
ПРИБОРЫ НАВИГАЦИИ

NAVIGATIONAL INSTRUMENTS

УДК 681.78
DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-1-56-66

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК КВАНТОВОГО ДАТЧИКА ВРАЩЕНИЯ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. С. Завитаев*, М. И. Евстифеев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

** zav.al98@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрено влияние смещений элементов оптической системы квантового датчика вращения на мощность излучения, сообщаемого ансамблю атомов рабочего вещества, расположенного в газовой ячейке. На основе полученных значений проанализированы изменения точностных характеристик квантового датчика вращения. Исследованы линейные и угловые смещения элементов оптической системы прибора. Выявлены параметры ячейки, позволяющие добиться нечувствительности точностных характеристик квантового датчика вращения к линейным смещениям элементов оптической системы на величину до 0,15 мм.

Ключевые слова: квантовый датчик вращения, ядерный магнитный резонанс, оптическая система, точностные параметры

Ссылка для цитирования: Завитаев А. С., Евстифеев М. И. Зависимость характеристик квантового датчика вращения от изменения параметров оптических элементов // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 1. С. 56–66. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-1-56-66.

DEPENDENCE OF A QUANTUM ROTATION SENSOR CHARACTERISTICS ON CHANGES IN PARAMETERS OF THE OPTICAL ELEMENTS

A. S. Zavitaev*, M. I. Evstifeev

ITMO University, St. Petersburg, Russia

** zav.al98@mail.ru*

Abstract. For a quantum sensor of rotation, the influence of displacements of the optical system elements on the radiation power imparted to the ensemble of atoms of the working substance located in the gas cell is considered. Based on obtained data, changes in the accuracy characteristics of the quantum rotation sensor are analyzed. Linear and angular displacements of the elements of the optical system of the device are investigated. Cell parameters are identified that allow achieving insensitivity of the accuracy characteristics of the quantum rotation sensor to linear displacements of the elements of the optical system by up to 0.15 mm.

Keywords: quantum rotation sensor, nuclear magnetic resonance, optical system, precision parameters

For citation: Zavitaev A. S., Evstifeev M. I. Dependence of a quantum rotation sensor characteristics on changes in parameters of the optical elements. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 1. P. 56–66 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-1-56-66

Введение. Потребность в использовании компактных навигационных систем на высокодинамичных объектах обуславливает актуальность создания гироскопа тактического класса точности, который бы превосходил по точности микромеханические гироскопы, а по виброустойчивости и массогабаритным характеристикам — волоконно-оптические гироскопы. Развитие

технологий использования ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в магнитометрии [1–3] привело к возобновлению активных разработок квантового датчика вращения (КДВ). Принцип действия КДВ заключается в определении частоты прецессии магнитного момента ансамбля атомов рабочего вещества вокруг вектора напряженности магнитного поля, изменяющейся под действием угловой скорости вращения объекта [4]. Под рабочим веществом подразумевается смесь газов, состоящая из паров щелочного металла (цезия или рубидия) [5, 6], двух изотопов ксенона (Xe_{129} и Xe_{131}) и азота, выступающего в качестве буферного газа [7].

В настоящее время исследованиями по созданию миниатюрных КДВ занимаются как зарубежные, так и отечественные компании. В качестве примера можно назвать разработки компании Northrop Grumman [8], Калифорнийского университета (рис. 1, а) [9] и ЦНИИ „Электроприбор“ (рис. 1, б) [10]. Эти приборы построены на общих принципах и содержат схожие конструктивные элементы (оптические, магнитные и пр.). Различия заключаются в технологических особенностях реализации технических решений. Судя по известным публикациям, как зарубежные, так и отечественные исследования находятся на этапе создания лабораторных образцов [8–10].



Рис. 1

При разработке КДВ тактического класса точности необходимо обеспечить ряд условий для функционирования оптической ячейки [11, 12], в которой находится ансамбль атомов, и для корректного измерения частоты прецессии. Эти условия удовлетворяются использованием нескольких систем, среди которых основными являются:

- магнитная система, включающая систему катушек и магнитных экранов для создания стабильного магнитного поля заданного направления и величины;
- оптическая система, включающая оптическую ячейку, лазеры детектирования и накачки, фотодетекторы и оптические элементы для обеспечения ЯМР и измерения выходных параметров (в том числе частоты прецессии);
- система термостатирования, включающая термодатчики и нагреватели для обеспечения стабильного значения температуры как для датчика в целом, так и для ансамбля атомов, в частности.

Одной из ключевых особенностей КДВ является нечувствительность магнитного момента облака атомов к инерционным воздействиям [12]. Однако в остальных системах датчика могут возникать смещения элементов как в результате таких воздействий, так и вследствие тепловых деформаций, что приводит к изменению характеристик КДВ и ухудшению его эксплуатационных свойств.

В настоящей работе оценивается влияние параметров элементов оптической системы на характеристики КДВ. Для решения этой задачи определяются изменения мощности излучения, сообщаемого ансамблю атомов, на основании чего оценивается такая характеристика датчика, как случайное блуждание по углу (angle random walk, ARW). Характеристика ARW является стандартной при оценке параметров датчика с использованием вариаций Аллана, и ее выбор обусловлен тем, что ARW позволяет определить как изменение чувствительности, так и параметры дрейфа датчика [13].

Изменение размеров ячейки оптической системы. В оптическую систему входят оптическая ячейка, лазеры детектирования и накачки, оптические делительные призмы и зеркало (рис. 2).

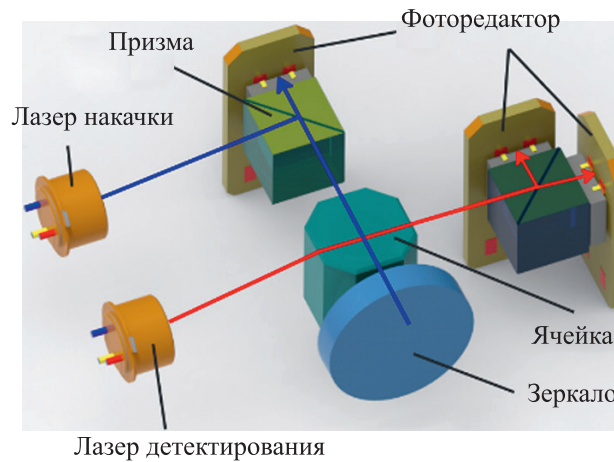


Рис. 2

Для поддержания стабильного значения ARW необходимо обеспечивать неизменность мощности излучения, сообщаемого атомам [11]. При изменении геометрических параметров оптической системы накачки мощность снижается вследствие смещения оптических элементов [14, 15] и, таким образом, ARW возрастает.

