

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.4>

УДК: 534.143; 534.134; 535.312.2; 537.63

## РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ГРАДИЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ТОРСИОННЫМ ПОДВЕСОМ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

А. Ю. Гришенцев<sup>1</sup>, А. Г. Коробейников<sup>1,2</sup>, В. А. Горошков<sup>1</sup>, Р. И. Чернов<sup>1</sup>,  
А. В. Тихомиров<sup>1</sup>, О. В. Козин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский филиал ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 5

Статья поступила в редакцию 15 октября 2021 г.

**Аннотация.** В работе выполнено моделирование и поиск конструкционного решения магнитооптического датчика градиента магнитного поля с торсионным подвесом чувствительного элемента. Разработана математическая модель, произведено моделирование в программной среде Wolfram Mathematica. Произведено сравнение и выбор воздушного, жидкостного и магнитоиндукционного успокоителей с точки зрения целесообразности и эффективности применения. Результаты анализа показывают, что наиболее эффективным является магнитоиндукционный успокоитель, позволяющий получить необходимую скорость затухания переходных процессов в системе «магнит на торсионном подвесе» при этом, не влияя принципиальным образом на конструкцию. Объектом исследования является датчик градиента магнитного поля с торсионным подвесом чувствительного элемента. Предметом исследований являются физические процессы, происходящие с датчиком градиента магнитного поля с торсионным подвесом чувствительного элемента при изменении внешнего магнитного поля. Цель исследований: разработка базовых конструкционных решений, моделирование и анализ

магнитооптического датчика градиента магнитного поля с торсионным подвесом чувствительного элемента.

**Ключевые слова:** датчик градиента магнитного поля, магнитооптическая система, математическое моделирование, управление переходными процессами, электромагнитное поле

**Abstract.** The work has been done to simulate and search for a design solution for a magneto-optical sensor of a magnetic field gradient with a torsion suspension of a sensitive element. A mathematical model has been developed and simulation in the Wolfram Mathematica software environment has been performed. A comparison of air, liquid and magnetic-induction dampers has been made and a selection of the most effective solution has been carried out. The results of the analysis have shown that the most effective solution is the magnetic-induction damper, which allows changing of transition processes duration without direct affection on the sensitive element. Adjustment of the transient process velocity allowed achieving optimal system reaction time. The object of the study is the sensor of the magnetic field gradient with the torsion suspension of the sensitive element. The subject of research is physical processes with a magnetic field gradient sensor with a sensible torsion suspension when changing the external magnetic field. Research objective: development of basic design solutions, modeling, and analysis of the magneto-optical sensor of the magnetic field gradient with the torsion suspension of the sensitive element.

**Key words:** magnetic field gradient sensor, magneto-optical system, mathematical modeling, transient control, electromagnetic field

## **Введение.**

Развитие современных сенсорных систем в значительной степени определяется доступным множеством высокочувствительных датчиков. При измерении градиента магнитного поля одним из перспективных методов является метод измерения градиента магнитного поля с помощью устройств на подвесе [1–5]. В данной работе выполнено моделирование и поиск конструкционного решения магнитооптического датчика градиента магнитного

поля с торсионным подвесом чувствительного элемента. Авторами разработана математическая модель, выполнено моделирование и предложены базовые элементы конструкции чувствительного элемента, включая успокоитель, и системы оптического геометрического масштабирования и приёма отражённого сигнала с помощью системы зеркал и фоточувствительной линейки. Результаты моделирования показывают, что наиболее эффективно для успокоения колебаний магнита на торсионном подвесе использовать магнитоиндукционный успокоитель.

Цель исследований: разработка базовых конструктивных решений, моделирование и анализ магнитооптического датчика градиента магнитного поля с торсионным подвесом чувствительного элемента.

### **1. Принцип действия и возможный вариант конструкционного исполнения**

Для детализации идеи конструктивного исполнения и моделирования магнитооптического датчика градиента магнитного поля (МОДГМП) приведём обобщённую блок-схему (рис. 1). Чувствительным элементом является магнит, закреплённый на не скручиваемой нити, например, нейлоновой, кварцевой и др. Будем называть такой подвес магнита – торсионным. Поверхность одной из граней магнита является зеркалом, на которое направлен лазерный луч. При определённых изменениях внешнего магнитного поля магнит, закреплённый на торсионном подвесе, совершает поворот, что приводит к изменению угла падения и угла отражения лазерного луча от поверхности магнита. Лазерный луч после отражения от магнита проходит заданный путь, а затем падает на поверхность фоточувствительной линейки, с помощью оцифровки данных которой фиксируется смещение лазерного луча. Таким образом, регистрируется изменение внешнего магнитного поля.

