

Приборы и техника физического эксперимента

Научная статья

УДК 621.384.62

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18304>

ДАТЧИК МИКРОМЕТЕОРОИДОВ И ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА ОСНОВЕ ПЛЕНОЧНОЙ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

А. М. Телегин , М. П. Калаев

Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С. П. Королёва, г. Самара, Россия

 talex85@mail.ru

Аннотация. В работе предложена модель датчика высокоскоростных микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) в виде круглой спиральной пленочной катушки индуктивности. Конструкция датчика обеспечивает создание частотного резонанса, возникающего при разрыве металлической полоски катушки. Полученные результаты компьютерного и лабораторного моделирования данной конструкции показали, что пленочная катушка пригодна для регистрации высокоскоростных микрочастиц размерами более 100 мкм на космических аппаратах типа CubeSat. Место разрыва металлической полоски катушки индуктивности можно определять с помощью анализа сдвига резонансной частоты амплитудно-частотной характеристики. При этом надежное определение места разрыва становится возможным, если номер разорванного витка больше 5.

Ключевые слова: микрометеороид, космический мусор, катушка индуктивности, кратер, космический аппарат, лабораторное моделирование

Для цитирования: Телегин А. М., Калаев М. П. Датчик микрометеороидов и частиц космического мусора на основе пленочной катушки индуктивности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 3. С. 49–59. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18304>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18304>

A DETECTOR OF MICROMETEOROIDS AND SPACE DEBRIS PARTICLES BASED ON A FILM INDUCTANCE COIL

А. М. Телегин , М. П. Калаев

Samara National Research University, Samara, Russia

 talex85@mail.ru

Abstract. In the paper, a model of a detector of high-speed microparticles (micrometeoroids and space debris) is proposed, made in the form of a round spiral film inductance coil. The design of the gauge ensures the creation of frequency resonance that occurs when the metal strip of the coil is broken. The obtained results of a laboratory and computer simulations of the detector showed that the film coil is suitable for recording high-speed microparticles larger than 100 μm on a spacecraft such as CubeSat. The fracture point of the inductance coil can be found by analyzing the shift of the resonant frequency of the amplitude-frequency characteristic. In this case, the reliable determination of the point becomes possible if the number of the broken turn is greater than 5.

Keywords: micrometeoroid, space debris, inductance coil, crater, spacecraft, laboratory simulation

For citation: Telegin A. M., Kalaev M. P., A detector of micrometeoroids and space debris particles based on a film inductance coil, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (3) (2025) 49–59. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18304>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

При проектировании космических аппаратов необходимо заранее предусмотреть влияние факторов космического пространства на элементы конструкции и электронику. Для этого создаются наземные испытательные лаборатории, проводятся космические эксперименты, составляются модели поведения материалов в условиях космического пространства. Наряду с разного рода излучениями космической среды (протоны, электроны и др.) на космические аппараты воздействуют частицы космического мусора, а также микрометеороиды. Как правило, открытыми элементами космических аппаратов (КА), воспринимающими такие воздействия, являются многослойные конструкции с различными покрытиями (терморегулирующие покрытия, тепловые трубы, теплообменники, оптические стекла, солнечные батареи, антенны, электровакуумная теплоизоляция и т. п.). Воздействия частиц, не вызывающие сквозного пробоя указанных элементов, ведут к деградации их поверхности, что со временем изменяет оптические, электрические, механические и другие характеристики, влияющие в целом на работоспособность КА. С увеличением срока эксплуатации космических аппаратов проблема регистрации микрометеороидов и все возрастающего количества техногенных частиц, а также защита космического аппарата становится все более актуальными. При этом в последние годы наблюдается тенденция увеличения концентрации высокоскоростных техногенных пылевых частиц на околоземных орbitах [1 – 12].

Для контроля распределения микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) в околоземном пространстве применяются датчики, работа которых основана на разных физических принципах [11 – 15]. Особый интерес представляют датчики, изготовленные с использованием пленок, что позволяет иметь датчик с большой чувствительной поверхностью и относительно небольшой массой [13 – 21].

В настоящей работе рассмотрена концепция пленочного датчика высокоскоростных микрочастиц на основе пленочной спиральной катушки индуктивности, которая позволяет определять место удара высокоскоростной микрочастицы с помощью спектрального анализа полученной информации. При этом используется только один измерительный канал вместо большого количества мультиплексоров, как принято в известных аналогах [18].

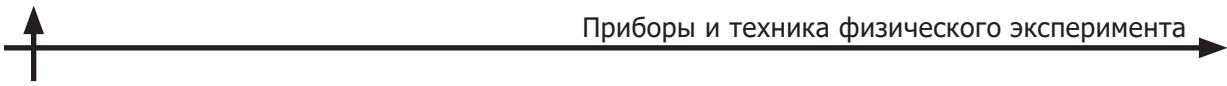
Описание модели первичного преобразователя (без учета паразитных параметров)

В качестве первичного преобразователя датчика высокоскоростных микрочастиц предлагается использовать пленочную катушку индуктивности, выполненную из проводящего материала, нанесенного на диэлектрическое основание (рис. 1, а). С другой стороны основания его поверхность модифицирована металлизацией.