Варианты реализации оптических ячеек с различными топологическими показателями зависят от технологических возможностей изготовления. Для выбора наиболее эффективной топологии конструкции ячейки в настоящей работе рассмотрены такие показатели, как форма, толщина стенок, линейные размеры. В качестве вариантов формы рассмотрены кубические, использующиеся в настоящий момент в различных прототипах КДВ [8, 15], и сферические (как наиболее технологичная замена кубическим) ячейки. Средняя толщина стенок ячеек — 0,6 мм. При этом наименьшая толщина стенок, достигаемая при изготовлении сферической ячейки с применением MEMS-технологий, составляет 0,2 мм [9]. Исходя из этого при моделировании обоих вариантов формы ячеек толщина стенок варьировалась от 0,2 до 1 мм.

Приведем некоторые соотношения для оценки ARW датчика [9, 16]:

$$ARW = \frac{3600}{T_2 SNR \sqrt{\delta f}} [^\circ/\sqrt{ч}], \quad (1)$$

где T_2 — время поперечной релаксации атомов ксенона (Xe); SNR — отношение сигнал/шум электронного парамагнитного резонанса, зависящее, в том числе, и от мощности излучения, сообщаемого ансамблю атомов; δf — полоса пропускания фазового шума (в Гц). При этом общее время релаксации можно определить с использованием следующего соотношения:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2, \text{coll}}} + \frac{1}{T_2'} + \frac{1}{T_{2, \Delta B}} + \frac{1}{T_{2, \text{wall}}}, \quad (2)$$

где $T_{2, \text{coll}}$ — время релаксации из-за столкновений с атомами щелочных металлов; T_2' — время релаксации, обусловленное столкновениями атомов Xe между собой; $T_{2, \Delta B}$ — время релаксации из-за неоднородности магнитного поля внутри ячейки; $T_{2, \text{wall}}$ — время релаксации, обусловленное столкновениями атомов со стенками ячейки. Сумма первых двух членов много меньше суммы вторых. Наибольший вклад в общее время релаксации вносят релаксация из-за столкновений с атомами щелочных металлов, параметры которой зависят от давлений газов в ячейки, релаксация на стенках ячейки и релаксация, вызванная неоднородностью магнитного поля, которые можно выразить следующими зависимостями:

$$\frac{1}{T_{2,\text{wall}}} = k_{\text{sh}} \frac{D}{L^2}, \quad (3)$$

где k_{sh} — коэффициент, зависящий от формы ячейки (для сферической ячейки $k_{\text{sh}} \sim 1$), D — коэффициент диффузии, L — линейный размер ячейки;

$$\frac{1}{T_{2,\Delta B}} = \frac{L^4 \gamma^2}{350D} \left(\frac{\Delta B}{\Delta z} \right)^2, \quad (4)$$

где γ — гиромагнитное отношение атомов ксенона, $\frac{\Delta B}{\Delta z}$ — градиент магнитного поля.

Из зависимостей (1)–(4) можно видеть, что линейный размер ячейки определяет возбуждение и детектирование ЯМР-ансамбля атомов и оказывает влияние на ARW датчика [11, 17] (рис. 3). Габаритный размер ячейки (ширина) представляет собой сумму линейного размера и удвоенной толщины стенок.

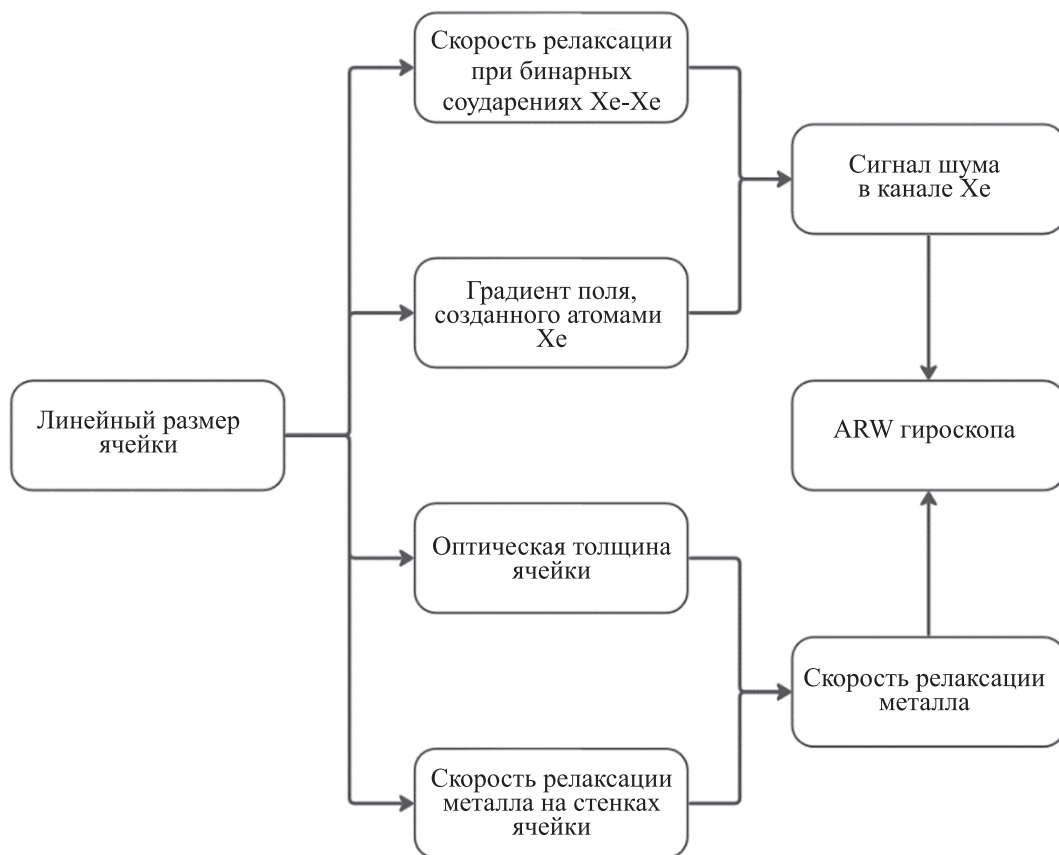


Рис. 3

При исследовании топологии ячейки необходимо определить диапазон ее линейных размеров, при которых датчик будет удовлетворять требуемому значению $\text{ARW} = 10^{-2} \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ [18–20]. На основании приведенных соотношений (1)–(4) авторами построена зависимость ARW от линейного размера ячейки L (рис. 4).