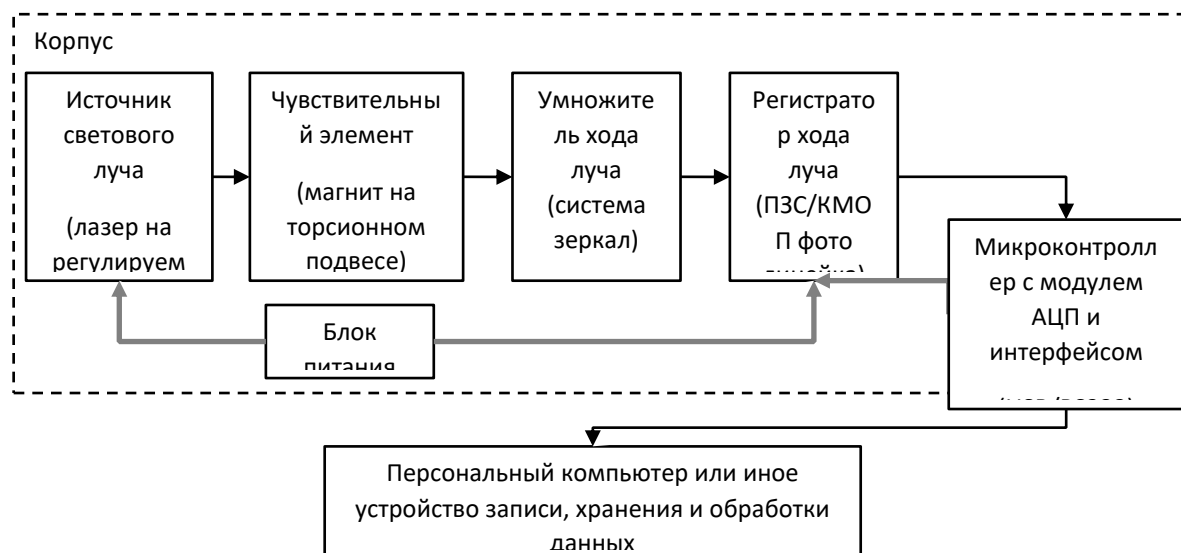


Рис. 1. Блок-схема.

С целью уменьшения габаритов датчика при обеспечении необходимой длины хода отражённого от магнита лазерного луча предлагается использовать систему зеркал (рис. 2).

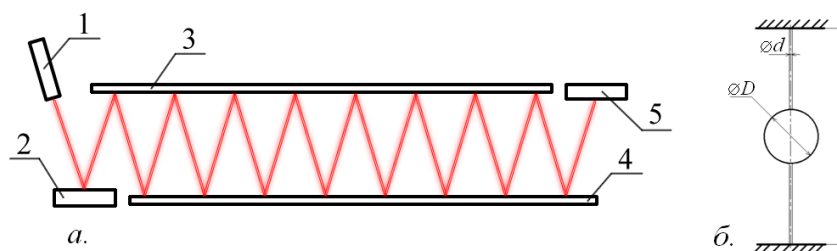


Рис. 2. а. – Схематическое изображение оптомеханической части МОДГМП, на схеме обозначены: 1 – полупроводниковый источник лазерного излучения; 2 – чувствительный элемент (магнит на торсионном подвесе); 3,4 – зеркала; 5 – фотоприёмная линейка; б. – торсионный подвес магнита.

На изображении (рис. 3, б) показана система торсионного подвеса магнита на нерастяжимой не скручиваемой нити. Для изготовления чувствительного элемента можно использовать два тонких цилиндрических аксиально-намагниченных неодимовых магнита. Между магнитами пропускается нить, а сами магниты склеиваются друг с другом. На основания полученного сдвоенного магнитного цилиндра приклеиваются зеркала для весовой симметрии с двух сторон. Для облегчения конструкции в качестве зеркала можно использовать высококачественную зеркальную пленку, при этом поверхность магнита, к

которой будет приклеиваться зеркало, необходимо предварительно подготовить, придав ей требуемый уровень шероховатости. Подобную предварительную подготовку, состоящую из процедуры шпаклёвки и последующего шлифования, можно выполнить, используя эпоксидную смолу и абразивы.

