hole lies on the dynamic axis of the rotor and it provides a formation of a spherical segment on the coating rotor surface. During deposition of an additional layer, the screen or rotor moves along the dynamic axis of the rotor changing the distance between the rotor and the screen, and there is additional rotation of the rotor around its dynamic axis. It allows adjusting the curvature of the formed coating on the rotor surface. An analytical model of the technological process for correcting the shape of spherical rotors of electrostatically suspended gyroscopes has been developed. A mathematical description, control factors and significant parameters of the process are given. The results of practical testing of the developed model are presented. The presented mathematical model makes it possible to correct the shape of the rotors during the deposition of a functional coating expanding the technological possibilities and increasing the accuracy of rotors.

Keywords

coating, shape correction, deposition, modeling, spherical rotor

For citation: Tit M.A., Belyaev S.N., Shcherbak A.G., Yulmetova O.S. Modeling of the process of spherical form correction for rotors of electrostatically suspended gyros. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 803–811 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-803-811

Введение

Точностные характеристики шаровых гироскопов [1, 2], таких как криогенный и бескарданный электростатический гироскоп (БЭСГ) [3], существенно зависят от технологического процесса изготовления сферического ротора — основного узла чувствительного элемента. Требования, предъявляемые к ротору по отклонению от сферичности и дисбалансу, составляют сотые доли микрометра, что создает предпосылки для разработки управляемой технологии [4], обеспечивающей возможность варьирования указанных параметров в заданных пределах.

Геометрические параметры заданы конечным диаметром ротора и некруглостью, контроль которой осуществляется на основе гармонического анализа круглограмм ротора в нескольких сечениях. Отклонение от круглости сферы ротора измеряется с помощью кругломера Talygond 73. Профиль регистрируется в виде полярного графика. Получаемая профилограмма конкретного сечения после компьютерной обработки дискретно раскладывается в ряд Фурье и представляется в виде совокупности гармоник

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} R_k e^{-2\pi i n k / N},$$

где X_n — комплексная амплитуда n -ой гармоники; R_k — значение длины радиус-вектора на угловом отсчете $2\pi k / N$; N — длина сигнала. Амплитудный спектр определяется как $A_n = \frac{2X_n}{N}$. Из полученных гармоник значимыми являются первые шесть, причем первая гармоника A_1 характеризует эксцентриситет ротора относительно центра измерения, т. е. точность установки ротора. Следующие гармоники определяют в меридиональном сечении: A_2 — эллиптичность, A_3 — треугольную аномалию, A_4 — квадратичность, A_5 — звездобразную форму, A_6 — грушевидность. К виду формы сферического ротора шарового гироскопа предъявляются требования к усредненным амплитудам гармоник

в четырех меридиональных сечениях и одном экваториальном.

Для сплошного ротора БЭСГ [3] паспортизируются амплитуды A пяти гармоник формы ($A_2 \leq 0,05$ мкм; $A_3 \leq 0,025$ мкм; $A_4, A_5, A_6 \leq 0,015$ мкм). Ротор криогенного гироскопа должен иметь наружный диаметр $10 \pm 0,005$ мм [3], средние значения амплитуд гармоник: $A_2 \leq 0,02$ мкм, $A_3, A_5 \leq 0,005$ мкм, $A_4, A_6 \leq 0,01$ мкм.

Технологический цикл изготовления роторов предполагает формообразование заготовки методами механической обработки и последующее напыление тонкопленочных функциональных покрытий [5, 6] нитрида титана [7, 8] для БЭСГ и ниобия [9–13] для криогенного гироскопа. При необходимости, в зависимости от модификации прибора, на поверхности покрытия формируется светоконтрастный рисунок, обеспечивающий функционирование оптоэлектронной системы при получении информации [14–17].

При напылении покрытий, решающих задачи, в том числе и многоцелевые, формирования параметров ротора (дисбаланс и форма) оперируют величинами в сотые и тысячные доли микрометра, что недостижимо при других методах обработки. В связи с этим исследование, связанные с развитием и совершенствованием технологии нанесения функциональных тонкопленочных покрытий, являются важными и актуальными.

Постановка задачи

Формирование тонкопленочных покрытий осуществлено методом магнетронного распыления или конденсации ионной бомбардировкой с применением специальных средств технологического оснащения. Ориентация ротора в процессе напыления по отношению к потоку напыляемого материала определяет конечную форму поверхности. Схема фиксации ротора в приспособлении [7] предполагает крепление в четырех точках, соответствующих вершинам правильной трехгранной пирамиды. При этом с одной стороны ротора расположен один игольчатый упор, а с другой — три

упора, образующие трехконцевую вилку. Поскольку элементы фиксации размещены несимметрично относительно поверхности ротора, возможно возникновение локальных дефектов на уровне сотых долей микрометра, вызванных экранированием элементами фиксации.

Очевидно, что существенным фактором является величина отклонения от номинальной толщины покрытия Δh в зоне экранирования, определяемой сферическим сегментом в области размещения трехконцевой вилки и характеризуемая углом θ_{\max} (рис. 1).

Фактически на поверхности ротора образуется незаполненный материалом покрытия фрагмент, который, рассматривая зону экранирования как поверхность сферического сегмента, имеющего исходный радиус R_c (рис. 1), ограничен двумя сферическими поверхностями — R_c и требуемого радиуса R . При этом можно ввести понятие расстояния Δ между центрами сфер радиусами R_c и R , а сам фрагмент определить как выпукло-вогнутый сегмент или выпукло-вогнутый мениск (линзу).