В работе рассматривается вариант КДВ, в котором применяются два изотопа Хе: 129 и 131. Подобная конфигурация характеризуется повышенной устойчивостью к флуктуациям магнитного поля [10].

Исходя из зависимости, представленной на рис. 4, можно сделать вывод, что для достижения требуемых значений ARW (горизонтальный пунктир на графике) линейный размер ячейки должен находиться в пределах от 2 до 15 мм, при этом наилучшее (минимальное) значение

ARW достигается при $L = 6$ мм. Для обеспечения миниатюризации конструкции наибольший рассматриваемый линейный размер ячейки при моделировании принят 10 мм.

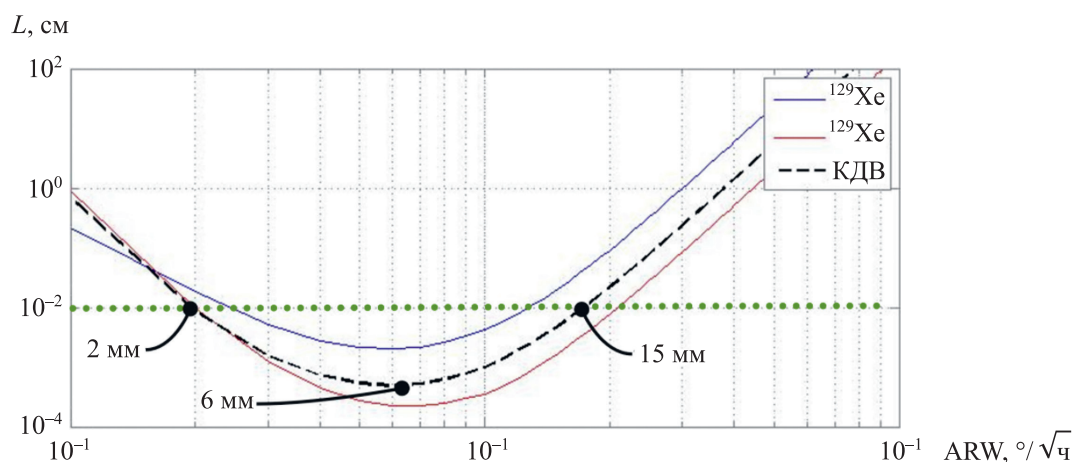


Рис. 4

Моделирование смещений элементов. Оптическое моделирование проводилось с использованием метода трассировки лучей Монте-Карло [21]: световой пучок разбивается на большое количество отдельных лучей, затем рассчитывается взаимодействие этих лучей с различными частями элементов оптической системы, полученные для каждого луча результаты объединяются с помощью интегрирования Монте-Карло для предсказания поведения всего пучка.

Моделирование проводилось в программном пакете COMSOL Multiphysics с использованием модуля геометрической оптики. На основании расчетов оценена эффективность использования той или иной ячейки, а также определено влияние смещений элементов оптической системы на ARW датчика. Основным критерием, оказывающим наибольшее влияние на процесс ЯМР, является мощность излучения накачки, сообщаемого ансамблю атомов. На основании зависимостей (1)–(4) получена зависимость ARW от мощности излучения накачки (рис. 5, горизонтальная и вертикальная пунктирные линии указывают требуемые значения параметров).

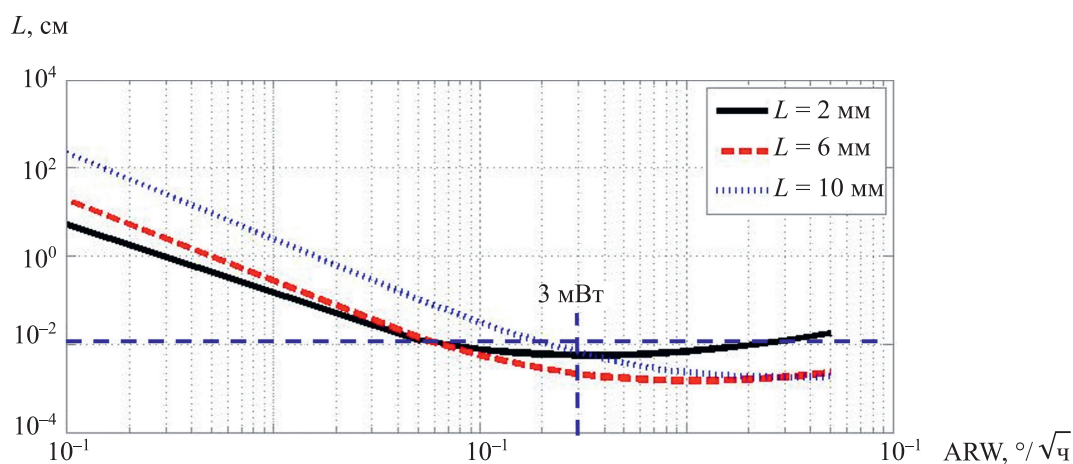


Рис. 5

Мощность излучения лазера принималась равной 3 мВт. Из графика можно сделать вывод, что наименее чувствительна к изменениям мощности излучения ячейка размером 2 мм, а ячейка размером 10 мм обеспечивает наименьшую шумовую составляющую.

При моделировании задавались линейные и угловые смещения призмы, зеркала и ячейки относительно их номинального положения. Линейные смещения варьировались от 0 до 0,5 мм, угловые — от 0 до 1°. В реальном приборе такие смещения могут возникать как в результате воздействия различных механических воздействий, так и в процессе установки и сборки компо-

нентов датчика. Расчеты проводились для всех комбинаций линейных размеров и толщин стенок ячейки (на рис. 6–9 сплошная кривая относится к сферической ячейке, пунктир — к призме, штрихпунктир — к зеркалу; кривые синего цвета соответствуют толщине стенок ячейки 0,2, зеленого — 0,6, красного — 1 мм).