## 2. Математическая модель магнитомеханической части датчика

Произведём моделирование чувствительного элемента МОДГМП, при этом внешнее магнитное поле представим в виде гармонических Фурье сумм трехкомпонентного вектора  $B = \{B_x, B_y, B_z\}$ :

$$B = \{B_x, B_y, B_z\} \Leftrightarrow \begin{cases} B_x = B_{0x} + \sum_{k=1}^{K_x} m_x^k B_0 \sin(2\pi f_x^k t + \varphi_x^k) \\ B_y = B_{0y} + \sum_{k=1}^{K_y} m_y^k B_0 \sin(2\pi f_y^k t + \varphi_y^k) \\ B_z = B_{0z} + \sum_{k=1}^{K_z} m_z^k B_0 \sin(2\pi f_z^k t + \varphi_z^k) \end{cases} \quad (1)$$

Компонента  $B_z$  совпадает с осью вращения магнита (рис. 2, б) и перпендикулярна осевой линии цилиндра магнита, которая лежит в одной плоскости с компонентами  $B_x, B_y$ .

Вращение магнита, подвешенного на нити, под действием изменяющегося внешнего магнитного поля можно описать совокупностью моментов, действующих на торсионный подвес с магнитом, соотношением:

$$M_{и} + M_{с} + M_{п} = M_{м}, \quad (2)$$

где  $M_{и}$  – момент силы инерции, действующий на магнит,  $M_{с}$  – момент силы сопротивления, включающий в себя сопротивление воздуха и силы трения,  $M_{п}$  – момент противодействующей силы нити,  $M_{м}$  – момент силы воздействия внешнего магнитного поля на постоянный магнит.

В соответствии с законами динамики вращательного движения момент силы инерции, действующей на магнит, пропорционален моменту инерции магнита и связан с угловым ускорением соотношением:

$$M_{и} = J \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \quad (3)$$

где  $J$  – момент инерции магнита,  $\varphi$  – угол поворота магнита,  $t$  – время,  $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$  – вектор углового ускорения.

Момент силы сопротивления определяется коэффициентом успокоения системы, который характеризует процессы диссипации энергии системы и сводит колебательный процесс к затухающим колебаниям в отсутствии внешней возмущающей силы. Момент силы сопротивления связан с угловой скоростью и определяется соотношением:

$$M_c = P \frac{d\varphi}{dt}, \quad (4)$$

где  $P$  – коэффициент успокоения системы, безразмерная величина, характеризующая влияние сил, действие которых приводит к рассеиванию энергии в системе,  $\frac{d\varphi}{dt}$  – вектор угловой скорости.

В задачах расчёта и проектирования электромеханических приборов коэффициент успокоения обычно рассчитывают с помощью эмпирических формул [6]. Так для прямоугольного плоского крыла и воздушной среды:

$$P \approx \left( \frac{0.25}{\delta} + 0.153 \right) ab\beta 10^{-10} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}, \quad (5)$$

где  $\delta$  – зазор между крылом и стенками камеры (мм),  $a$  и  $b$  – размеры крыла (мм),  $\beta$  – расстояние от оси вращения до центра крыла (мм). При полукруглой форме крыла (часть цилиндра магнита) коэффициент успокоения для двух крыльев, образованных магнитом, можно оценить как:  $P \approx \frac{1}{2} \left( \frac{0.25}{\delta} + 0.153 \right) \pi R^3 10^{-10}$ ,  $R = 0.5D$  – радиус цилиндра магнита (рис. 2, б). Учитывая, что система торсионного подвеса не заключена в кожух и значительно удалена от стенок корпуса прибора, то слагаемое  $\frac{0.25}{\delta}$  можно исключить, в результате получим выражение  $P \approx 0,08 \pi R^3 10^{-10}$ .