Индуктивность такой пленочной круглой спиральной катушки индуктивности можно рассчитать по следующей формуле [22 – 28]:

$$L = 0,033937 \cdot \frac{a^2 \cdot n^2}{8a + 11c} \cdot K_g,$$
$$a = \frac{D_o + D_i}{4}, \quad c = \frac{D_o - D_i}{2},$$
$$K_g = 0,570 - 0,145 \cdot \ln (W/h),$$

где L , нГн, – индуктивность катушки; n – количество ее витков; D_i , D_o , мкм, – ее внутренний и внешний диаметры, соответственно; h , мкм, – толщина диэлектрического



основания; W , мкм, — ширина полоски; (некоторые геометрические параметры показаны на рис. 1, *a*); K_g — коэффициент, учитывающий наличие заземляющей плоскости.

Коэффициент K_g уменьшается по мере приближения к заземляющей плоскости, поэтому в работе [24] он был принят равным единице.

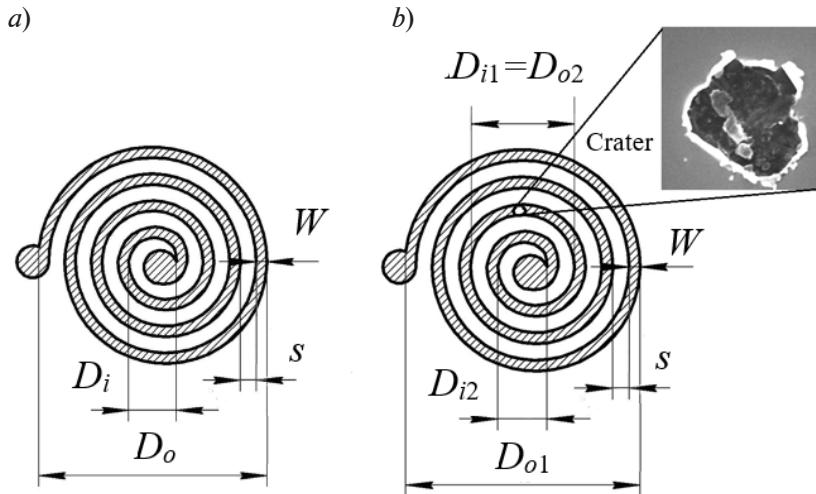


Рис. 1. Сечения катушек индуктивности без разрыва (*a*) и с разрывом (*b*);
показаны их геометрические параметры.

На вставке: микрография чашевидного углубления (кратера)

При ударе высокоскоростной микрочастицы в металлический полосок происходит образование кратера, приводящего к его разрыву (рис. 1, *b*). Размеры образовавшегося кратера можно примерно оценить, если привлечь эмпирические модели, представленные в работе [29]:

$$D/d = K_1 \cdot \rho_p^{0,333} \cdot V^{0,667},$$

где K_1 — коэффициент, значение которого зависит от природы материалов металлического полоска и микрочастицы; D, d , см, — диаметры кратера и микрочастицы, соответственно; ρ_p , г/см³, — плотность ударяющей микрочастицы; V , км/с, — скорость микрочастицы.

Разрыв металлического полоска приводит к образованию электрической емкости, последовательно подключенной к металлическому полоску (см. рис. 1 и 2). Номинал этой емкости можно рассчитать с использованием модели компланарного конденсатора, выполненного на основе микрополосковой линии [30 — 33]:

$$C_g = \frac{1}{2} C_{even}, \quad C_{even} = W \cdot \left(\frac{S}{W} \right)^{m_e} \cdot e^{K_e} \left(\frac{\epsilon}{9,6} \right)^{0,9},$$

$$m_e = \frac{1,565}{\left(\frac{W}{h} \right)^{0,16}} - 1 \quad \text{при } 0,3 \leq \frac{S}{W} \leq 1, \quad K_e = 1,97 - \frac{0,03}{\frac{W}{h}} \quad \text{при } 0,3 \leq \frac{S}{W} \leq 1.$$

где C_g , пФ, — емкость разорванного полоска; m_e, K_e, C_{even} — промежуточные переменные при расчете емкости разорванного полоска; S , мкм, — ширина разрыва металлического полоска, равная диаметру кратера от высокоскоростного соударения; W , см, — ширина металлического полоска; h , мм, — высота диэлектрической подложки; ϵ — диэлектрическая проницаемость материала, на который нанесен полосок.

Наши предварительные расчеты показали, что емкость компланарного конденсатора мала, по сравнению с межвитковой емкостью пленочной катушки индуктивности, поэтому приближенно можно оценить C_g как емкость между двумя соседними витками катушки, где произошел разрыв (в соответствии с выражениями, приведенными в работах [21, 34]).

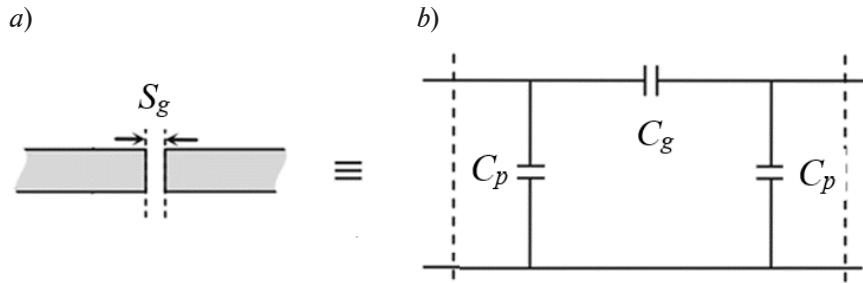


Рис. 2. Схематическое изображение модели компланарного конденсатора, образовавшегося за счет разрыва металлического полоска (см. рис. 1) (a) и его эквивалентная схема (b):