Цель работы — разработка математической модели и создание средств оснащения для корректировки формы роторов.

Моделирование процесса корректировки формы и дисбаланса сферического ротора

Моделирование [18–21] процесса корректировки формы ротора обусловлено формированием целевой функции, в которой оптимизируемыми аргументами являются сочетания управляющих факторов.

У реального ротора значения Δh , R_c и угол θ_{\max} определяются из профилограммы меридионального сечения, полученной при измерении формы ротора после напыления. При этом корректировка геометрии

ротора возможна за счет дополнительного напыления, обеспечивающего заполнение указанного фрагмента материалом покрытия на втором этапе напыления. Формирование покрытия должно осуществляться только в зоне сферического сегмента, определяемого углом θ_{\max} , что на практике может быть обеспечено за счет использования экрана с отверстием диаметра d , размещенного между источником напыляемого материала и ротором [22].

Комплексно рассмотрена технология формирования поверхностного покрытия и сформулированы принципы, определяющие оптимизацию процесса корректировки функциональных параметров ротора в процессе дополнительного этапа напыления:

- размещение между ротором и источником экрана с отверстием диаметра d , ось которого лежит на динамической оси ротора, обеспечивает нанесение покрытия на поверхность сферического сегмента, определяемого углом θ_{\max} ;
- осуществление в процессе нанесения дополнительного слоя перемещения экрана или ротора вдоль динамической оси ротора, изменяя расстояние между ротором и экраном, и вращение ротора вокруг динамической оси, что позволяет регулировать кривизну формируемого покрытия;
- использование точечного источника напыляемого материала, что позволяет при применении экрана с отверстием управлять геометрией напыляемой поверхности.

Рассмотрим предложенную схему корректировки формы методом дополнительного напыления и определим зависимость желаемого профиля покрытия от значимых параметров Δh и θ_{\max} , характеризующих отклонение от сферичности поверхности ротора, полученное на этапе напыления.

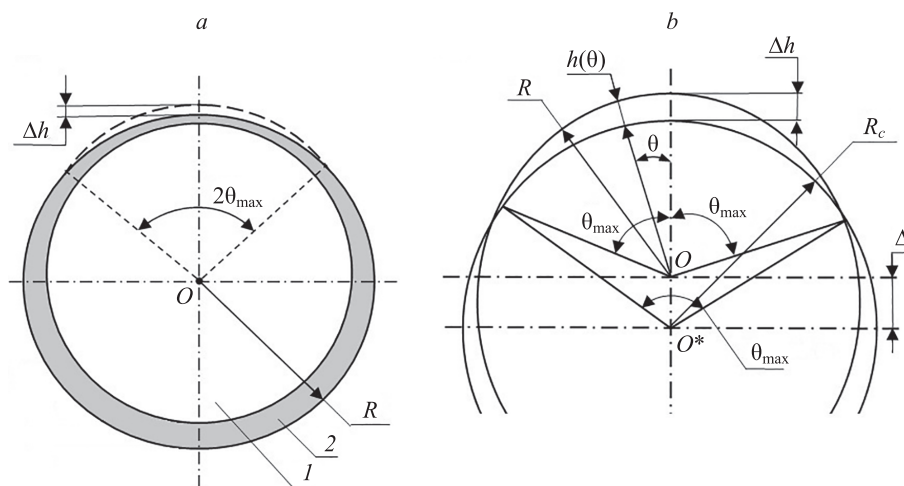


Рис. 1. Схема напыления при неподвижном экране: искажение формы ротора (а) и формируемый фрагмент (б).

θ_{\max} — угол, определяющий зону экранирования; 1 — ротор; 2 — покрытие; R — радиус ротора; Δh — отклонение по толщине покрытия; R_c — радиус сферического сегмента в зоне экранирования; $h(\theta)$ — толщина покрытия в произвольной точке; Δ — расстояние между центрами сфер радиусами R_c и R

Fig. 1. Deposition scheme with a fixed screen. Rotor shape distortion.

1 — rotor; 2 — coating; R is the radius of the rotor; Δh is the deviation in the coating thickness; θ_{\max} is the angle defining the shielding zone (a); Fragment being formed: R_c is the radius of the spherical segment in the shielding zone; $h(\theta)$ is the coating thickness at an arbitrary point; Δ is the distance between the centers of spheres with radii R_c and R (b)

Будем считать, что h — толщина покрытия на оси симметрии фрагмента (максимальная толщина покрытия) и используем понятие расстояния Δ между центрами O и O^* сфер радиусами R_c и R (рис. 1). Последовательными преобразованиями на основе геометрических построений получим выражение:

$$h = \frac{\Delta h - \Delta + \Delta \cos \theta^*}{1 - \frac{\Delta}{R_c} \cos \theta^*}. \quad (1)$$

Подставим в выражение (1) соотношение $\Delta h = \frac{\Delta h}{1 - \cos \theta_{\max}}$ и получим желаемый профиль в зависимости от угла экранирования θ_{\max} :

$$h(\theta) = \Delta h \frac{\cos \theta - \cos \theta_{\max}}{1 - \cos \theta_{\max}}. \quad (2)$$

С точки зрения практической реализации реальный профиль толщины получаемого покрытия можно получить при условии использования неподвижного экрана, размещенного между источником напыляемого материала и ротором. Реальный профиль определим зависимостью скорости осаждения покрытия V_k от угла α между направлением потока и нормалью к поверхности ротора в данной точке, а также расходимостью потока, определяемой соотношением $1/l^2$, где l — расстояние от источника до данной точки поверхности ротора.