Момент противодействующей силы нити, при относительно малых углах закручивания нити на единицу длины, пропорционален коэффициенту кручения и углу закручивания нити, и зависит от материала, размеров и площади сечения нити. Момент противодействующей силы нити определяется соотношением:

$$M_n = kG\varphi, \quad (6)$$

где  $G$  – коэффициент кручения нити (модуль кручения нити),  $k$  – единичный вектор момента силы противодействия нити, направление

которого выбирается в зависимости от направления закручивания нити, притом, что за положительное направление примем закручивание против часовой стрелки при взгляде на торсионный подвес сверху вдоль оси нити. Коэффициент кручения нити зависит от параметров нити, представляет собой момент противодействующей силы нити на единичный угол её поворота и равен  $G = \frac{\pi N r^4}{2l}$ , где  $N$  – противодействующий модуль кручения нити,  $r$  – радиус сечения нити,  $l$  – длина нити.

Момент силы воздействия внешнего магнитного поля на постоянный магнит определяется в соответствии с взаимной ориентацией внешнего возмущающего магнитного поля и магнитного поля магнита. Магнит выполняет функции магнитной стрелки, то есть стремится повернуться таким образом, чтобы расположиться вдоль силовых линий внешнего магнитного поля. В то же время можно представить магнит в качестве единичного контура (витка) с током. В соответствии с описанным выше расположением полюсов магнита получается, что пара сил, равных по величине, противоположных по направлению и создающих вращающий момент, будет приложена ко всем парам элементарных объемов магнита, расположенных симметрично относительно оси вращения магнита. Момент сил воздействия внешнего магнитного поля описывается соотношением:

$$M_m = [p_m \times B], \quad (7)$$

где  $p_m$  – магнитный момент,  $B$  – индукция внешнего магнитного поля (1).

Подставив выражения (3–7) в (2) получим дифференциальное уравнение второго порядка следующего вида:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + P \frac{d\varphi}{dt} + kG\varphi = [p_m \times B]. \quad (8)$$

Выражение для расчёта момента инерции цилиндра относительно поперечной оси симметрии известно из литературы [7]:  $J = m \left( \frac{R^2}{4} + \frac{h^2}{12} \right)$ , где  $h$  – высота магнита.

Для вычисления силы воздействия на магнит внешнего магнитного поля удобнее заменить магнит эквивалентным витком с электрическим током. При

этом направление намагниченности ориентировано по нормали к плоскости витка. Тогда магнитный момент магнита будет выражаться через площадь и протекающий в витке ток:  $p_m = ISn$ , где  $I$  – сила тока в витке,  $S$  – площадь витка,  $n$  – вектор нормали к площади  $S$ , охваченной контуром с током.

Найдем соотношение для связи внешнего возмущающего воздействия с ходом лазерного луча по поверхности фоточувствительной линейки. При повороте магнита на угол  $\varphi$ , луч, отражённый от зеркала, закреплённого на магните, совершает поворот относительно первоначального расположения на угол  $2\varphi$ , таким образом, при длине лазерного луча  $s$  (от зеркала магнита до фоточувствительной линейки), ход луча по поверхности фоточувствительной линейки составит:  $2s \sin \varphi = x$ .

Характерное разрешение фоточувствительных линеек составляет значение 100...500 пикселей на мм, так, например, фоточувствительная линейка TCD1304DG производства Toshiba [8] имеет разрешение 126 пикселей/мм. Используя определённый экземпляр фоточувствительной линейки, и задав длину хода лазерного луча, можно оценить чувствительность МОДГМП как изменение внешнего магнитного поля, приводящего к смещению лазерного луча на 1 пиксель по фоточувствительной линейке. Обозначив диаметр одного пикселя  $\Delta x$  получим:  $\varphi = \arcsin \frac{\Delta x}{2s}$ . При этом возможно повышение чувствительности за счёт математической обработки сигнала от фоточувствительной линейки, например, с помощью метода, предложенного в работе [9].

### 3. Методика и результаты моделирования

На основании формул и общих соображений, приведённых в предыдущем разделе, в программной среде Wolfram Mathematica была разработана программа, реализующая математическую модель магнитомеханической части датчика и решения дифференциального уравнения (8). Для исследования применялась методика воздействия на вход системы (датчик) возмущением магнитного поля, напряжённость которого в направлении перпендикулярном оси намагниченности магнита, изменялась по функции Хевисайда от 0 мкТл до 5 мкТл, что приводит к повороту магнита на угол  $0.5\pi$  рад. Таким образом,



можно исследовать отклик чувствительного элемента на единичную ступенчатую функцию. На изображении (рис. 3) показан график затухающих колебаний зависимости угла поворота магнита от времени  $\varphi(t)$ , радиус магнита 6 мм, высота магнита 2 мм, длина нити 20 мм, радиус нити 0.05 мм.