S_g – ширина полоска; C_g – емкость разорванного полоска; C_p – паразитная емкость полоска относительно металлизации с другой стороны диэлектрического основания

Таким образом, катушку индуктивности с разрывом (см. рис. 1, 2) можно представить в виде двух катушек индуктивности, имеющих взаимную индуктивную связь и соединенных последовательно через электрическую емкость (рис. 3). При этом взаимную индуктивность M можно оценить с помощью следующего аналитического выражения [25]:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} N_1 \cdot N_2 \frac{D_{o1}}{(1-\theta) \cdot (\Delta-\delta)} \times \left[\frac{A_3}{3} (\Delta^3 - \delta^3) \cdot \ln\left(\frac{1}{\theta}\right) + \frac{A_5}{10} (\Delta^5 - \delta^5) \cdot \left(\frac{1}{\theta^2} - 1\right) + \frac{A_7}{28} (\Delta^7 - \delta^7) \cdot \left(\frac{1}{\theta^4} - 1\right) \right],$$

где N_1, N_2 – числа витков большей и меньшей катушек индуктивности; D_{o1}, D_{i1} , см, – соответственно внешний и внутренний диаметры большой катушки; d_{o1}, d_{i1} , см, – соответственно внешний и внутренний диаметры меньшей катушки (см. рис. 1, б); $\theta = D_{o2} / D_{o1}$; $\Delta = D_{i1} / D_{o1}$; $\delta = D_{i2} / D_{o1}$; $A_3 = 9,870$, $A_5 = 3,701$, $A_7 = 2,313$ – коэффициенты, использованные здесь, взяты из работы [25].

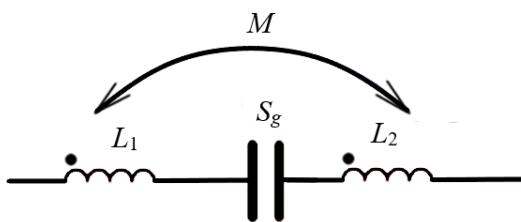


Рис. 3. Эквивалентная схема разорванной катушки индуктивности:

L_1, L_2 – индуктивности большей и меньшей катушек; M – их взаимная индуктивность; C_g – емкость (см. рис. 2). Каждая жирная точка показывает начало втекания тока в катушку индуктивности

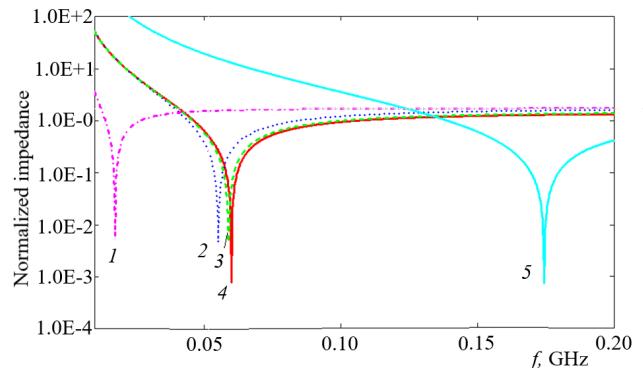


Рис. 4. График изменения нормированного импеданса разорванной катушки индуктивности при разных парах значений параметров (коэффициент $k = N/N_{\max}$ и емкость C_g , пФ): 0,7, 0,005 (кривая 1); 0,7, 0,05 (2); 0,5, 0,05 (3); 0,9, 0,05 (4); 0,7, 0,005 (5)

Результаты компьютерного моделирования, проведенного по представленным выше аналитическим выражениям, представлены на рис. 4. При моделировании учитывалось, что внешний диаметр катушки был взят равным 10 см (размеры выбирались так, чтобы можно было разместить катушку на внешнюю стенку космического аппарата формата CubeSat), внутренний диаметр спирали – 1 см, ширина полоска – 250 мкм, количество витков – 90. Индуктивность катушки составила примерно $9,65 \cdot 10^{-5}$ Гн.

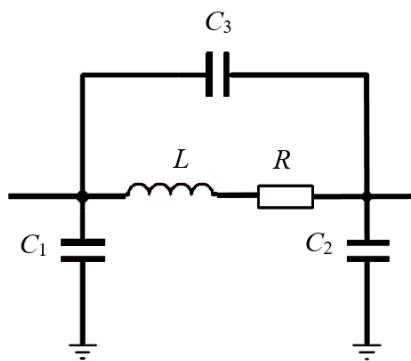
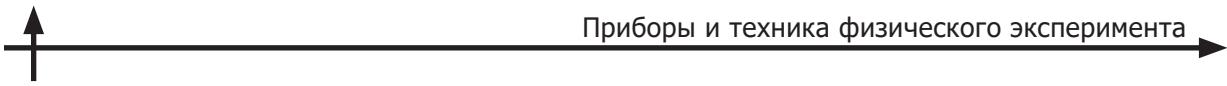


Рис. 5. Эквивалентная схема разорванной катушки индуктивности с учетом паразитных параметров:
 C_3 – паразитная межвитковая емкость, R – паразитное сопротивление катушки индуктивности

где R_{sh} , Ом/□, – сопротивление квадрата пленки; C_3 , пФ, – паразитная межвитковая емкость; S , мкм, – зазор между витками индуктивности; K – поправочный коэффициент, учитывающий сжатие тока в углах проводника.