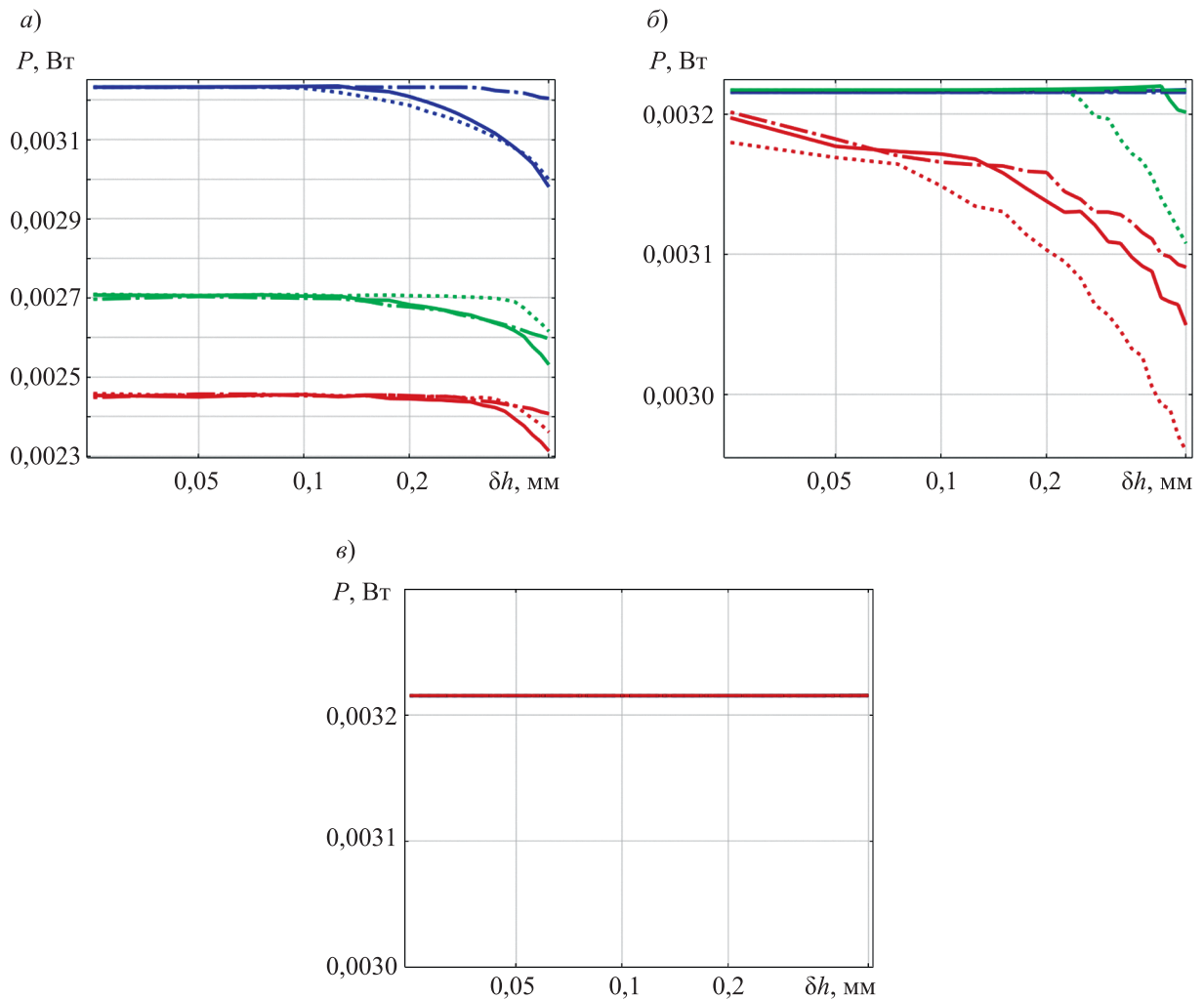


Рис. 6

По результатам моделирования смещений элементов оптической системы со сферической ячейкой получены следующие результаты.

В случае применения сферической ячейки диаметром 2 мм (рис. 6, а) наблюдается нечувствительность к линейным смещениям элементов оптической системы вплоть до $\delta h = 15$ мм, однако при этом возникает значительная зависимость от толщины стенок. Применение стенок толщиной 1 мм приводит к меньшей на 75 % мощности излучения, по сравнению со стенкой толщиной 0,2 мм.

В случае использования ячейки диаметром 6 мм (рис. 6, б) наибольшая зона нечувствительности к линейным смещениям (более 0,5 мм) наблюдается у варианта с толщиной стенок 0,2 мм. В случае использования стенок толщиной 0,6 мм мощность излучения начинает изменяться при линейных смещениях призмы, превышающих 0,23 мм. Применение стенок толщиной в 1 мм приводит к изменению мощности излучения при наличии любых значениях δh элементов оптической системы.

Применение ячейки диаметром 10 мм (рис. 6, в) позволяет добиться полной нечувствительности к линейным смещениям всех элементов до 0,5 мм для стенок толщиной от 0,2 до 1 мм.

На рис. 7 показана зависимость мощности излучения от угловых смещений $\delta\alpha$ элементов. Следует отметить, что при использовании ячеек диаметром 6 (рис. 7, б) и 2 мм (а) изменение

мощности происходит из-за угловых смещений призмы, тогда как угловые смещения ячейки и зеркала не оказывают влияния. Другими словами, оптическая система нечувствительна к угловым смещениям всех элементов, кроме призмы, при использовании любых видов сферической ячейки. В случае применения варианта с диаметром 10 мм (рис. 7, в) наблюдается полная нечувствительность к угловым смещениям всех элементов до 1° для любой толщины стенок (от 0,2 до 1 мм).