Согласно [7], определим скорость осаждения:

$$V_k \sim A \frac{\cos \alpha}{l^2}, \quad (3)$$

где A — размерная константа, зависящая от конкретных характеристик источника.

По теореме косинусов из рис. 1, считая, что $\theta_{\max} \approx \theta^*_{\max}$, определим выражения для l^2 и для угла α в виде:

$$l = (R_c)^2 + (L + R_c)^2 - 2(R_c + L)R_c \cos \theta^*, \quad (4)$$

$$\cos \alpha = \frac{(L + R_c) \cos \theta^* - R_c}{((R_c)^2 + (L + R_c)^2 - 2(R_c + L)R_c \cos \theta^*)^{1/2}} \quad (5)$$

где L — минимальное расстояние от источника до поверхности ротора. Учитывая выражения (4) и (5), из зависимости (3) можно получить скорость осаждения:

$$V_k = A \frac{(L + R_c) \cos \theta^* - R_c}{((R_c)^2 + (L + R_c)^2 - 2(R_c + L)R_c \cos \theta^*)^{3/2}} \quad (6)$$

В выражении (6) можно пренебречь малым отличием углов θ и θ^* и радиусов R и R_c .

При этом профиль толщины покрытия $h(\theta)$ получим из соотношения:

$$h(\theta) = V_k(\theta) \tau = \tau A \frac{(L + R_c) \cos \theta^* - R_c}{((R_c)^2 + (L + R_c)^2 - 2(R_c + L)R_c \cos \theta^*)^{3/2}} \quad (7)$$

где τ — время напыления.

Таким образом, выражение (2) определяет желаемый профиль напыления, а выражение (7) — реальный. Видно, что функциональные зависимости от угла θ в выражениях (2) и (7) различны, поэтому ни при каких значениях параметров (L, R, θ_{\max}) они не будут тождественны. Можно лишь подобрать значения, чтобы разница была минимальна.

На рис. 2 показаны графические зависимости, определяющие желаемый профиль, и рассчитанные в соответствии с выражением (7) профили толщины для разных величин L и углов θ_{\max} . Профили были нормированы по Δh . Радиус ротора $R_c = 5$ мм.

Из графиков рис. 2 видно, что можно добиться компенсации толщины покрытия на оси сферического сегмента. При этом профиль толщины покрытия в зоне всего сегмента будет отличаться от желаемого.

В ряде случаев, когда параметры искажения формы после первого этапа напыления покрытия имеют сравнительно небольшие величины, может быть использован рассматриваемый метод корректировки формы, поскольку несовпадение профилей будет составлять тысячные доли микрометра. Однако в широком применении предложенная схема корректировки может оказаться недостаточной и необходимо обеспечить формирование желаемого профиля толщины покрытия без отклонений.

Чтобы добиться максимально точного совпадения, требуемого и фактически напыляемого профилей толщины, предложено использовать кинематическую схему, в которой осуществлено поступательное движение экрана или ротора, синхронизированное с процессом напыления покрытия [22]. Таким образом, целесообразно

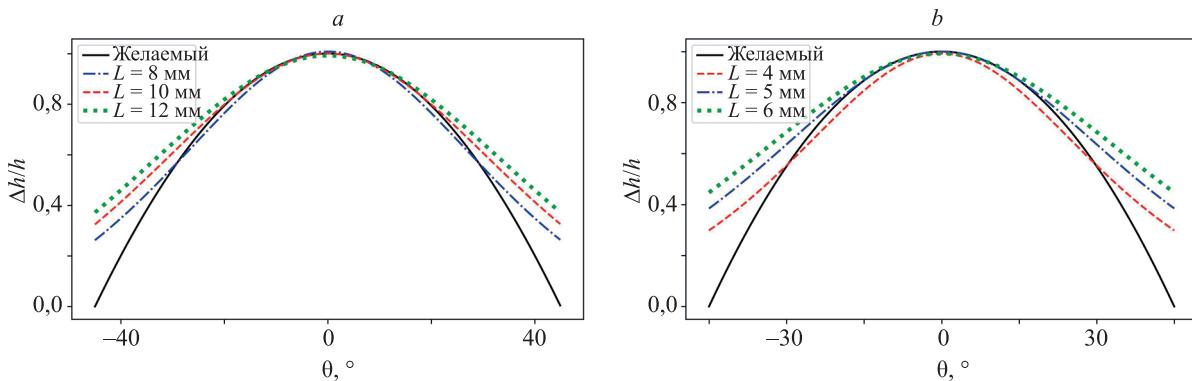


Рис. 2. Нормированные зависимости профилей толщины для разных величин L при $2\theta_{\max}$: 90° (a) и 60° (b)

Fig. 2. Normalized dependencies of thickness profiles for different values of L and for $2\theta_{\max}$: 90° (a) and 60° (b)