Результаты моделирования зависимости импеданса катушки индуктивности от частоты (с учетом паразитных параметров), представленные на рис. 6, показали, что из-за паразитных элементов на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) появляется дополнительный резонанс.

Результаты моделирования показали, что на высоких частотах полный импеданс разорванной катушки индуктивности стремится к импедансу катушки без разрыва. При этом четко выделяются резонансные частоты, которые зависят от параметров катушки индуктивности, места разрыва и номинала образованной емкости.

Описание модели первичного преобразователя с учетом паразитных параметров

Каждая реальная катушка индуктивности обладает паразитными параметрами: электрическими емкостью и сопротивлением, которые можно оценить согласно следующим выражениям [22, 23] (рис. 5):

$$R = \frac{K \cdot \pi \cdot a \cdot n \cdot R_{sh}}{W},$$

$$K = 1 + 0,333 \cdot \left(1 + \frac{S}{W} \right),$$

$$C_3 = 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot D_o + 0,06,$$

где R_{sh} , Ом/□, – сопротивление квадрата пленки; C_3 , пФ, – паразитная межвитковая емкость; S , мкм, – зазор между витками индуктивности; K – поправочный коэффициент, учитывающий сжатие тока в углах проводника.

Результаты моделирования зависимости импеданса катушки индуктивности от частоты (с учетом паразитных параметров), представленные на рис. 6, показали, что из-за паразитных элементов на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) появляется дополнительный резонанс.

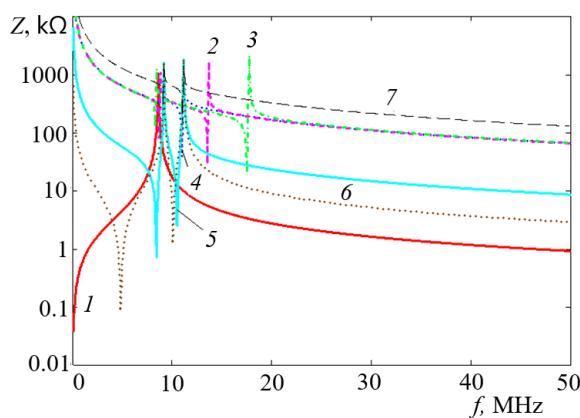


Рис. 6. Зависимости импеданса от частоты (с учетом паразитных параметров) при разных значениях пар параметров (коэффициент k и емкость C_3 , пФ): 0,9, 0,05 (кривая 2); 0,5, 0,05 (3); 0,7, 0,05 (4); 0,7, 0,5 (5); 0,7, 5,0 (6); 0,7, 0,025 (7); кривая 1 соответствует индуктивности без разрыва

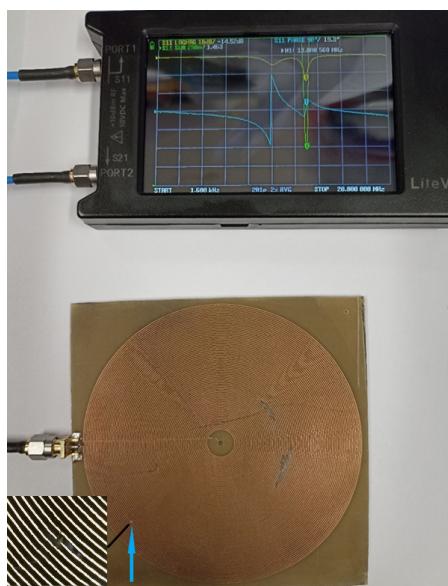


Рис. 7. Фотографии осциллограммы испытаний (сверху) и прототипа датчика (снизу), изготовленного на основе катушки индуктивности (место разрыва указано стрелкой).

На экране видны кривые модуля полного импеданса, фазы импеданса и коэффициента стоячей волны (желтая, голубая и зеленая линии, соответственно). На вставке: увеличенная область катушки с разрывом

экспериментальной зависимости положения пиков первого (Res1) и второго (Res2) резонансов от положения точки разрыва, а также аппроксимация экспериментальных данных степенными функциями. Видно, что характер полученных экспериментальных кривых хорошо согласуется с результатами компьютерного моделирования.

Как оказалось, графики зависимости резонансной частоты f датчика от положений точек разрыва хорошо аппроксимируются функцией вида

$$f = k/N^a,$$

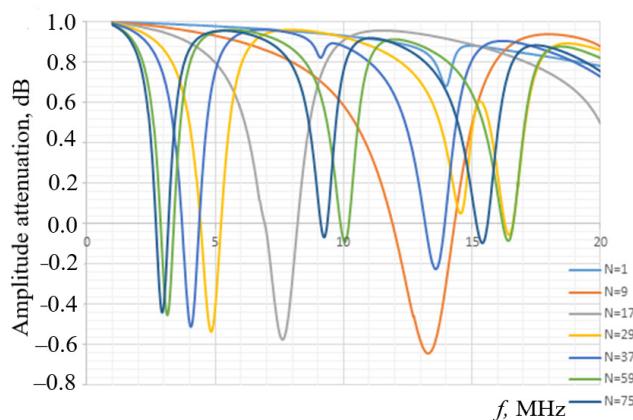


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики пленочной катушки индуктивности для ее разных разорванных витков (N – номер разорванного витка)

Результаты эксперимента

Для проведения испытаний был изготовлен опытный образец круглой катушки индуктивности диаметром 100 мм (рис. 7); здесь же представлена укрупненная фотография разрыва, полученная разрезом скальпеля. Ширина металлического полоска составила около 200 мкм, ширина между полосками – примерно 250 мкм. Для определения амплитудно- и фазочастотных характеристик тонкопленочного датчика использовался векторный анализатор LiteVNA64 с частотным диапазоном 50 кГц – 6,3 ГГц, подключенный к персональному компьютеру, а также программное обеспечение NanoVNA-App, входящее в комплект прибора. Результаты измерений сохранялись в базу данных на ПК, а затем анализировались с помощью программы GNU Octave.

