

УДК 621.3
EDN: ZGZNQM

PACS: 07.05.Dz, 07.55. Jg, 94.80.+g

Исследование модели расчёта наведенного импульса тока в измерительных сетках датчика микрометеороидов и частиц космического мусора

А. М. Телегин, М. П. Калаев, К. Е. Воронов

Выведено аналитическое выражение для наведенного импульса тока, который возбуждается на сеточном электроде при полете заряженной микрочастицы. Полученные данные могут быть использованы для анализа скорости и угла влета микрочастиц в сеточный датчик высокоскоростных микрочастиц.

Ключевые слова: микрометеороиды; космический мусор; теорема Шокли-Рамо; наведенный ток; электрод.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-1-5-10

Введение

Одной из важных задач исследования космического пространства является контроль местоположения и проведение оценки параметров высокоскоростных микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) [1–4]. Для контроля таких частиц микронных размеров используют датчики «In-situ», то есть непосредственно установленные на поверхность космических аппаратов. Примером подобного типа датчиков могут служить измерители вектора скорости высокоскоростных микрочастиц сеточной конструкции [5, 6], принцип действия которых основан на измерении заряда, индуцированного на сеточных

электродах пропорционально скорости и заряду пролетающей рядом заряженной микрочастицы (рис. 1, 2).

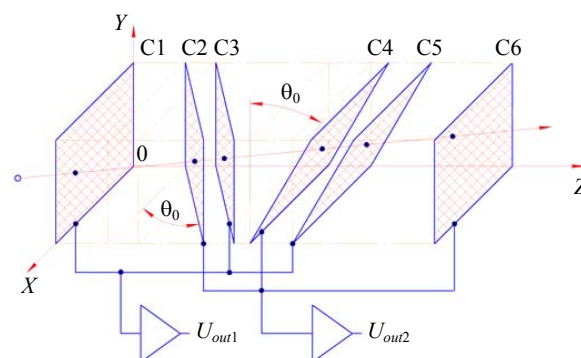


Рис. 1. Структурная схема сеточного датчика

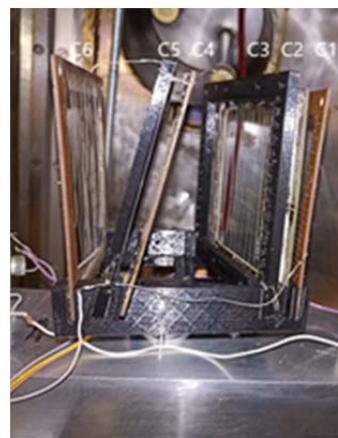


Рис. 2. Фотография датчика сеточной конструкции: C1, C2, C3, C4, C5, C6 – шесть сеток расположенных, согласно рис. 1

Телегин Алексей Михайлович^{1,2}, с.н.с., доцент, к.ф.-м.н.
E-mail: talex85@mail.ru

Калаев Михаил Павлович^{1,2}, с.н.с., доцент, к.т.н.

Воронов Константин Евгеньевич^{1,2}, директор, доцент, к.т.н.

¹ Самарский университет, институт космического приборостроения (ИКП–214).

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

² Самарский университет.

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

Статья поступила в редакцию 30.07.2024

После доработки 6.11.2024

Принята к публикации 1.02.2025

Шифр научной специальности: 1.3.2

Авторами был разработан и исследован прототип датчика сеточной конструкции (рис. 1, 2), который состоит из шести сеточных измерительных электродов, попарно наклоненных под разными углами, для оценки трех проекций вектора скорости ($\vec{V} = \vec{1}_x \cdot Vx + \vec{1}_y \cdot Vy + \vec{1}_z \cdot Vz$, где $\vec{1}_x$ – орт по направлению оси Ox , $\vec{1}_y$ – орт по направлению оси Oy , $\vec{1}_z$ – орт по направлению оси Oz) микрочастицы (рис. 1). При проектировании устройств, основанных на измерение наведенного заряда важно знать форму сигнала с измерительного электрода для построение методики обработки полученных экспериментальных данных [7–9]. В работах [10–12] разработана методика оценки импульса наведенного тока для плоскопараллельного конденсатора, но в разработанном нами прототипе некоторые сетки располагаются непараллельно. В работе рассматривается движение микрочастицы в плоской геометрии при условии, что данная микрочастица не пролетает вблизи краев сеток.