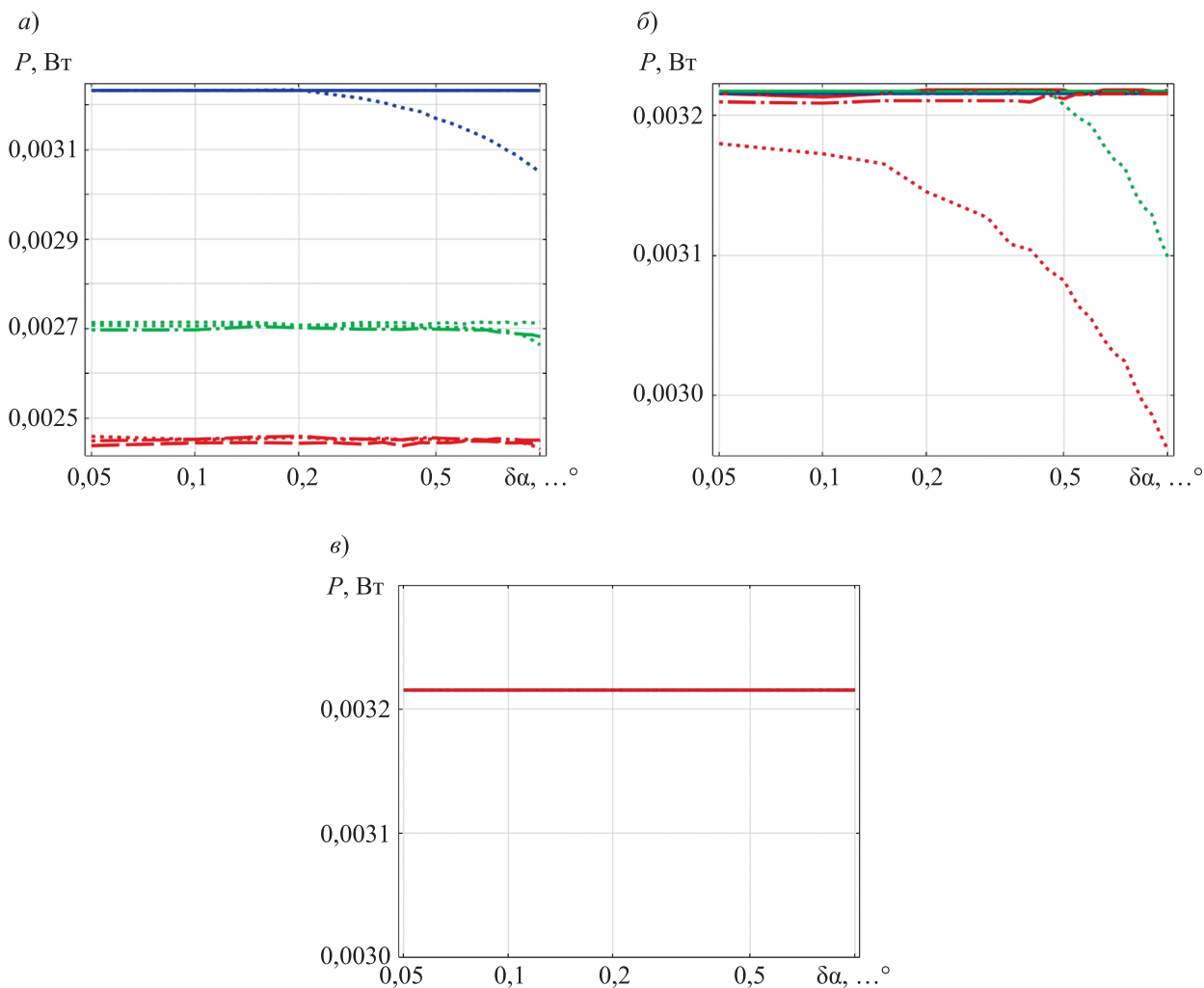


Рис. 7

На рис. 8 показаны результаты моделирования смещений в оптической системе в случае применения кубической ячейки. При применении варианта 2 мм (рис. 8, а) не наблюдается такой зависимости от толщины стенок, как в случае со сферической (рис. 6, а). В то же время зона нечувствительности к линейным смещениям у кубической ячейки 2 мм составляет порядка 0,05 мм, что в три раза меньше $\delta a = 0,15^\circ$. На графиках не прослеживается чувствительность к линейным смещениям зеркала.

В случае с ячейкой 6 мм (рис. 8, б) не наблюдается увеличения зоны нечувствительности при применении тонкостенных ячеек, как в случае со сферической (рис. 6, б), при этом зона нечувствительности составляет 0,11 мм.

В случае ячейки 10 мм (рис. 8, в) зона нечувствительности к линейным смещениям снижается до 0,17 мм. Таким образом, кубические ячейки 10 мм теряют одно из главных преимуществ сферических: полную нечувствительность к линейным смещениям элементов оптической системы.

Нечувствительность к угловым смещениям наблюдается для всех элементов оптической системы, кроме призмы (рис. 9; кубическая ячейка размером: а — 2, б — 6, в — 10 мм). Зона нечувствительности не зависит от толщины стенок и размеров ячейки.