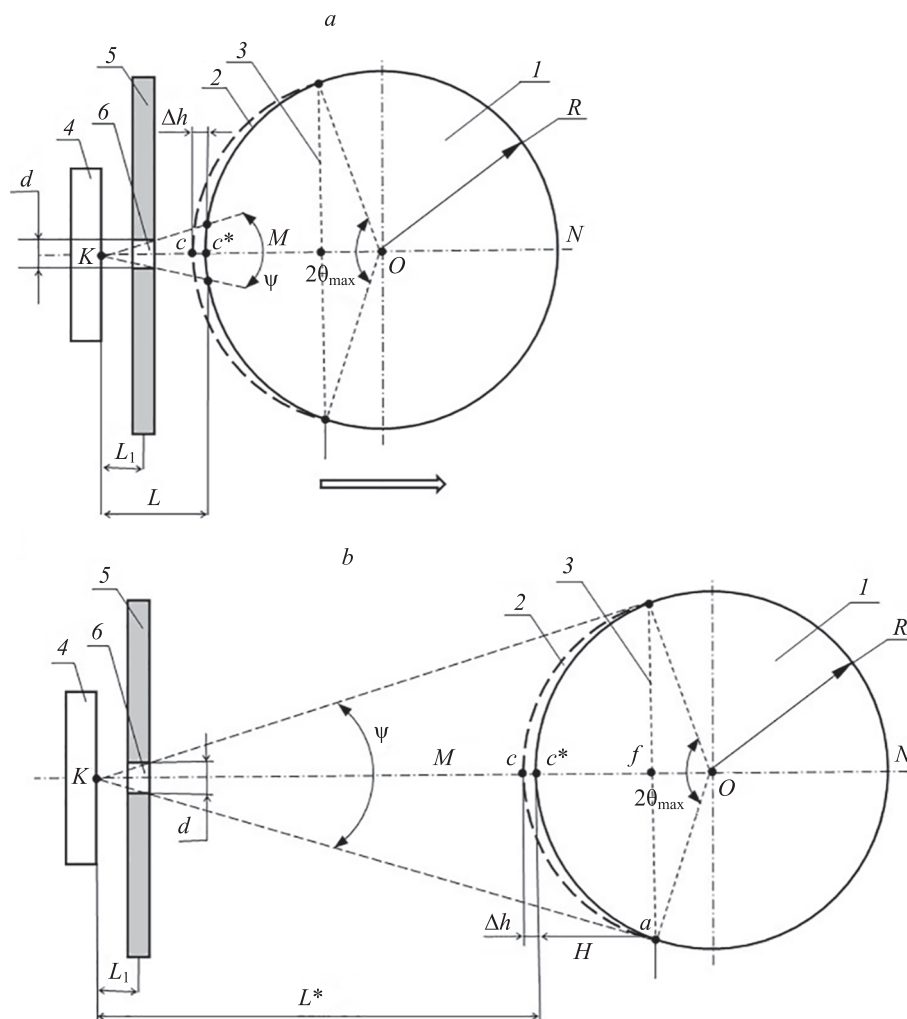


Рис. 3. Схема процесса напыления в начале (а) и конце (б) цикла напыления при подвижном экране.

1 — ротор; 2 — шаровой сегмент, соответствующий зоне экранирования; 3 — основание шарового сегмента 2; 4 — источник напыляемого материала с позицией K точечного испарения; 5 — экран; 6 — отверстие в экране диаметром d; L₁ — расстояние от источника 4 до экрана 5; L — минимальное и L* — максимальное расстояние от источника 4 до поверхности ротора 1; c* — вершина шарового сегмента 2; MN — динамическая ось ротора; ψ — угол, определяющий поток напыляемого материала; H — высота шарового сегмента 2; af и bf — радиусы основания 3 шарового сегмента 2

Fig. 3. Scheme of the deposition process at the beginning (a) and end (b) of the deposition cycle with a moving screen.

1 — rotor; 2 — spherical segment corresponding to the shielding zone; 3 — base of spherical segment 2; 4 — source of sprayed material with position K of point evaporation; 5 — screen; 6 — hole in the screen with a diameter d; L₁ is the distance from source 4 to screen 5; L is a minimum and L* is a maximum distance from source 4 to the surface of rotor 1; c* is the top of the spherical segment 2; MN is the dynamic axis of the rotor; ψ is the angle that determines the flow of the sprayed material; H is the height of the spherical segment 2; af and bf are the radii of the base 3 of the spherical segment 2

но рассмотреть подход, предполагающий поступательное перемещение ротора, движущегося от минимального расстояния L от источника до поверхности ротора до максимального расстояния L* (рис. 3).

Обозначив постоянное расстояние от источника до экрана L₁, а расстояние от экрана до ротора x, и рассматривая ротор, равномерно движущийся от экрана со скоростью u, в начальный момент времени расположенный вплотную к экрану, зависимость x(τ) представим в виде x(τ) = ut.

Для точек поверхности ротора, задаваемых углом ψ, которые в силу конечной ширины отверстия в экране «открыты» для напыления на протяжении всего времени движения ротора, получим выражение для определения толщины покрытия:

$$h(\theta) = \int_0^T \frac{A \cos \theta}{(L_1 + ut)^2} dt, \quad (8)$$

где T — полное время движения. Вычислив интеграл в (8), получим:

$$h(\theta) = \frac{A \cos \theta L_1}{L_1^2 u} \left(1 - \frac{1}{1 + uT/L_1} \right). \quad (9)$$

Так как задано, что при нулевом угле θ необходимо компенсировать толщину Δh, то должно выполняться соотношение:

$$\Delta h = h(\theta = 0) = \frac{A L_1}{L_1^2 u} \left(1 - \frac{1}{1 + uT/L_1} \right). \quad (10)$$

Подставим выражение (10) в (9), тогда итоговое выражение имеет вид:

$$h(\theta) = \Delta h \cos \theta. \quad (11)$$

Для точек поверхности ротора, которые «закрываются» для напыления в начальные моменты времени, выражение для толщины напыления будет иметь вид, аналогичный выражению (8).