В данной работе стоит задача определить форму наведенного импульса тока измерительных сеток, расположенных непараллельно.

Модель наведенного тока без учета влияния входной измерительной цепи

На рисунке 3 показаны проекции двух плоскостей, расположенных под углом θ_0 друг относительно друга и которые представляют собой первые две сетки датчика, показанного на рисунке 1, 2. Заряженная микрочастица (микрометеороид или частица космического мусора) пролетает первую измерительную сетку в точке $M_0(x_0, 0)$ и вылетает из второй сетки в точке $M_1(x_1, z_1)$. Точка $M(x, z)$ является промежуточным положением микрочастицы в момент времени t .

Наведенный импульс тока на электроде при пролете микрочастицей данного электрода рассчитывается согласно теоремы Рамо-Шокли в стационарном приближении, так как скорость исследуемой микрочастицы во много раз меньше скорости электромагнитной волны [10–13]:

$$i(t) = Q \cdot (\vec{V} \cdot \vec{E}_k), \quad (1)$$

где \vec{E}_k – эффективная (взвешенная) напряженность поля в точке, где находится заряд Q в момент времени t , рассчитанная по схеме: заряд удалён, потенциал электрода, с которого снимается ток, равен 1, потенциал оставшихся электродов равен 0. $(\vec{V} \cdot \vec{E}_k)$ – скалярное произведение вектора скорости и эффективной напряженности.

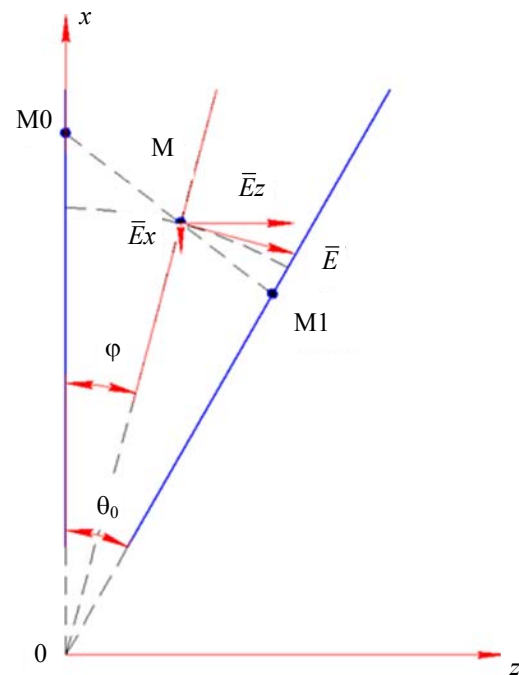


Рис. 3. Взаимное расположение наклонных измерительных сеточных электродов

Напряженность поля непараллельных плоских электродов можно вычислить в полярной системе координат согласно выражению [14]:

$$E = \frac{U}{r \cdot \theta_0}, \quad (2)$$

где U – напряжение на измерительном электроде (в расчетах принимается, что оно равно 1В), r – расстояние от точки 0 до точки M , θ_0 – угол между двумя плоскостями сеточных электродов. Примем, что первая сетка S_1 находится по 0 потенциалом, а сигнал измеряется со второй сетки S_2 .

Координаты микрочастицы в декартовой системе координат определяются согласно выражениям:

$$z = r \cdot \sin(\varphi), \quad x = r \cdot \cos(\varphi), \quad (3)$$

$$x1 = x0 - Vx \cdot t, \quad z1 = Vz \cdot t. \quad (4)$$

Примем, что $tg(\alpha) = \frac{Vx}{Vz}$.