Полученные значения АЧХ пленочной катушки индуктивности при разных значениях разорванного металлического полоска представлены на рис. 8. Нумерация витков начинается с внешнего диаметра катушки, при этом важно отметить наличие множества резонансов. В дальнейшем анализ проводился только для первых двух резонансов.

На рис. 9 приведены графики

пиков первого (Res1) и второго (Res2) резонансов от положения точки разрыва, а также аппроксимация экспериментальных данных степенными функциями. Видно, что характер полученных экспериментальных кривых хорошо согласуется с результатами компьютерного моделирования.

Как оказалось, графики зависимости резонансной частоты f датчика от положений точек разрыва хорошо аппроксимируются функцией вида

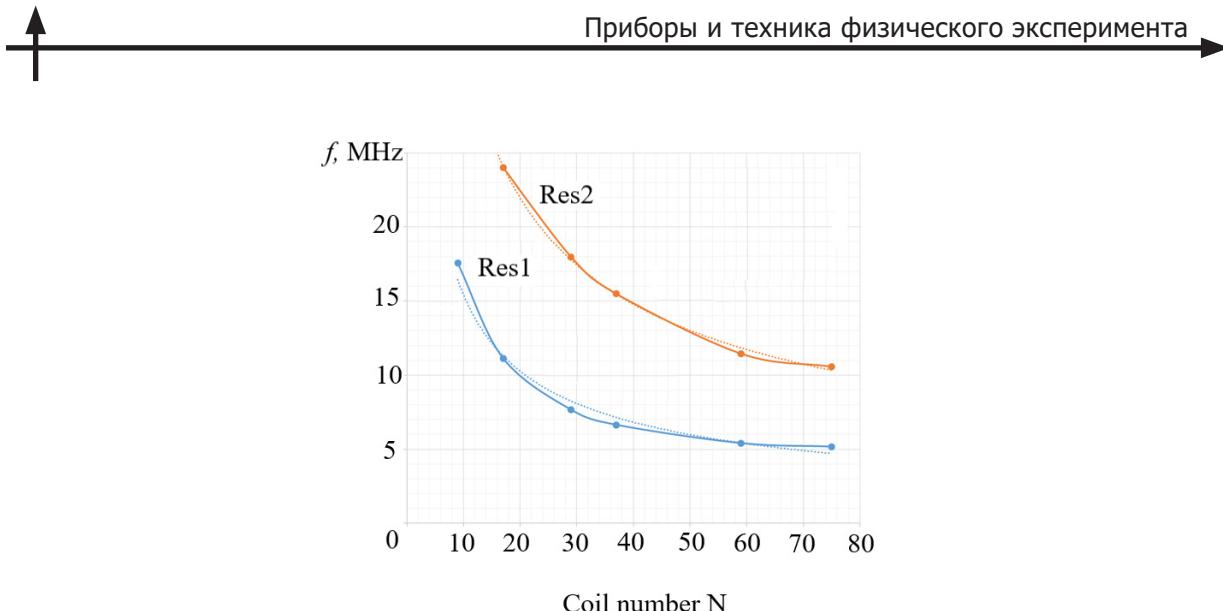


Рис. 9. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (линии) зависимости резонансной частоты датчика от позиций точек разрыва для первого (Res1) и второго (Res2) резонансов

где N – номер витка (нумерация начинается от внешней стороны катушки); k – константа ($k_1 = 59,89$, $k_2 = 121,34$ для первого и второго резонансов, соответственно); α – показатель степени ($\alpha_1 = 0,589$, $\alpha_2 = 0,571$ для первого и второго резонансов, соответственно). При малых значениях N (5 – 15) изменение резонансной частоты достигает 1 МГц на каждый виток, что позволяет с большой точностью определять не только радиальное положение области попадания частицы, но и его сектор (часть длины дуги, когда номер N – не целое число). При больших значениях N (60 – 75) изменение резонансной частоты имеет порядок 20 кГц на виток, что также позволяет определить сектор попадания частицы, однако с меньшей точностью.

Заключение

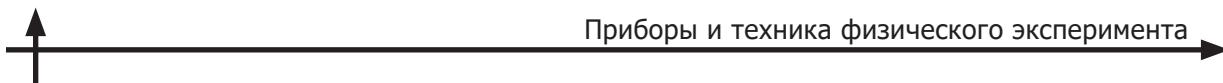
В работе предложено использовать пленочную катушку индуктивности в качестве датчика налетающих высокоскоростных микрочастиц. Подобная конструкция позволяет избежать использования большого количества мультиплексоров, которые обычно применяются в датчиках подобного типа. Представленные результаты компьютерного и лабораторного моделирования данной конструкции показали, что пленочная катушка пригодна для регистрации высокоскоростных микрочастиц размерами от 100 мкм на космических аппаратах типа CubeSat.