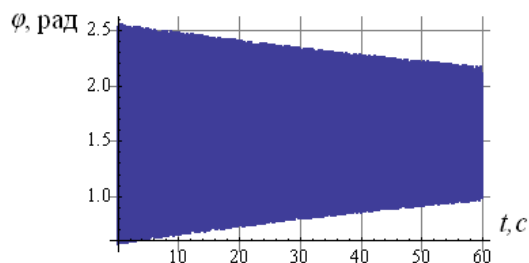


Рис. 3. Затухание крутильных колебаний магнита (в воздухе) как отклик на изменение внешнего магнитного поля по функции Хевисайда.

Моделирование показало, что наиболее существенную зависимость времени затухания переходного процесса и собственной резонансной частоты крутильных колебаний магнита на торсионном подвесе система имеет от площади магнита и коэффициента успокоения системы  $P$ . Поверхность магнита за счёт трения с воздухом образует систему воздушного успокоителя, которого, как видно из результатов моделирования (рис. 3), недостаточно для успокоения магнита на торсионном подвесе. Заметим, что при длине нейлоновой нити 20 мм диаметром 0.05 мм, толщине магнита 2 мм и диаметре магнита 6 мм частота собственных резонансных колебаний магнита в воздушной среде составляет  $\approx 93$  Гц.

В электромеханическом приборостроении используются воздушные, магнитные и жидкостные успокоители [6]. Применение жидкостных успокоителей имеет ряд специфических особенностей, оборачивающихся значительными усложнениями конструкции. Вязкость жидкости сильно зависит от её температуры, кроме того, при использовании жидкостного успокоителя за счёт погружения магнита в жидкость возникает дополнительная сложность расчёта траектории лазерного луча с учётом преломления. Можно использовать погружение в жидкость всей системы (торсионный подвес, источник лазерного излучения, систему зеркал и фотоприёмную линейку), но и такое решение значительно усложняет конструкцию. Поэтому, по мнению авторов, наиболее

целесообразно для рассматриваемой конструкции применять воздушные или магнитные успокоители. В магнитоиндукционных успокоителях момент успокоения создаётся за счёт взаимодействия магнитного потока постоянного магнита с вихревыми токами, индуцированными в секторе успокоителя. В книге [6] коэффициент успокоения магнитного успокоителя предлагается оценить, используя выражение:

$$P = \frac{B_3^2 w R^2 \Delta}{\pi \rho} (E - F) 10^{-9} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}, \quad (9)$$

где  $B_3$  – магнитная индукция в воздушном зазоре магнитной системы, Т;  $w$  – расстояние от оси вращения до центра полюса магнита;  $R$  – радиус магнита, мм;  $\Delta$  – толщина металла в котором протекают вихревые токи, мм;  $\rho$  – удельное сопротивление металла с вихревыми токами (например, для меди  $0.017 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ );  $E$  и  $F$  – табличные коэффициенты, которые можно найти, например, в [6].

При использовании воздушного успокоителя возможно следующее решение (рис. 4), когда площадь крыла (2) успокоителя увеличивается за счёт крепления к магниту (1) лёгких пластин, обладающих достаточной площадью для гашения колебаний за счёт трения с воздухом, оценить размеры таких крыльев возможно из выражения (5) по заданному коэффициенту успокоения.

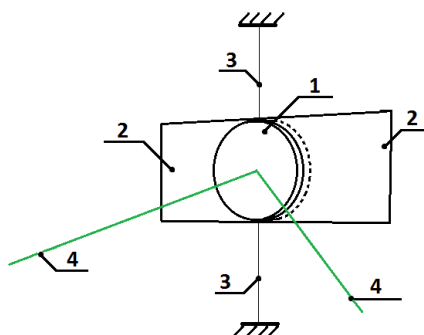


Рис. 4. Воздушный успокоитель: 1 – магнит на торсионном подвесе; 2 – крыло успокоителя; 3 – нить торсионного подвеса; 4 – лазерный луч.