Проекция вектора напряженности E_x, E_z в прямоугольной системе координат вычисляются согласно выражениям:

$$E_x = E \cdot \sin(\varphi), \quad E_z = E \cdot \cos(\varphi),$$

$$tg(\varphi) = \frac{z}{x} = \frac{Vz \cdot t}{x0 - Vx \cdot t} = \frac{t}{x0 / Vz - tg(\alpha) \cdot t}. \quad (5)$$

Наведенный ток же согласно теоремы Шокли-Рамо рассчитывается согласно выражению:

$$\begin{aligned} i &= Q \cdot (\vec{V} \cdot \vec{E}) = Q \cdot (\vec{V}_x \cdot \vec{E}_x + \vec{V}_z \cdot \vec{E}_z) = \\ &= \frac{U \cdot Q}{z \cdot \theta_0} (Vx \cdot \sin^2(\varphi) + Vz \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\varphi)) = \\ &= \frac{U \cdot Q}{\theta_0} \left(\frac{x0 / Vz}{(x0 / Vz - tg(\alpha) \cdot t)^2 + t^2} \right) = \\ &= i(t=0) \cdot \left(\frac{x0^2}{(x0 - tg(\alpha) \cdot t \cdot Vz)^2 + (t \cdot Vz)^2} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $i(t=0) = \frac{U \cdot Q}{\theta_0} \left(\frac{Vz}{x0} \right) = \frac{1 \cdot Q}{\theta_0} \left(\frac{Vz}{x0} \right)$ – ток в момент времени пролета микрочастицей точки М0.

Время пролета второй сетки С2 (в точке М1) определяется путем решения системы уравнения:

$$\begin{cases} x1 = x0 - Vx \cdot t_1, \\ z1 = Vz \cdot t_1, \\ tg(\theta_0) = \frac{z1}{x1}. \end{cases} \quad (7)$$

Решение системы уравнений представленной выше будет иметь вид:

$$t_1 = \frac{x0}{Vz \cdot \left(\frac{1}{tg(\theta_0)} + tg(\alpha) \right)} \quad (8)$$

где t_1 – время пролета микрочастицей второй сетки С2.

Компоненту вектора скорости Vz можно определить путем измерения времени пролета микрочастицей С1 и С6 сеток (рис. 1) [5], а компоненту вектора скорости Vx можно определить согласно выражению:

$$Vx = \frac{x0}{t_1} - \frac{Vz}{tg(\theta_0)}. \quad (9)$$

Тогда наведенный ток в момент времени пролета микрочастицей второй сетки С2 можно рассчитать согласно выражению:

$$\begin{aligned} i(t=t_1) &= \frac{U \cdot Q}{\theta_0} \left(\frac{x0 / Vz}{\left(x0 / Vz - tg(\alpha) \cdot \frac{x0 / Vz}{\left(\frac{1}{tg(\theta_0)} + tg(\alpha) \right)} \right)^2 + \left(\frac{x0 / Vz}{\left(\frac{1}{tg(\theta_0)} + tg(\alpha) \right)} \right)^2} \right) = \\ &= i(t=0) \cdot \left(\frac{(ctg(\theta_0) + tg(\alpha))^2}{ctg^2(\theta_0) + 1} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Угол влета микрочастицы в первую сетку С1 можно определить согласно выражению:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \sqrt{i(t=t_1) \cdot (\operatorname{ctg}^2(\theta_0) + 1) / i(t=0)} - \operatorname{ctg}(\theta_0). \quad (11)$$

При $\alpha = 0$ ($\operatorname{tg}(\alpha) = 0$) получаем выражение для наведенного тока в момент пролета микрочастицей сетки С2:

$$i(t=t_1) = i(t=0) \cdot \left(\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2(\theta_0)} \right) = i(t=0) \cdot \cos^2(\theta_0). \quad (12)$$

Зная заряд Q и скорость V_z микрочастицы можно определить координату x_0 пролета микрочастицей сетки С1:

$$x_0 = \frac{U \cdot Q}{\theta_0} \left(\frac{V_z}{i(t=0)} \right). \quad (13)$$

Модель наведенного тока с учетом влияния входной измерительной цепи

В реальных датчиках высокоскоростных микрочастиц необходимо учитывать параметры входной измерительной цепи, например, входную емкость и сопротивление усилителя и паразитную индуктивность проводов [12]. Для этого необходимо решить дифференциальное уравнение, составленное согласно радиотехнической модели (рис.4) [10, 15]:

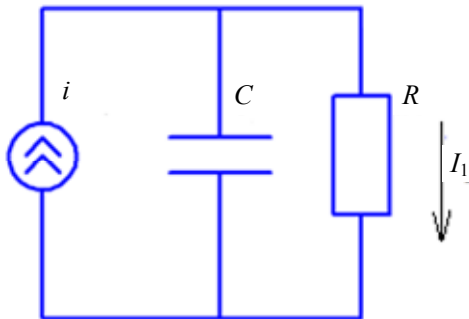


Рис. 4. Радиотехническая модель входной цепи: C – входная емкость; R – входное сопротивление

Выражение, описывающее ток I_1 , протекающий через входной сопротивление, опре-

деляется путем решения дифференциального уравнения [10, 12]:

$$C \cdot R \cdot \frac{dI_1}{dt} + I_1 = i. \quad (14)$$

Для того, чтобы упростить аналитическое решение данного дифференциального уравнения разложим выражения для наведенного тока в ряд Тейлора, при этом ограничимся тремя первыми членами ряда (погрешность такой аппроксимации не превысит 0,5 %):

$$i = i(t=0) \times \left(1 + \frac{2 \cdot V_x}{x_0} \cdot t + \left(3 \cdot \left(\frac{V_x}{x_0} \right)^2 - \left(\frac{V_z}{x_0} \right)^2 \right) \cdot t^2 \right) = i(t=0) \cdot (1 + A_1 \cdot t + A_2 \cdot t^2), \quad (15)$$

$$\text{где } A_1 = \frac{2 \cdot V_x}{x_0}, \quad A_2 = \left(3 \cdot \left(\frac{V_x}{x_0} \right)^2 - \left(\frac{V_z}{x_0} \right)^2 \right).$$

При решении дифференциального уравнения учтем, что в начальный момент времени, когда микрочастица пролетает первую сетку С1, $I_1(t=0) = 0$. Тогда получим следующее выражение для тока, протекающего через резистор:

$$I_1 = i(t=0) \times \left[\left(1 - A_1 \cdot \tau + 2 \cdot A_2 \cdot \tau^2 \right) \cdot \left(1 - e^{-t/\tau} \right) + \left(A_1 - 2 \cdot \tau \cdot A_2 \right) \cdot t + A_2 \cdot t^2 \right], \quad (16)$$

где $\tau = R \cdot C$ – постоянная времени входной цепи.

При $\tau \rightarrow 0$ выражение переходит в выражение без учета влияния входных цепей. Представленное выражение тоже может быть разложено в ряд Тейлора, но только при $t/\tau \ll 1$ иначе количество членов ряда будет достаточно велико.

На рис. 5, 6 показаны графики зависимости изменения тока во времени. Для удобства анализа график удобно строить в координатах нормированной функций тока и времени:

$$I_{NORM1} = I_1 / i(t=0) = \left[\left(1 - A_1 \cdot \tau + 2 \cdot A_2 \cdot \tau^2 \right) \cdot \left(1 - e^{-t/\tau} \right) + \left(A_1 - 2 \cdot \tau \cdot A_2 \right) \cdot t + A_2 \cdot t^2 \right], \quad (17)$$