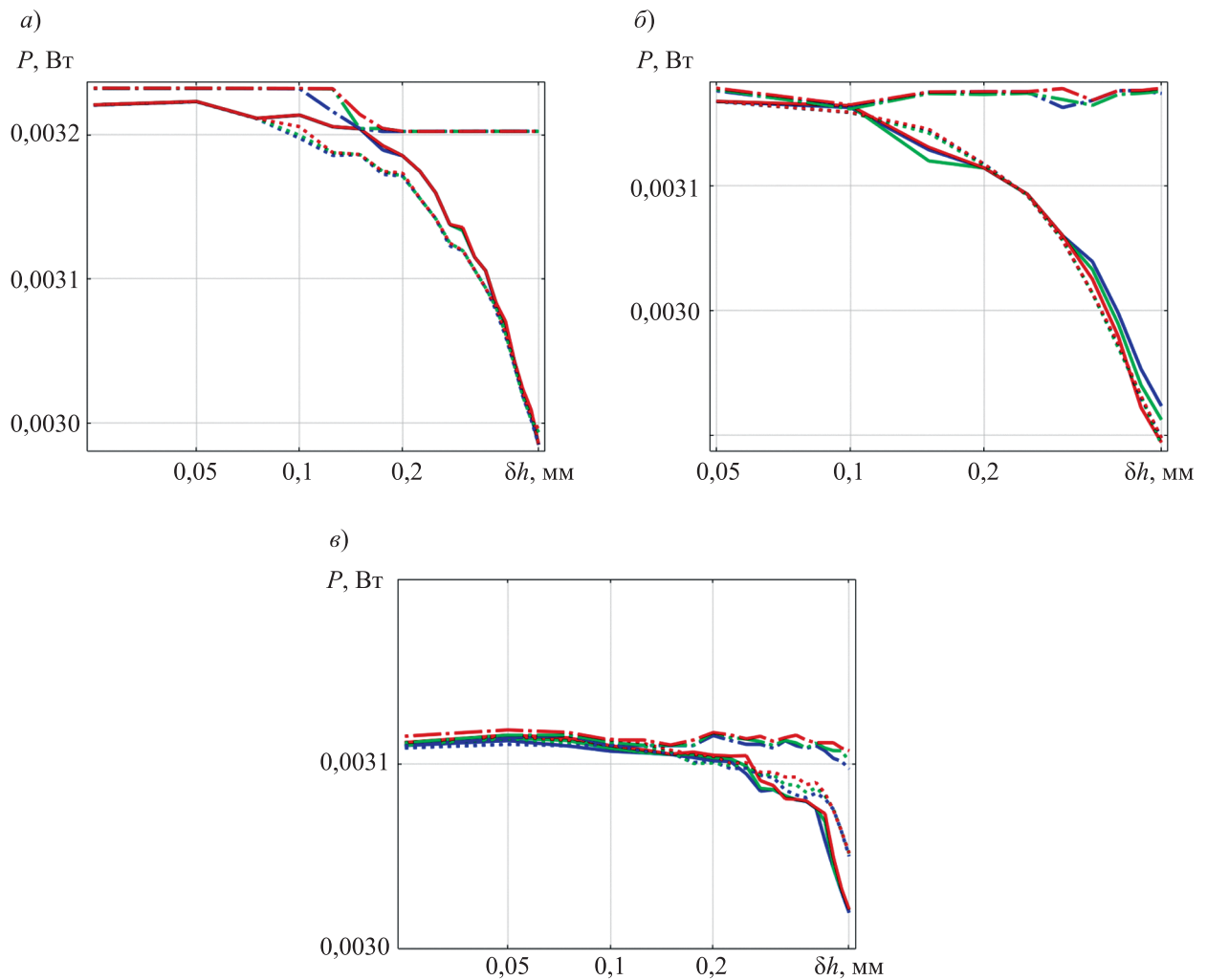


Рис. 8

После получения данных об изменении мощности излучения необходимо оценить влияние этих изменений на характеристики датчика. Зависимость оцениваемой в статье характеристики (ARW) от мощности излучения, согласно формулам работы [11], представлена на рис. 10.

На основе зависимости, изображенной на рис. 10, рассчитано наибольшее изменение ARW при смещении элементов оптической системы. Рассматривались случаи с применением оптических ячеек различной формы с разной толщиной стенок. Рассматриваемое значение линейного смещения составило 0,15 мм, результаты расчета приведены в таблице.

Тип ячейки	Линейный размер, мм	Толщина стенок, мм	Мощность излучения, мВт	Изменение ARW, %
Сферическая	2	0,2	3,21	1
		0,6	2,68	18
		1	2,45	22
	6	0,2; 0,6	3,25	0
		1	3,12	7
	10	0,2; 0,6; 1	3,25	0
Кубическая	2	0,2; 0,6; 1	3,17	6
	6	0,2; 0,6; 1	3,13	7
	10	0,2; 0,6; 1	3,11	8