В случае использования магнитоиндукционного успокоителя общий вид конструкции может быть как на изображении (рис. 5): магнит (1) на торсионном подвесе (3) помещён в медную трубку (2) с прорезью для прохождения лазерного луча (4). При повороте магнита (1) в медной трубке (2), пронизываемой

изменяющимся магнитным полем, возникает вихревой ток, магнитное поле которого препятствует повороту магнита, в результате магнитоиндукционного взаимодействия энергия вращательного движения переходит в тепловую энергию вихревых токов, что приводит к успокоению системы.

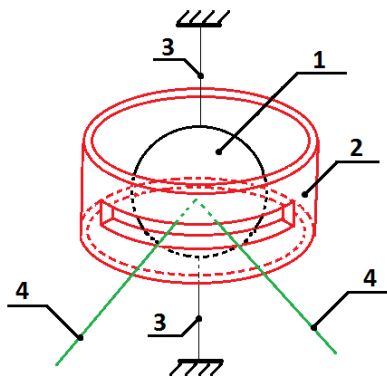


Рис. 5. Магнитоиндукционный успокоитель: 1 – магнит на торсионном подвесе; 2 – медная трубка успокоителя с прорезью; 3 – нить торсионного подвеса; 4 – лазерный луч.

Предлагаемые конструкционные решения и математический аппарат позволяют подобрать необходимые параметры успокоителя (воздушного или индукционного) по коэффициенту успокоения, исходя из заданного времени затухания собственных колебаний магнита на торсионном подвесе.

Затухания колебания чувствительного элемента на торсионном подвесе можно приближенно выразить через уравнение:

$$\varphi(t) = \operatorname{Re}(\varphi_0 - e^{-\frac{t}{\tau} + j\omega t}), \quad (10)$$

где  $\tau$  – постоянная времени затухания;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота собственных (резонансных) колебаний системы;  $\varphi_0$  – конечный (асимптотический) угол поворота чувствительного элемента. Период колебаний  $T = \frac{1}{f}$ .

Характер затуханий, выраженных через (10), будет определяться временем затухания ( $\sim 3\tau$ ) и частотой собственных колебаний  $\omega$ , причём возможны следующие варианты:

1. Время затухания много меньше периода собственных колебаний  $3\tau < T$ , собственные колебания будут затухать длительное время, система имеет

быстрый отклик, но длительное время затухания собственных колебаний при этом регистрация угла  $\varphi(t)$  возможна только после успокоения системы.

2. Время затухания сравнимо с периодом собственных колебаний  $3\tau \approx T$ , собственные колебания практически не наблюдаются, т.к. энергия инерции системы почти полностью расходуется на преодоление вязкости среды, система имеет наименьшее время до регистрации отклика.

3. Время затухания больше периода собственных колебаний  $3\tau > T$ , собственные колебания не наблюдаются, из-за высокой вязкости среды переключение происходит медленно.

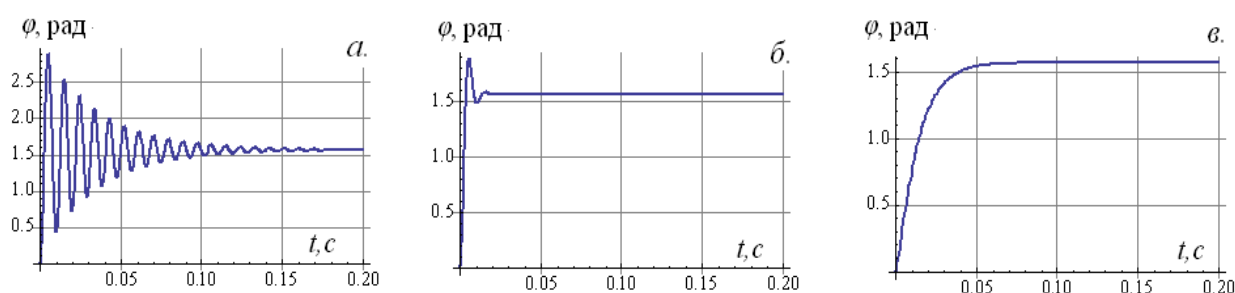


Рис. 6. Затухание колебаний магнита на торсионном подвесе при различных коэффициентах успокоения: *а.* – коэффициент успокоения  $10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{ м} \cdot \text{ с/рад}$ ; *б.* – коэффициент успокоения  $10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{ м} \cdot \text{ с/рад}$ ; *в.* – коэффициент успокоения  $10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{ м} \cdot \text{ с/рад}$ .