Можно показать, что для углов θ , не удовлетворяющих этому условию, выражение для толщины напыления имеет вид:

$$h(\theta) = \int_{\frac{L_1}{u} \left(\frac{2R}{d} \sin \theta - 1 \right)}^T \frac{A \cos \theta}{(L_1 + ut)^2} dt. \quad (12)$$

Вычислив интеграл в (12), получим:

$$h(\theta) = \frac{A \cos \theta L_1}{L_1^2} \left(\frac{2R}{u d \sin \theta} - \frac{1}{1 + uT/L_1} \right).$$

Введем обозначение $uT = x_{\max} = L_1 \left(\frac{2R}{d} \sin \theta_{\max} - 1 \right)$, и используя соотношение (10), получим:

$$h(\theta) = \Delta h \cos \theta \frac{\frac{1}{\sin \theta} - \frac{1}{\sin \theta_{\max}}}{\frac{2R}{d} - \frac{1}{\sin \theta_{\max}}}. \quad (13)$$

Таким образом, для углов θ , определяющих точки, которые в силу конечной ширины отверстия в экране «открыты» для напыления на протяжении всего времени движения ротора, толщина напыления определяется выражением (8), а остальных углов — (13).

Сравним получающиеся в результате моделирования профили толщины с желаемыми, которые определены в (2).

На рис. 4 представлены желаемые и рассчитанные в результате моделирования в соответствии с выражениями (11) и (13) профили толщины напыляемого фрагмента при подвижном экране для различных значений θ_{\max} .

Видно, что в отличие от неподвижного экрана, где характерной особенностью было несоответствие про-

филя поверхности фрагмента и ротора по краям фрагмента и фактическое наличие ступеньки, при подвижном экране зона наибольшего несоответствия толщины располагается в средней части фрагмента. Также имеет место закономерность — меньшему углу соответствует меньшее отклонение профиля от желаемого.

Для корректной оптимизации сочетаний управляющих факторов, обеспечивающих формирование требуемого фрагмента покрытия и получения взаимосвязи значимых параметров процесса напыления, рассмотрим подобные (по признаку равных углов) прямоугольные треугольники в системах «источник 4 — экран 5» и «источник 4 — ротор 1».

Для системы «источник 4 — экран 5» из соотношения $\text{tg} \frac{\psi}{2} = \frac{d}{2L_1}$ следует

$$\frac{\psi}{2} = \text{arctg} \frac{d}{2L_1}$$

или

$$\psi = 2 \text{arctg} \frac{d}{2L_1}. \quad (14)$$

Для системы «источник 4 — ротор 1» запишем $\text{tg} \frac{\psi}{2} = \frac{af}{L^* + H}$ или $\psi = 2 \text{arctg} \frac{af}{L^* + H}$, а поскольку $af = R \cos(\theta_{\max}/2)$, то имеем

$$\psi = 2 \text{arctg} \frac{R \cos \frac{\theta_{\max}}{2}}{L^* + H}. \quad (15)$$

Приравняем выражения (14) и (15), получим

$$2 \text{arctg} \frac{d}{2L_1} = 2 \text{arctg} \frac{R \cos \frac{\theta_{\max}}{2}}{L^* + H},$$

или

$$\frac{d}{2L_1} = \frac{R \cos \frac{\theta_{\max}}{2}}{L^* + H}.$$

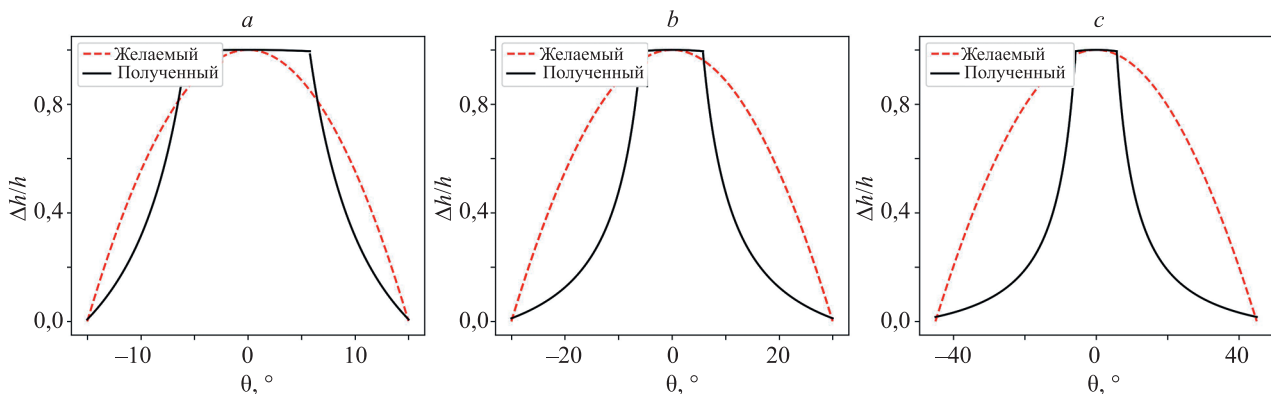


Рис. 4. Желаемые и рассчитанные профили толщины для схемы напыления при подвижном экране для значений $2\theta_{\max}$: 30° (a), 60° (b), 90° (c)

Fig. 4. Desired and actual profiles of thickness for deposition scheme with moving screen for $2\theta_{\max}$: 30° (a), 60° (b), 90° (c)

Время напыления τ и, соответственно, время перемещения ротора l определим, исходя из полученного эмпирическим путем значения скорости V_k осаждения покрытия с учетом геометрических параметров ротора l и шарового сегмента 2. Последовательным преобразованием выражений, определяющих связь времени напыления с толщиной покрытия и скоростью осаждения, это можно представить в виде соответствующей зависимости.