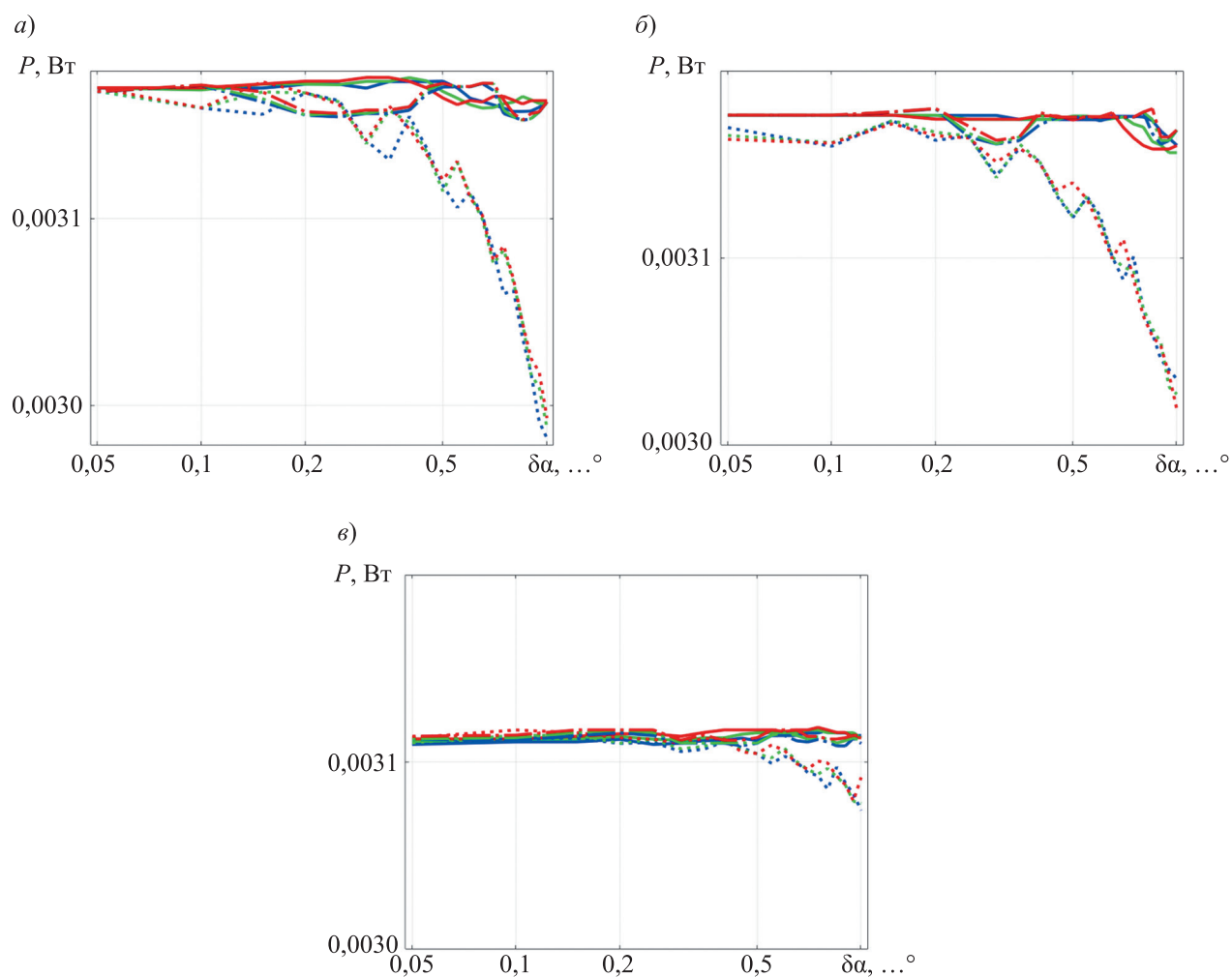


Рис. 9

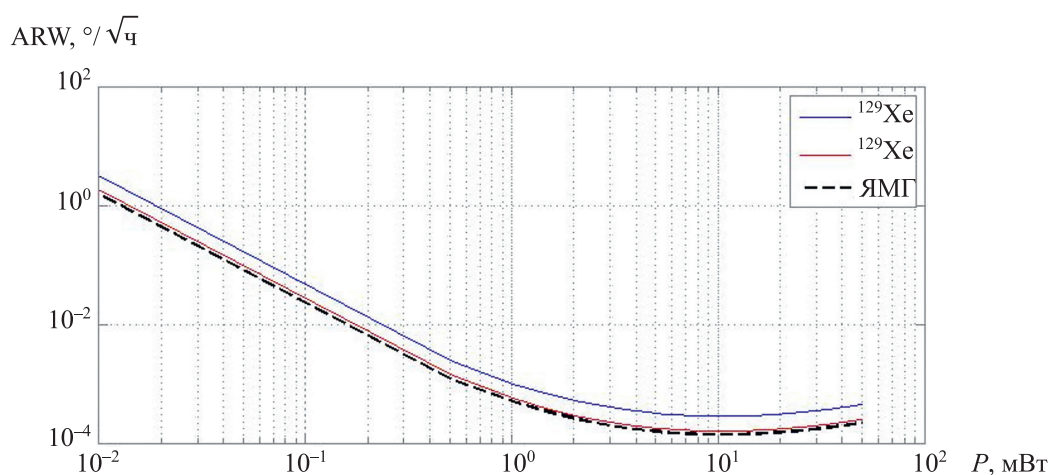


Рис. 10

На основании данных таблицы можно сделать вывод, что применение сферических ячеек позволяет обеспечить наименьшую чувствительность к линейным смещениям элементов оптической системы. Применение кубических ячеек любых габаритов со стенками любой толщины приводит к ухудшению характеристики ARW при наличии смещений в оптической системе. Применение сферической ячейки с внутренним диаметром 2 мм и толщиной стенок 0,2 мм, с диаметром 6 мм и толщиной 0,2–0,6 мм, а также с диаметром 10 мм и толщиной до 1 мм по-

звolyет обеспечить нечувствительность к смещениям элементов оптической системы вплоть до 0,15 мм.

В случае угловых смещений наиболее критичными являются смещения призмы. Смещения других элементов оптической системы не влияют на выходные параметры датчика вне зависимости от формы ячейки. Для обеспечения нечувствительности к угловым смещениям до 0,2° необходимо использовать ячейки с толщиной стенки до 0,6 мм.

Заключение. В работе оценена характеристика „случайное блуждание по углу“ квантового датчика вращения при изменении параметров оптических элементов. На основе полученных значений проанализированы изменения этой характеристики датчика. Определено, что оптическая система нечувствительна к линейным смещениям элементов величиной до 0,15 мм в случае применения сферических ячеек диаметром от 2 до 10 мм и толщиной стенок от 0,2 до 0,6 мм и нечувствительна к угловым смещениям до 0,2° при использовании ячеек любой из этих форм при толщине стенки до 0,6 мм.

В настоящее время разрабатывается и изготавливается макет отечественного квантового датчика вращения, что позволит экспериментально проверить приведенные теоретические оценки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литманович Ю. А., Вершовский А. К., Пешехонов В. Г. Гироскоп на основе явления ядерного магнитного резонанса: прошлое, настоящее, будущее // Матер. пленарного заседания 7-й Российской мультиконф. по проблемам управления. СПб: Электроприбор, 2014. С. 35–42.
2. Уокер Т. Дж., Ларсен М. С. ЯМР-гироскопы со спин-обменной накачкой // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26, № 1. С. 28–54.
3. Ranjbaran M., Tehrani M. M., Hamidi S. M., Khalkhali S. M. H. Relaxation time dependencies of optically detected magnetic resonance harmonics in highly sensitive Mx magnetometers // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2019. Vol. 469. P. 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.031>.
4. Larsen M., Bulatowicz M. Nuclear magnetic resonance gyroscope: for DARPA's micro-technology for positioning, navigation and timing program // Proc. IEEE Intern. Frequency Control Symposium. 2012. DOI: 10.1109/fcs.2012.6243606.
5. Franz F. and Volk C. Spin relaxation of rubidium atoms in sudden and quasimolecular collisions with light-noble-gas atoms // Physical Review A. 1976. Vol. 5, N 14. P. 1711.
6. Eklund E. J. Microgyroscope based on spin-polarized nuclei: PhD thesis. University of California, Irvine, 2008.
7. Walker T. G. and Larsen M. S. Chapter eight-spin-exchange-pumped NMR gyros // Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics. 2016. Vol. 65. P. 373–401.
8. Pat. US 3 778 700. Optically pumped nuclear magnetic resonance gyroscope / D. Bayley, I. Greenwood, and J. Simpson. 11 Dec. 1973.
9. Noor R. M. and Shkel A. M. MEMS Components for NMR Atomic Sensors // Journal of Microelectromechanical Systems. 2018. Vol. 27, N 6. P. 1148–1159. DOI: 10.1109/JMEMS.2018.2874451.
10. Безмен Г. В., Шевченко А. Н., Костин П. Н., Берзейтис А. Н., Безмен В. С., Петров В. И. Система двухчастотной генерации в схеме датчика угловой скорости // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 1. С. 19–30. DOI 10.17285/0869-7035.0020.
11. Вершовский А. К., Литманович Ю. А., Пазгалева А. С., Пешехонов В. Г. Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26, № 1. С. 55–80. DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.1.055-080.
12. Sakamoto Y., Bidinosti C. P., Ichikawa Y. et al. Development of high-homogeneity magnetic field coil for ^{129}Xe EDM experiment // Hyperfine Interact. 2015. Vol. 230. P. 141–146. <https://doi.org/10.1007/s10751-014-1109-5>.
13. Сирая Т. Н. Вариация Аллана как оценка погрешности измерения // Гироскопия и навигация. 2010. № 2. С. 29–36.
14. Шевченко А. Н., Захарова Е. А. Исследование зависимости качества резонанса от распределения цезия в ячейке квантового датчика вращения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 4. С. 567–573. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-567-573.
15. Evstifeev M. I., Zavitaev A. S. Estimation of the nuclear magnetic gyroscope sensitivity to inertial influences // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2022, Vol. 1215, N 012014. P. 1–8.
16. Zavitaev A., Evstifeev M. Investigation of Instrumental Errors of the Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope // 2023 International Conference on Ocean Studies (ICOS). 2023. P. 29–32.