Математическое моделирование показывает, что наиболее приемлемые результаты по скорости затухания собственных колебаний (успокоения) магнита на торсионном подвесе происходит при значениях коэффициента успокоения из диапазона  $P = 10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{ м} \cdot \text{ с/рад}$ . При воздушном успокоителе для достижения подобных величин коэффициента успокоения площадь крыльев должна быть достаточно высока по сравнению с площадью магнита, что приведёт к значительному увеличению объёма движущихся частей. Магнитоиндукционный успокоитель может быть более эффективен, т.к. не увеличивает площадь и объём подвижных частей.

Если обратиться к предлагаемой конструкции (рис. 5), то можно заметить, что медная трубка при выполнении круговой прорези, для прохождения лазерного луча, разделится на две трубки, сдвигая и, раздвигая которые

пользователь получает возможность настраивать магнитоиндукционный коэффициент затухания.

### **Заключение.**

Произведено моделирование магнитооптического датчика градиента магнитного поля с торсионным подвесом чувствительного элемента. Разработана математическая модель чувствительного элемента (магнита) на торсионном подвесе, выполнено моделирование в среде Wolfram Mathematica. Предложены методы повышения скорости успокоения собственных колебаний системы, образованной магнитом на торсионном подвесе. Результаты моделирования и анализа показывают, что для успокоения собственных колебаний магнита на торсионном подвесе наиболее целесообразно использовать воздушный или магнитоиндукционный успокоитель. Причём магнитоиндукционный успокоитель, по мнению авторов, имеет преимущество, т.к. позволяет не увеличивать массогабаритные параметры подвижной системы (магнита на торсионном подвесе) и предоставляет возможность регулировки магнитоиндукционного коэффициента затухания, не затрагивая непосредственно торсионный подвес.

### **Финансирование.**

Работа выполнена в рамках проекта «Методы искусственного интеллекта для киберфизических систем» НИР 620164

### **Литература**

1. Петров Ю.П., Гимашев В.И., Щербинина Т.А., Данилов Ю.Л. Геофизические устройства на основе магнитных подвесов. *Геология и полезные ископаемые Западного Урала*. 2010. №10. С.214-217.
2. Сергушин П.А., Мусалимов В.М. Моделирование динамики магнитоэлектронного вариометра. *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*. 2007. №37. С.333-338.

3. Тимошенко С.П., Бойко А.Н., Симонов Б.М., Зотов С.А., Анчутин С.А. Расчет и оптимизация конструкции подвесов чувствительных элементов микроэлектромеханических устройств. *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России*. 2006. №3. С.66-69.
4. Коробейников А.Г., Перечесова А.Д., Калапышина И.И. Исследование параметров полимерного подвеса чувствительного элемента в магнитометрическом приборе для измерения низкочастотных магнитных полей. *Сборник статей XXV Всероссийской конференции и 16-ой Школы молодых ученых. Структура и динамика молекулярных систем*. Национальный парк Марий Чодра, озеро Яльчик. 2018. С.75-82.
5. Сергушин П.А. Магнитовариометр как средство измерения магнитных полей. *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*. 2006. №28. С.173-175.
6. Преображенский А.А. *Аналоговые электроизмерительные приборы*. Москва, Высшая школа. 1979. 352 с.
7. Никитин Н.Н. *Курс теоретической механики: Учебник для машиностроит. и приборостроит. спец. ВУЗов. – 5-е изд., перераб. и доп.* Москва, Высшая школа. 1990. 607 с.
8. TCD1304DG CCD Linear Image Sensor [online]. Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation. TOSHIBA CORPORATION. Дата обращения: 15.10.2021. URL: <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/product/linear-image-sensors/detail.TCD1304DG.html>
9. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г., Бондаренко И.Б. К вопросу о сверхразрешении чувствительных матриц. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2016. №10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/3/text.pdf>

**Для цитирования:**

Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г., Горошков В.А., Чернов Р.И., Тихомиров А.В., Козин О.В. Разработка и моделирование магнитооптического датчика градиента магнитного поля с торсионным подвесом чувствительного элемента. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.4>