Достаточно очевидной является необходимость вращения ротора при напылении дополнительного слоя вокруг динамической оси, что позволяет компенсировать влияние возможной неоднородности потока в зоне напыления.

Таким образом, определив реальные для каждого ротора значения Δh и θ_{\max} с помощью профилограммы, возможно подобрать сочетание управляющих факторов, в частности соотношение параметров d , L^* и L_1 , обеспечивающих необходимые условия для корректировки формы ротора. Важным аспектом в данном случае является то, что время напыления τ соответствует времени перемещения экрана T . Это обеспечивает условие формирования требуемой толщины Δh дополнительного слоя покрытия на вершине сегмента и монотонное убывание толщины по мере приближения к основанию этого сегмента, где толщина дополнительного слоя равна нулю.

Апробация результатов моделирования

Апробация разработанной модели для объективной оценки ее адекватности выполнена следующим образом.

Нанесено корректирующее дополнительное покрытие при неподвижном экране, когда искажение формы после первого этапа напыления покрытия имело сравнительно небольшую величину — отклонение гармоники A_3 от предельно допустимого значения не превышало 0,01 мкм. Сформировано дополнительное покрытие с перемещением экрана в условиях, когда амплитуды гармоники A_3 превышали допустимые на 0,01–0,025 мкм.

При неподвижном экране нанесено покрытие при расстоянии $L = 12$ мм (рис. 2). В результате обеспече-

но соответствие амплитуд гармоник A_3 техническим требованиям.

Проведена корректировка формы ротора с подвижным экраном, если амплитуды гармоники A_3 находятся в интервале 0,003–0,005 мкм. После корректировки значения амплитуд получены в пределах 0,018–0,023 мкм. Расстояние L^* составило 60 мм, L_1 — 16 мм, а диаметр отверстия d в экране — 1 мм при радиусе R ротора 5 мм.

Геометрия роторов до и после процесса нанесения покрытия по результатам измерения остальных гармоник осталась в пределах допуска, значения амплитуд изменились на тысячные доли микрометра.

Положительные результаты практического использования подтвердили адекватность предложенных моделей.

Заключение

При исследовании влияния схемы фиксации ротора при напылении покрытия показано, что асимметричное расположение элементов фиксации приводит к искажению формы ротора, что вызывает изменение дисбаланса.

Предложена математическая модель корректировки формы ротора за счет дополнительного напыления выпукло-вогнутого сегмента в зоне экранирования. Обосновано, что изготовление ротора с требуемыми параметрами предполагает две последовательные и взаимосвязанные операции нанесения покрытия. Рассмотрены два альтернативных варианта формирования корректирующего покрытия, основанные на использовании размещаемого между ротором и источником напыляемого материала экрана с отверстием расчетного диаметра:

- с фиксированным расстоянием между ротором, экраном и источником;
- ротором, перемещающимся от минимального расстояния от экрана до поверхности ротора до заданного максимального расстояния.

Экспериментальная проверка подтвердила адекватность разработанных моделей. Предложенный подход позволяет расширить технологические возможности процесса изготовления сферических роторов.

Литература

1. Peshekhonov V.G. The outlook for gyroscopy // *Gyroscopy and Navigation*. 2020. V. 11. N 3. P. 193–197. <https://doi.org/10.1134/S2075108720030062>
2. Gusinsky V.Z., Litmanovich Y.A., Lesyuchevsky V.M. Spacecraft attitude determination using electrostatically suspended gyros // *IFAC Proceedings Volumes*. 2001. V. 34. N 15. P. 26–31. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)40700-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)40700-2)
3. Ландау Б.Е., Белаш А.А., Гуревич С.С., Левин С.Л., Романенко С.Г., Цветков В.Н. Электростатический гироскоп в системах ориентации космических аппаратов // *Гироскопия и навигация*. 2021. № 3. С. 69–79. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.0071>
4. Юльметова О.С. Ионно-плазменные и лазерные технологии в гироскопическом приборостроении: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. 244 с.

References

1. Peshekhonov V.G. The outlook for gyroscopy. *Gyroscopy and Navigation*, 2020, vol. 11, no. 3, pp. 193–197. <https://doi.org/10.1134/S2075108720030062>
2. Gusinsky V.Z., Litmanovich Y.A., Lesyuchevsky V.M. Spacecraft attitude determination using electrostatically suspended gyros. *IFAC Proceedings Volumes*, 2001, vol. 34, no. 15, pp. 26–31. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)40700-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)40700-2)
3. Landau B.E., Belash A.A., Gurevich S.S., Levin S.L., Romanenko S.G., Tsvetkov V.N. Electrostatic gyroscope in spacecraft attitude reference systems. *Gyroscopy and Navigation*, 2021, vol. 12, no. 3, pp. 247–253. <https://doi.org/10.1134/s2075108721030056>
4. Iulmetova O.S. *Ion-plasma and laser technologies in gyroscopic instrumentation*. Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. St. Petersburg, Concern CSRI Elektropribor, 2018, 244 p. (in Russian)