17. Cronin A. D., Schmiedmayer J., and Pritchard D. E. Optics and interferometry with atoms and molecules // *Reviews of Modern Physics*. 2009. Vol. 81, N 3. P. 1051.
18. Pat. US 7 292 031. Micro-cell for NMR gyroscope / H. C. Abbink, E. Kanegsberg, K. D. Marino, and C. H. Volk. 6 Nov. 2007.
19. Eklund E. J. and Shkel A. M. Glass blowing on a wafer level // *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*. 2007. Vol. 16, N 2. P. 232–239.
20. Eklund E. J., Shkel A. M., Knappe S., Donley E., and Kitching J. Spherical rubidium vapor cells fabricated by micro glass blowing // *IEEE (MEMS'07). Conf. on Micro Electro Mechanical Systems*. Kobe, Japan, 21–25 January 2007.
21. Kajiya J. T. The rendering equation // *ACM SIGGRAPH computer graphics*. 1986. Vol. 20. P. 143–150.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Сергеевич Завитаев

— аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: zav.al98@mail.ru

Михаил Илларионович Евстифеев

— д-р техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; профессор; E-mail: mievstifeev@itmo.ru

Поступила в редакцию 10.07.24; одобрена после рецензирования 09.09.24; принята к публикации 21.11.24.

REFERENCES

1. Litmanovich Yu.A., Vershovskiy A.K., Peshekhonov V.G. *Materialy plenarnogo zasedaniya 7-y Rossiyskoy mul'tikonferentsii po problemam upravleniya* (Proceedings of the Plenary Session of the 7th Russian Multi-conference on Management Problems), St. Petersburg, 2014, pp. 35–42. (in Russ.)
2. Walker T. G. and Larsen M. S. *Gyroscopy and Navigation*, 2018, no. 1(26), pp. 28–54. (in Russ.)
3. Ranjbaran M., Tehranchi M.M., Hamidi S.M., Khalkhali S.M.H. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 469, pp. 522–530, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.031>.
4. Larsen M., Bulatowicz M. *Proc. IEEE Intern. Frequency Control Symposium*, 2012, DOI: 10.1109/fcs.2012.6243606.
5. Franz F. and Volk C. *Physical review A*, 1976, no. 5(14), pp. 1711.
6. Eklund E.J. *Microgyroscope based on spin-polarized nuclei*, PhD thesis, University of California, Irvine, 2008.
7. Walker T.G. and Larsen M.S. *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2016, no. 65, pp. 373–401.
8. Patent US 3,778,700, *Optically pumped nuclear magnetic resonance gyroscope*, D. Bayley, I. Greenwood, and J. Simpson, Dec. 11, 1973.
9. Noor R.M. and Shkel A.M. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2018, no. 6(27), pp. 1148–1159, DOI: 10.1109/JMEMS.2018.2874451.
10. Bezmen G.V., Shevchenko A.N., Kostin P.N., Berzeitis A.N., Bezmen V.S., Petrov V.I. *Gyroscopy and Navigation*, 2020, no. 2(11), pp. 115–123.
11. Vershovskii A.K., Litmanovich Yu.A., Pazgalev A.S., Peshekhonov V.G. *Gyroscopy and Navigation*, 2018, no. 1(26), pp. 55–80, DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.1.055-080.
12. Sakamoto Y., Bidinosti C.P., Ichikawa Y. et al. *Hyperfine Interact*, 2015, vol. 230, pp. 141–146, <https://doi.org/10.1007/s10751-014-1109-5>.
13. Siraya T.N. *Gyroscopy and Navigation*, 2010, no. 2, pp. 29–36. (in Russ.)
14. Shevchenko A.N., Zakharova E.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, no. 4(19), pp. 567–573, DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-567-573. (in Russ.)
15. Evstifeev M.I., Zavitaev A.S. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2022, no. 012014(1215), pp. 1–8.
16. Zavitaev A., Evstifeev M. *2023 International Conference on Ocean Studies (ICOS)*, 2023, pp. 29–32.
17. Cronin A.D., Schmiedmayer J., and Pritchard D.E. *Reviews of Modern Physics*, 2009, no. 3(81), pp. 1051.
18. Patent US 7,292,031, *Micro-cell for NMR gyroscope*, H.C. Abbink, E. Kanegsberg, K.D. Marino, and C.H. Volk, Nov. 6, 2007.
19. Eklund E.J. and Shkel A.M. *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, 2007, no. 2(16), pp. 232–239.
20. Eklund E.J., Shkel A.M., Knappe S., Donley E., and Kitching J. *IEEE (MEMS'07), Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Kobe, Japan, January 21–25, 2007.
21. Kajiya J.T. *ACM SIGGRAPH computer graphics*, 1986, no. 20, pp. 143–150.

DATA ON AUTHORS

Alexnadr S. Zavitaev

— Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: zav.al98@mail.ru

Michail I. Evstifeev

— Dr. Sci., Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Professor; E-mail: mievstifeev@itmo.ru

Received 10.07.24; approved after reviewing 09.09.24; accepted for publication 21.11.24.