Анализ полученных результатов показал, что место разрыва металлического полоска катушки индуктивности можно определять с помощью анализа сдвига резонансной частоты амплитудно-частотной характеристики. При этом надежное определение места разрыва становится возможным, если номер разорванного витка больше 5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivanov N. N., Dobritsa D. B., Yaschenko B. Y. A new way of automated dust control of the external atmosphere of a spacecraft during thermal-vacuum testing // Solar System Research. 2020. Vol. 54. No. 7. Pp. 662–667.
2. Миронов В. В., Толкач М. А. Скорость и распределение скорости метеороидов и частиц космического мусора в околоземном космическом пространстве // Космическая техника и технологии. 2022. № 1 (36). С. 125–143.
3. Durin C., Mandeville J. C., Perrin J. M. Active detection of micrometeoroids and space debris SODAD-2 experiment on SAC-D satellite // Advances in Space Research. 2022. Vol. 69. No. 10. Pp. 3856–3863.
4. Дмитрюк С. В. Космический мусор: прикладные аспекты угрозы // Воздушно-космическая сфера. 2019. № 2 (99). С. 56–59.

5. Шустов Б. М. О фундаментальных исследованиях по проблеме космического мусора // Сборник трудов Всероссийской научной конференции «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы». 17–19 апреля 2019 г. Сер. «Механика, управление и информатика». Под ред. Л. М. Зеленого, Б. М. Шустова. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 7–14.
6. Ипатов А. В., Ведешин Л. А., Герасютин С. А. Мониторинг космического мусора и перспективы освоения околоземного космического пространства // Земля и Вселенная. 2024. № 2 (356). С. 91–108.
7. Adushkin V. V., Kozlov S. I., Aksenov O. Y., Veniaminov S. S., Tyurenkova V. V. The small orbital debris population and its impact on space activities and ecological safety // Acta Astronautica. 2020. Vol. 176. November. Pp. 591–597.
8. Rodmann J., Miller A., Traud M., Bunte K. D., Millinger M. Micrometeoroid impact risk assessment for interplanetary missions // Proceedings of the 8th European Conference on Space Debris (virtual), Darmstadt, Germany, 20–23 April 2021, T. Flohrer, S. Lemmens, F. Schmitz (Eds.), published by the ESA Space Debris Office; May 2021. Pp. 1–5.
9. Агапов В. М., Головко А. М., Емельянов В. А. и др. Космический мусор: В 2 кн. Под науч. ред. Г. Г. Райкунова. Кн.1. Методы наблюдения и модели космического мусора. М.: Физматлит, 2014. 244 с.
10. Новиков Л. С. Основы экологии околоземного космического пространства. М.: Университетская книга, 2006. 84 с.
11. Калаев М. П., Родина А. В., Телегин А. М. Исследование изменения характеристик солнечных батарей при воздействии факторов космического пространства // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 6. С. 99–105.
12. Калаев М. П., Телегин А. М., Воронов К. Е., Лисян Ц., Цзилун Ц. Исследование характеристик оптических стекол при воздействии факторов космического пространства // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 5. С. 803–809.
13. Wang W., Xue W., Wu S., Mu Z., Yi J., Tang A. J. High-speed micro-particle motion monitoring based on continuous single-frame multi-exposure technology // Materials. 2022. Vol. 15. No. 11. P. 3871.
14. Barilaro L., Falsetti C., Olivieri L., Giacomuzzo C., Francesconi A., Beard P., Camilleri R. A conceptual study to characterize properties of space debris from hypervelocity impacts through thin film heat flux gauges// Proceedings of the 2021 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, (MetroAeroSpace-2021). IEEE Inc. 2021. Pp. 430–435.
15. Gola Y., Kim D., Namilae S. Piezoresistive nanocomposites for sensing MMOD impact damage in inflatable space structures // Composites Communications. 2020. Vol. 21. October. P. 100375.
16. Rose R., Koets M., Chocron S., Grimm R. Application of intelligent spacecraft structures for impact detection // Proceedings of the 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). 5 –12 March 2022. Big Sky, MT, USA. 2022. Pp. 1–7.
17. Gbaguidi A., Madiyar F., Kim D., Namilae S. Multifunctional inkjet printed sensors for MMOD impact detection // Smart Materials and Structures. 2020. Vol. 29. No. 8. P. 085052.
18. Hofmann D. C., Bordeenithikasem P., Zhu Y., Liu Y., Conrad N. J., Davis B. A., Christiansen E. L., Shakouri A., Mohammadi S. Design, fabrication, and hypervelocity impact testing of screen-printed flexible micrometeoroid and orbital debris impact sensors for long-duration spacecraft health monitoring // Aerospace Science and Technology. 2023. Vol. 139. August. P. 108372.
19. Faure P., Masuyama Sh., Nakamoto H., Akahoshi Y., Kitazawa Y., Koura T. Space dust impacts detector development for the evaluation of ejecta // Procedia Engineering. 2013. Vol. 58. Pp. 594–600.
20. Семкин Н. Д., Телегин А. М. Ударно-сжатые структуры металл-диэлектрик-металл в условиях воздействия высокоскоростных пылевых частиц // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. № 7. С. 88–93.
21. Телегин А. М. Моделирование коэффициента передачи датчика микрометеороидов и частиц космического мусора // Инженерная физика. 2024. № 4. С. 37–44.
22. Bahl I. J. Lumped elements for RF and microwave circuits. Boston, London: Artech House Microwave Library, 2003. 488 p.
23. Борейко Д. А., Дьяченко Т. С., Тюменцев А. И. Исследование параметров катушек индуктивности, выполненных по LTCC технологии // Техника радиосвязи. 2012. № 17. С. 73–83.