5. Grigoriev S., Vereschaka A., Zelenkov V., Sitnikov N., Bublikov J., Milovich F., Andreev N., Sotova C. Investigation of the influence of the features of the deposition process on the structural features of microparticles in PVD coatings // *Vacuum*. 2022. V. 202. P. 111144. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111144>
6. Maksakova O., Simoëš S., Pogrebnyak A., Bondar O., Kravchenko Y., Beresnev V., Erdybaeva N. The influence of deposition conditions and bilayer thickness on physical-mechanical properties of CA-PVD multilayer ZrN/CrN coatings // *Materials Characterization*. 2018. V. 140. P. 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.03.048>
7. Фомичев А.М., Щербак А.Г., Юльметова О.С., Беляев С.Н. Устройство для напыления тонкопленочных покрытий на сферические роторы электростатического гироскопа. Патент RU2555699C1. Бюл. 2015. № 19.
8. Ou Y.X., Wang H.Q., Ouyang X., Zhao Y.Y., Zhou Q., Luo C.W., Hua Q.S., Ouyang X.P., Zhang S. Recent advances and strategies for high-performance coatings // *Progress in Materials Science*. 2023. V. 136. P. 101125. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101125>
9. Махаев Е.А., Рябова Л.П., Чесноков П.А., Щербак А.Г., Кузнецов С.А., Мартюшов Г.Г. Разработка конструкции и технологии изготовления ротора криогироскопа // *Материалы XXX конференции памяти Н.Н. Острякова*. Санкт-Петербург, 2016. С. 116–123.
10. Dubrovskiy A.R., Okunev M., Makarova O., Kuznetsov S. Corrosion resistance of the substrates for the cryogenic gyroscope and electrodeposition of the superconductive niobium coatings // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. V. 857. N 1. P. 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/857/1/012008>
11. Tit M.A., Yulmetova O.S., Sisyukov A.N. Analysis of niobium thin film modification based on thermodynamic approach // *Proc. of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2020. P. 1049–1052. <https://doi.org/10.1109/eiconrus49466.2020.9038932>
12. Тит М.А., Беляев С.Н. Влияние стехиометрического состава на функциональные характеристики тонкопленочных поверхностных структур на узлах гироскопических приборов // *Вопросы материаловедения*. 2019. № 4(100). С. 78–90. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2019-100-4-78-90>
13. Tit M.A., Yulmetova O.S., Andreeva V.D., Sisyukov A.N., Yulmetova R.F. Application of niobium nitride thin films for improvement of performance characteristics of cryogenic gyroscope // *Proc. of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2021. P. 1232–1235. <https://doi.org/10.1109/EIConRus51938.2021.9396714>
14. Scherbak A.G., Yulmetova O.S., Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optoelectronic read-out system // *Optics & Laser Technology*. 2018. V. 101. P. 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.11.030>
15. Yulmetova O.S., Scherbak A.G. Composition analysis of thin films formed on beryllium surfaces under pulsed laser action by the method of chemical thermodynamics // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 97. N 9-12. P. 3231–3236. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2216-2>
16. Yulmetova O.S., Tumanova M.A. Laser marking of contrast images for optical read-out systems // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. V. 917. N 5. P. 052007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/917/5/052007>
17. Yulmetova O.S., Tit M.A., Sisyukov A.N., Yulmetova R.F. Comparative analysis of electrochemical and laser marking for gyroscopic application // *Proc. of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2020. P. 1053–1055. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039076>
18. Chen L., Zhao Y., Song B., Yu T., Liu Z. Modeling and simulation of 3D geometry prediction and dynamic solidification behavior of Fe-based coatings by laser cladding // *Optics & Laser Technology*. 2021. V. 139. P. 107009. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107009>
19. Katranidis V., Gu S., Allcock B., Kamnis S. Experimental study of high velocity oxy-fuel sprayed WC-17Co coatings applied on complex geometries. Part A: Influence of kinematic spray parameters on thickness, porosity, residual stresses and microhardness // *Surface and Coatings Technology*. 2017. V. 311. P. 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.015>
20. Sahoo D.K., Neupane N., Chaudhary S. Predicting the coating geometries of friction surfaced aluminium cladding over carbon steel by artificial neural network modeling. *Materials Today: Proceedings*, 2023, in press. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.056>
5. Grigoriev S., Vereschaka A., Zelenkov V., Sitnikov N., Bublikov J., Milovich F., Andreev N., Sotova C. Investigation of the influence of the features of the deposition process on the structural features of microparticles in PVD coatings. *Vacuum*, 2022, vol. 202, pp. 111144. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111144>
6. Maksakova O., Simoëš S., Pogrebnyak A., Bondar O., Kravchenko Y., Beresnev V., Erdybaeva N. The influence of deposition conditions and bilayer thickness on physical-mechanical properties of CA-PVD multilayer ZrN/CrN coatings. *Materials Characterization*, 2018, vol. 140, pp. 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.03.048>
7. Fomichev A.M., Shcherbak A.G., Jul'metova O.S., Beljaev S.N. Device for sputtering of thin film coatings on spherical rotor of electrostatic gyroscope. *Patent RU2555699C1*, 2015. (in Russian)
8. Ou Y.X., Wang H.Q., Ouyang X., Zhao Y.Y., Zhou Q., Luo C.W., Hua Q.S., Ouyang X.P., Zhang S. Recent advances and strategies for high-performance coatings. *Progress in Materials Science*, 2023, vol. 136, pp. 101125. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101125>
9. Makhaev E.A., Ryabova L.P., Chesnokov P.A., Shcherbak A.G., Kuznetsov S.A., Martiushov G.G. Development of a construction and manufacturing technology for the cryogyroscope rotor. *Proc. of the 30th Conference of Memory N.N. Ostryakov*. St. Petersburg, 2016, pp. 116–123. (in Russian)
10. Dubrovskiy A.R., Okunev M., Makarova O., Kuznetsov S. Corrosion resistance of the substrates for the cryogenic gyroscope and electrodeposition of the superconductive niobium coatings. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 857, no. 1, pp. 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/857/1/012008>
11. Tit M.A., Yulmetova O.S., Sisyukov A.N. Analysis of niobium thin film modification based on thermodynamic approach. *Proc. of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2020, pp. 1049–1052. <https://doi.org/10.1109/eiconrus49466.2020.9038932>
12. Tit M.A., Belyaev S.N. Effect of Stoichiometric Composition on the Functional Characteristics of Thin-Film Surface Structures on Gyroscope Components. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2020, vol. 11, no. 6, pp. 1370–1377. <https://doi.org/10.1134/s2075113320060283>
13. Tit M.A., Yulmetova O.S., Andreeva V.D., Sisyukov A.N., Yulmetova R.F. Application of niobium nitride thin films for improvement of performance characteristics of cryogenic gyroscope. *Proc. of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2021, pp. 1232–1235. <https://doi.org/10.1109/EIConRus51938.2021.9396714>
14. Scherbak A.G., Yulmetova O.S., Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optoelectronic read-out system. *Optics & Laser Technology*, 2018, vol. 101, pp. 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.11.030>
15. Yulmetova O.S., Scherbak A.G. Composition analysis of thin films formed on beryllium surfaces under pulsed laser action by the method of chemical thermodynamics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, no. 9-12, pp. 3231–3236. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2216-2>
16. Yulmetova O.S., Tumanova M.A. Laser marking of contrast images for optical read-out systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 917, no. 5, pp. 052007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/917/5/052007>
17. Yulmetova O.S., Tit M.A., Sisyukov A.N., Yulmetova R.F. Comparative analysis of electrochemical and laser marking for gyroscopic application. *Proc. of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2020, pp. 1053–1055. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039076>
18. Chen L., Zhao Y., Song B., Yu T., Liu Z. Modeling and simulation of 3D geometry prediction and dynamic solidification behavior of Fe-based coatings by laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 2021, vol. 139, pp. 107009. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107009>
19. Katranidis V., Gu S., Allcock B., Kamnis S. Experimental study of high velocity oxy-fuel sprayed WC-17Co coatings applied on complex geometries. Part A: Influence of kinematic spray parameters on thickness, porosity, residual stresses and microhardness. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 311, pp. 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.015>
20. Sahoo D.K., Neupane N., Chaudhary S. Predicting the coating geometries of friction surfaced aluminium cladding over carbon steel by artificial neural network modeling. *Materials Today: Proceedings*, 2023, in press. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.056>