$$t_{norm} = t / t_1. \quad (18)$$

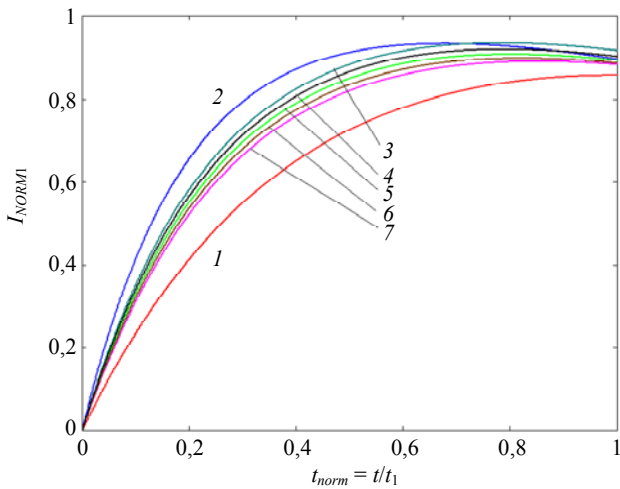


Рис. 5. График нормированного импульса тока в промежутке между первой и второй сеткой при $V_z = 1000$ м/с, $\tau = 10^{-5}$ с: 1 – $x_0 = 0,1$ м, $\alpha = 0$; 2 – $x_0 = 0,2$ м, $\alpha = 0$; 3 – $x_0 = 0,15$ м, $\alpha = -10^\circ$; 4 – $x_0 = 0,15$ м, $\alpha = -5^\circ$; 5 – $x_0 = 0,15$ м, $\alpha = 0^\circ$; 6 – $x_0 = 0,15$ м, $\alpha = 5^\circ$; 7 – $x_0 = 0,15$ м, $\alpha = 10^\circ$

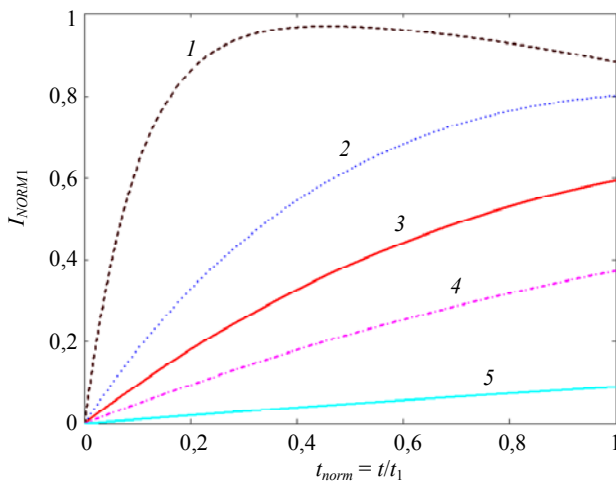


Рис. 6. График нормированного импульса тока в промежутке между первой и второй сеткой при $x_0 = 0,15$ м, $\alpha = 0^\circ$, $V_z = 1000$ м/с: 1 – $t_1/\tau = 10$; 2 – $t_1/\tau = 2$; 3 – $t_1/\tau = 1$; 4 – $t_1/\tau = 0,5$; 5 – $t_1/\tau = 0,1$

Заключение

Предложена аналитическая модель, описывающая наведенный ток при непараллельном расположении измерительных сеток для датчика измерения вектора скорости микрометеороидов и частиц космического мусора. При достаточно большой постоянной времени входной цепи наблюдается уменьшение ам-

плитуда тока в входной цепи, что может привести к снижению чувствительности датчика при измерении быстрых микрочастиц. При измерении же медленных микрочастиц наблюдается снижение амплитуда тока за счет токов разряда входной емкости. При этом было отмечено угол влета микрочастицы в первую сетку влияет на форму измеряемого сигнала. Полученные данные могут быть использованы при выборе геометрических размеров реального датчика высокоскоростных микрочастиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang W., Xue W., Wu S., Mu Z., Yi J., Tang A. J. / Materials. 2022. Vol. 15. № 3871.
2. Батанов А. Ф., Хаханов Ю. А. / Идеи К.Э. Циолковского в теориях освоения космоса: Материалы 58-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского, Калуга, 19–21 сентября 2023 года. – Калуга: ИП Стрельцов И. А., 2023. С. 109–112.
3. Вениаминов С. С., Червонов А. М. Космический мусор – угроза человечеству. – М.: ИКИ РАН, 2012.
4. Усовик И. В., Морозов А. А. / Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 4. С. 202–209.
5. Телегин А. М., Воронов К. Е., Шестаков Д. А. / Инженерная физика. 2024. № 1. С. 49–57.
6. Auer S. / Rev. Sci. Instrum. 1975. Vol. 46. № 2. P. 127–135.
7. Thomas E., Auer S., Drake K., Horányi M., Mun-sat T., Shu A. / Planetary and Space Science. 2013. Vol. 89. P. 71–76.
8. Сухачев К. И., Телегин А. М., Григорьев Д. П., Шестаков Д. А., Дорофеев А. С. / Приборы и техника эксперимента. 2023. № 2. С. 46–51.
9. Телегин А. М. / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11. № 6. С. 540–552.
10. Герштейн Г. М. Моделирование полей методом электростатической индукции: (Наведенного тока). – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970.
11. Иновенков А. Н., Константинов О. В., Пирогов В. И. / ЖТФ. 1993. Т. 63. № 9. С. 1–5.
12. Поклонский Н. А., Вырко С. А., Кочерженко А. А. / ЖТФ. 2004. Т. 74. № 11. С. 75–78.
13. Shockley W. / Journal of Applied Physics. 1938. Vol. 9. № 10. P. 635–636.
14. Jones T. B., Bliss G. W. / Journal of Applied Physics. 1977. Vol. 48. № 4. P. 1412–1417.
15. Сёмкин Н. Д., Телегин А. М. / Измерительная техника. 2016. № 12. С. 45–48.