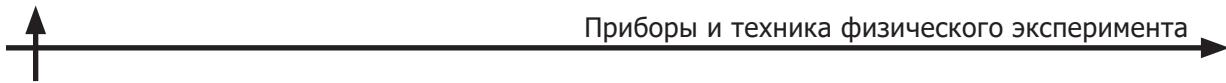


24. **Wheeler H. A.** Simple inductance formulas for radio coils // Proceedings of the Institute of Radio Engineers. 1928. Vol. 16. No. 10. Pp. 1398–1400.
25. **Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А.** Расчет индуктивностей: Справочная книга. 3-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
26. **Benhadda Y., Derkaoui M., Mendaz K., Kharbouch H., Spiter P.** Design for integrated planar spiral inductor for MEMS // Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. 2023. Vol. 67. No. 4. Pp. 425–437.
27. **Hussain I., Woo D.-K.** Simplified mutual inductance calculation of planar spiral coil for wireless power applications // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 4. P. 1537.
28. **Futai N., Futai N., Matsumoto K., Shimoyama I.** A flexible micromachined planar spiral inductor for use as an artificial tactile mechanoreceptor // Sensors and Actuators A: Physical. 2004. Vol. 111. No. 2. Pp. 293–303.
29. **Berthoud L., Mandeville J.-C.** Empirical impact equations and marginal perforation // Proceedings of the First European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany. 5–7 April 1993. ESA SD-01. Pp. 459–464.
30. **Awang Z.** Microwave systems design. Berlin/Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2013. 313 p.
31. **Benedek P., Silvester P.** Equivalent capacitances for microstrip gaps and steps // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1972. Vol. 20. No. 11. Pp. 729–733.
32. **Garg R., Bahl I. J.** Microstrip discontinuities // International Journal of Electronics. 1978. Vol. 45. No. 1. Pp. 81–87.
33. **Qiao Q., Dai Y., Chen Z.** Signal integrity analysis on discontinuous microstrip line // Journal of Physics: Conference Series. 7th International Conference on Applied Electrostatics (ICAES-2012). 2013. Vol. 418. P. 012087.
34. **Clayton R. P.** Analysis of multiconductor transmission lines. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley & Sons, Inc., 2008. 821 p.

REFERENCES

1. **Ivanov N. N., Dobritsa D. B., Yaschenko B. Y.**, A new way of automated dust control of the external atmosphere of a spacecraft during thermal-vacuum testing, Sol. Syst. Res. 54 (7) (2020) 662–667.
2. **Mironov V. V., Tolkach M. A.**, Velocity and distribution on velocity of meteoroids and space debris particles in near-Earth space, Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologii [Space Technology and Engineering]. (1 (36)) (2022) 125–143 (in Russian).
3. **Durin C., Mandeville J. C., Perrin J. M.**, Active detection of micrometeoroids and space debris SODAD-2 experiment on SAC-D satellite, Adv. Space Res. 69 (10) (2022) 3856–3863.
4. **Dmitryuk S. V.**, Space debris threat: Fundamental & practical aspects, Magazine VKS. (2(99)) (2019) 56–59 (in Russian).
5. **Shustov B. M.**, About fundamental research on space debris problem, In book: Proc. of All-Russian Conf. "Space Debris: Fundamental and Practical Aspects of the Threat", Moscow, April 17–19 2019; Ser. "Mechanics, Management, Computer Science", L. M. Zelenyi, B. M. Shustov (Eds.). Space research Institute of the RAS, Moscow (2019) 7–14 (in Russian).
6. **Ipatov A. V., Vedeshin L. A., Gerasyutin S. A.**, Monitoring kosmicheskogo musora i perspektivy osvoeniya okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva [Space debris monitoring and prospects for the exploration of near-Earth space], Zemlya i Vselennaya [The Earth and Universe]. (2 (356)) (2024) 91–108 (in Russian).
7. **Adushkin V. V., Kozlov S. I., Aksenov O. Y., et al.**, The small orbital debris population and its impact on space activities and ecological safety, Acta Astronaut. 176 (Nov) (2020) 591–597.
8. **Rodmann J., Miller A., Traud M., et al.**, Micrometeoroid impact risk assessment for interplanetary missions, Proc. 8th Eur. Conf. on Space Debris (virtual), Darmstadt, Germany, 20–23 April 2021, T. Flohrer, S. Lemmens, F. Schmitz (Eds.), publ. by the ESA Space Debris Office; May (2021) 1–5.
9. **Agapov V. M., Golovko A. V., Emel'yanov V. A., et al.**, Kosmicheskij musor.: V 2 kn. Red. Raykunov G. G., Kn.1. Metody nablyudenija i modeli kosmicheskogo musora [Space debris: In 2 books. Raykunov G. G. (Ed.), Book 1. Methods of observation and models of space debris], FIZmatlit Publishing, Moscow, 2014 (in Russian).