- by artificial neural network modeling // *Materials Today: Proceedings*. 2023. in press. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.056>
21. Paturi U.M.R., Cheruku S., Geereddy S.R. Process modeling and parameter optimization of surface coatings using artificial neural networks (ANNs): State-of-the-art review // *Materials Today: Proceedings*. 2021. V. 38. Part 5. P. 2764–2774. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.695>
 22. Тит М.А., Ландау Б.Е., Филиппов А.Ю., Щербак А.Г. Способ изготовления ротора шарового гироскопа. Патент RU2743492C1. Бюл. 2020. № 5.
 21. Paturi U.M.R., Cheruku S., Geereddy S.R. Process modeling and parameter optimization of surface coatings using artificial neural networks (ANNs): State-of-the-art review. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, part 5, pp. 2764–2774. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.695>
 22. Tit M.A., Landau B.E., Filippov A.Y., Shcherbak A.G. Ball gyroscope rotor manufacturing method. *Patent RU2743492C1*, 2020. (in Russian)

Авторы

Тит Маргарита Алексеевна — научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc 57216270946](https://orcid.org/0009-0003-0069-2940), <https://orcid.org/0009-0003-0069-2940>, rita93.07.93.07@gmail.com

Беляев Сергей Николаевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc 57216270946](https://orcid.org/0000-0003-3765-9469), <https://orcid.org/0000-0003-3765-9469>, serenible@mail.ru

Щербак Александр Григорьевич — доктор технических наук, начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc 57197817003](https://orcid.org/0000-0001-8507-7653), <https://orcid.org/0000-0001-8507-7653>, asherbak1946@gmail.com

Юльметова Ольга Сергеевна — доктор технических наук, начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; доцент практики, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 37068364500](https://orcid.org/0000-0001-9899-5939), <https://orcid.org/0000-0001-9899-5939>, olga@yulmetova.ru

Authors

Margarita A. Tit — Scientific Researcher, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc 57216270946](https://orcid.org/0009-0003-0069-2940), <https://orcid.org/0009-0003-0069-2940>, rita93.07.93.07@gmail.com

Sergey N. Belyaev — PhD, Senior Researcher, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc 57216270946](https://orcid.org/0000-0003-3765-9469), <https://orcid.org/0000-0003-3765-9469>, serenible@mail.ru

Alexandr G. Shcherbak — D.Sc., Head of Sector, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc 57197817003](https://orcid.org/0000-0001-8507-7653), <https://orcid.org/0000-0001-8507-7653>, asherbak1946@gmail.com

Olga S. Yulmetova — D.Sc., Head of Sector, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; Associate Professor of Practice, ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation, [sc 37068364500](https://orcid.org/0000-0001-9899-5939), <https://orcid.org/0000-0001-9899-5939>, olga@yulmetova.ru

Статья поступила в редакцию 24.04.2023
Одобрена после рецензирования 19.05.2023
Принята к печати 16.07.2023

Received 24.04.2023
Approved after reviewing 19.05.2023
Accepted 16.07.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»