Study of a model for calculating an induced current pulse in the measuring grids of a sensor for micrometeoroids and space debris particles

A. M. Telegin^{1,2}, M. P. Kalaev^{1,2} and K. E. Voronov^{1,2}

¹ Institute of Space Instrumentation (IKP–214)
34a Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia
E-mail: talex85@mail.ru

² Samara University
34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia

Received 30.07.2024; revised 6.11.2024; accepted 1.02.2025

The article discusses the derivation of the analytical expression for the induced current pulse, which is excited on the grid electrode during the flight of a charged microparticle. The data obtained can be used to analyze the speed and angle of entry of microparticles into the grid sensor of high-speed microparticles.

Keywords: micrometeoroids; space debris; Shockley-Ramo theorem; induced current; electrode.

REFERENCES

1. Wang W., Xue W., Wu S., Mu Z., Yi J. and Tang A. J., *Materials* **15** (3871), (2022).
2. Batanov A. F. and Khakhanov Yu. A. Ideas K.E. Tsiolkovsky in theories of space exploration: Materials of the 58th Scientific Readings dedicated to the development of the scientific heritage and the development of ideas of K. E. Tsiolkovsky, Kaluga, September 19–21, 2023. Kaluga: IP Streltsov I.A., 2023, pp. 109–112 [in Russian].
3. Veniaminov S. S. and Chervonov A. M., Space debris is a threat to humanity, Moscow, IKI RAS, 2012 [in Russian].
4. Usovik I. V. and Morozov A. A., *Bulletin of the Moscow Aviation Institute* **30** (4), 202–209 (2023) [in Russian].
5. Telegin A. M., Voronov K. E. and Shestakov D. A., *Engineering physics*, № 1, 49–57 (2024) [in Russian].
6. Auer S., *Rev. Sci. Instrum.* **46** (2), 127–135 (1975).
7. Thomas E., Auer S., Drake K., Horányi M., Munsat T. and Shu A., *Planetary and Space Science* **89**, 71–76 (2013).
8. Sukhachev K. I., Telegin A. M., Grigoriev D. P., Shestakov D. A. and Dorofeev A. S., *Instruments and Experimental Techniques* **66** (2), 228–233 (2023).
9. Telegin A. M., *Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **11** (6), 540–552 (2023) [in Russian].
10. Gershtein G. M. Modeling of fields by the method of electrostatic induction: (Induced current). The science. Ch. ed. physics and mathematics lit., 1970.
11. Inovenkov A. N., Konstantinov O. V. and Pirogov V. I., *ZhTF* **63** (9), 1–5 (1993).
12. Poklonsky N. A., Vyrko S. A. and Kocherzhenko A. A., *ZhTF* **74** (11), 75–78 (2004).
13. Shockley W., *Journal of Applied Physics* **9** (10), 635–636 (1938).
14. Jones T. B. and Bliss G. W., *Journal of Applied Physics* **48** (4), 1412–1417 (1977).
15. Semkin N. D. and Telegin A. M., *Measurement Techniques* **59** (12), 1304–1309 (2017).