10. **Novikov L. S.**, Osnovy ekologii okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva [Fundamentals of ecology of the near-Earth space], Universitetskaya Kniga [University Book Publishing], 2006 (in Russian).
11. **Kalaev M. P., Rodina A. V., Telegin A. M.**, Investigation of changes in the characteristics of solar panels under the influence of space factors, *Instrum. Exp. Tech.* 65 (6) (2022) 970–975.
12. **Kalaev M. P., Telegin A. M., Voronov K. E., et al.**, Investigation of optical glass characteristics under the influence of space factors, *Computer Optics.* 43 (5) (2019) 803–809 (in Russian).
13. **Wang W., Xue W., Wu S., et al.**, High-speed micro-particle motion monitoring based on continuous single-frame multi-exposure technology, *Materials.* 15 (11) (2022) 3871.
14. **Barilaro L., Falsetti C., Olivieri L., et al.**, A conceptual study to characterize properties of space debris from hypervelocity impacts through thin film heat flux gauges, *Proc. 2021 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace-2021).* IEEE Inc. (2021) 430–435.
15. **Gola Y., Kim D., Namilae S.**, Piezoresistive nanocomposites for sensing MMOD impact damage in inflatable space structures, *Compos. Commun.* 21 (Oct) (2020) 100375.
16. **Rose R., Koets M., Chocron S., Grimm R.**, Application of intelligent spacecraft structures for impact detection, *Proc. 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO).* 5–12 March 2022. Big Sky, MT, USA (2022) 1–7.
17. **Gbaguidi A., Madiyar F., Kim D., Namilae S.**, Multifunctional inkjet printed sensors for MMOD impact detection, *Smart Mater. Struct.* 29 (8) (2020) 085052.
18. **Hofmann D. C., Bordeennithikasem P., Zhu Y., et al.**, Design, fabrication, and hypervelocity impact testing of screen-printed flexible micrometeoroid and orbital debris impact sensors for long-duration spacecraft health monitoring, *Aerospace Sci. Technol.* 139 (Aug) (2023) 108372.
19. **Faure P., Masuyama Sh., Nakamoto H., et al.**, Space dust impacts detector development for the evaluation of ejecta, *Proc. Eng.* 58 (2013) 594–600.
20. **Semkin N. D., Telegin A. M.**, Shock-compressed metal-insulator-metal structures under the action of fast dust particles, *Tech. Phys.* 56 (7) (2011) 986–991.
21. **Telegin A. M.**, Modeling the transmission coefficient of a micrometeoroid and space debris particle sensor, *Eng. Phys.* (4) (2024) 37–44 (in Russian).
22. **Bahl I. J.**, Lumped elements for RF and microwave circuits, Artech House Microwave Library, Boston, London, 2003.
23. **Boreyko D. A., D'yachenko T. S., Tyumentsev A. I.**, Issledovanie parametrov katushek induktivnosti, vypolnennyh po LTCC tekhnologii [Study of the parameters of inductance coils made using LTCC technology], *Tekhnika radiosvyazi* [Radio Commun. Technol.] (17) (2012) 73–83 (in Russian).
24. **Wheeler H. A.**, Simple inductance formulas for radio coils, *Proc. Instit. Radio Eng.* 16 (10) (1928) 1398–1400.
25. **Kalantarov P. L., Tseitlin L. A.**, Raschet induktivnostej: Spravochnaya kniga [Calculation of inductances: Reference book], 3rd edition, Energoatomizdat Publishing. Leningrad, 1986 (in Russian).
26. **Benhadda Y., Derkaoui M., Mendaz K., et al.**, Design for integrated planar spiral inductor for MEMS, *Period. Polytech. Electr. Eng. Comput. Sci.* 67 (4) (2023) 425–437.
27. **Hussain I., Woo D.-K.**, Simplified mutual inductance calculation of planar spiral coil for wireless power applications, *Sensors.* 22 (4) (2022) 1537.
28. **Futai N., Futai N., Matsumoto K., Shimoyama I.**, A flexible micromachined planar spiral inductor for use as an artificial tactile mechanoreceptor, *Sens. Actuators A: Phys.* 111 (2) (2004) 293–303.
29. **Berthoud L., Mandeville J.-C.**, Empirical impact equations and marginal perforation, *Proc. First Eur. Conf. on Space Debris, Darmstadt, Germany.* 5–7 April 1993. ESA SD-01 (1993) 459–464.
30. **Awang Z.**, Microwave systems design, Springer Science & Business Media, Berlin/Heidelberg, 2013.
31. **Benedek P., Silvester P.**, Equivalent capacitances for microstrip gaps and steps, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 20 (11) (1972) 729–733.
32. **Garg R., Bahl I. J.**, Microstrip discontinuities, *Int. J. Electron.* 45 (1) (1978) 81–87.
33. **Qiao Q., Dai Y., Chen Z.**, Signal integrity analysis on discontinuous microstrip line, *J. Phys. Conf. Ser. (ICAES-2012).* 418 (2013) 012087.
34. **Clayton R. P.**, Analysis of multiconductor transmission lines, Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2008.



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТЕЛЕГИН Алексей Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектронных систем Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва, г. Самара, Россия.

443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34

talex85@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1750-1536

КАЛАЕВ Михаил Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных систем Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва, г. Самара, Россия.

443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34

sgau5@yandex.ru

ORCID: 0009-0003-2601-4144

THE AUTHORS

TELEGIN Aleksey M.

Samara National Research University

34 Moscow HWy, Samara, 443086, Russia

talex85@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1750-1536

KALAEV Mikhail P.

Samara National Research University

34 Moscow HWy, Samara, 443086, Russia

sgau5@yandex.ru

ORCID: 0009-0003-2601-4144

*Статья поступила в редакцию 20.01.2025. Одобрена после рецензирования 10.03.2025.
Принята 10.03.2025.*

Received 20.01.2025. Approved after reviewing 10.03.2025. Accepted 10.03.2025.