

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 621.384.62

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТОЧНОГО
ДАТЧИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ
МИКРОМЕТЕОРОИДОВ И ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА**

© 2024 г. М. П. Калаев^а, А. М. Телегин^{а,*}, К. Е. Воронов^а

^аСамарский национальный исследовательский университет

им. академика С.П. Королева

Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34

**e-mail: talex85@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.04.2024 г.

После доработки 24.06.2024 г.

Принята к публикации 08.07.2024 г.

Приведено описание прототипа датчика для измерения вектора скорости микрометеороидов и частиц космического мусора на основе сеточных металлических электродов. Представлены результаты экспериментального исследования и предложения по дальнейшей модификации системы измерения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Микрочастицы (космический мусор и микрометеороиды) в космическом пространстве заряжаются до некоторого электрического потенциала [1, 2]. Для измерения скорости $\mathbf{V} = \{V_x, V_y, V_z\}$ этих микрочастиц в основном используется явление наведения тока заряженным движущимся телом при пролете через измерительные металлические электроды (сетки) [2–8]. По вектору скорости этих микрочастиц можно оценить их кинетическую энергию, а также направления прилета в датчик, что позволяет предсказать источник их происхождения [9–11]. Помимо индукционных способов измерения вектора скорости, существуют также оптические методы измерения, но, к сожалению, с точки зрения конструктивной реализации, они обладают рядом недостатков, таких как паразитная засветка, невозможность определения заряда микрочастиц и т.д. [12–14].

2. ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА ИЗМЕРЕНИЯ СЕТОЧНОГО ДАТЧИКА

На рис. 1 показана структурная схема измерителя вектора скорости, где позициями 1–6 отмечены измерительные металлические сетки, подключенные к двум разным усилителям. Высокоскоростная заряженная микрочастица, пролетая через данные сетки по траектории 7, наводит на каждую сетку импульс тока, форма которого близка к колоколообразной и параметры которого пропорциональны скорости и заряду этой микрочастицы [9, 11]. Пик сигналов с сеток соответствует моменту пролета частицы через сетку, что позволяет фиксировать момент пролета. Сетки 1 и 6 расположены в плоскостях, параллельных плоскости XOY . Сетки 2 и 3 параллельны друг другу, расположены под некоторым углом A к плоскости XOY и перпендикулярны плоскости XOZ . Сетки 4 и 5 параллельны друг другу, расположены под некоторым углом B к плоскости XOZ и перпендикулярны плоскости XOY [9]. В рассматриваемой конструкции углы A и B равны 15° .

Рис. 1. Структурная схема датчика измерения вектора скорости микрочастиц: 1–6 – сеточные электроды; 7 – траектория движения микрочастиц; 8, 9 – усилители.

Обозначим через n номер сетки, t_n – время пролета заряженной частицей n -й сетки, x_n, y_n, z_n – точку пролета заряженной частицей n -й сетки (на рис. 1 обозначена жирной точкой), z_{n1} – точку пересечения n -й сеткой оси OZ . Тогда компоненты вектора скорости микрочастицы можно определить согласно формулам

$$V_z = (z_6 - z_1) / (t_6 - t_1),$$

$$V_x = (x_3 - x_2) / (t_3 - t_2) = \text{ctg}(A) (V_z(t_3 - t_2) + (z_{31} - z_{21})) / (t_3 - t_2),$$

$$V_y = (y_5 - y_4) / (t_5 - t_4) = \text{ctg}(B) (V_z(t_5 - t_4) + (z_{51} - z_{41})) / (t_5 - t_4).$$

В большинстве случаев необходимо знать не все три координаты вектора скорости, а только модуль вектора скорости и его наклон к плоскости мишени, в которую ударяет высокоскоростная микрочастица. Предполагая, что плоскость мишень параллельна плоскости XOY , получим следующие выражения:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

– модуль вектора скорости,

$$\gamma = \arccos\left(\frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}}\right)$$

– угол наклона к плоскости мишени.

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2 показано размещение разработанного прототипа датчика в вакуумной камере ускорителя микрочастиц, принцип действия которого подробно рассмотрен в работах [10, 15].

Рис. 2. Фотографии прототипа датчика вектора скорости микрочастиц, установленного в вакуумной камере ускорителя: **а** – вид сзади, **б** – вид сбоку.

Структурная схема стенда для проведения эксперимента с датчиком микрочастиц показана на рис. 3.

Рис. 3. Структурная схема стенда для калибровки датчика вектора скорости:

Основание прототипа датчика изготовлено с использованием 3D-принтера методом FDM-печати из ABS-пластика. Габариты макета составляют $100 \times 100 \times 100$ мм³, размеры чувствительного окна 80×80 мм². При изготовлении рамок сеток испытаны две технологии: 3D-печать и фрезерование фольгированного стеклотекстолита на ЧПУ-станке. Использование 3D-печати позволяет ускорить процесс создания прототипа и получить рамки с минимальной паразитной емкостью, однако в дальнейшем пластик непригоден для создания бортовой аппаратуры из-за низкой стойкости к факторам космического пространства. В качестве материала струн сетки использована проволока из нихрома толщиной 30 мкм, расстояние между струнами 5 мм. Нихром выбран по причине высокой механической прочности при малой толщине струны, несмотря на его относительно высокое удельное сопротивление [10]. Предварительные эксперименты показали, что применение других проводников, таких как медь, практически не влияет на форму и амплитуду наведенных сигналов.

В результате эксперимента фиксировались временные интервалы пролета шести сеток и двух колец Фарадея [15]. Изменение угла влета микрочастицы в датчик проводилось путем вращения самого датчика относительно оси тракта ускорителя, совпадающей с осью колец Фарадея. В качестве поворотного устройства был использован шаговый двигатель с встроенным редуктором 28-ВУJ48. Двигатель имеет 64 шага на оборот, что в совокупности с редуктором $1/63.68395$ позволяет поворачивать выходной ротор с шагом около 0.087° . Поскольку при первичных испытаниях прототипа датчика такие малые углы поворота не требовались, осуществлялся поворот с шагом 6° в диапазоне углов от -42° до $+42^\circ$ (относительно оси ускорителя). Работой шагового двигателя управляли микроконтроллер (МК) и драйвер шагового двигателя (ДШД), расположенные снаружи вакуумной камеры, а команды на микроконтроллер подавались с ЭВМ через модуль гальванической развязки (ГР).

В схеме использованы два усилителя, U_1 и U_2 , электрическая принципиальная схема которых представлена на рис. 4 [16]. Кольцо Фарадея K_1 соединено с сетками C_1, C_3, C_5 и подключено ко входу усилителя U_1 . Кольцо Фарадея K_2 соединено с сетками C_2, C_4, C_6 и подключено ко входу усилителя U_2 . Такая схема включения позволяет сократить количество каналов аналоговой записи с восьми до двух, что упрощает запись и последующую обработку сигналов во время испытаний макета датчика. В момент пролета частицы через любую из сеток соседние сетки выполняют функцию экранирующих сеток, поскольку они подключены ко входу другого усилителя, включенного по схеме с “виртуальной землей” на входе. Такой подход позволяет повысить крутизну пролетных импульсов без использования дополнительной группы разделительных заземленных сеток, что повышает коэффициент “прозрачности” датчика, который составил для данного прототипа 97%. В качестве частиц использовался порошок олова с размером частиц 1–2 мкм. При напряжении на линейной части ускорителя 100 кВ скорости частиц составили 100–900 м/с. В ходе дальнейших экспериментов после оптимизации конструкции датчика и схемы усилителей планируется провести испытания при более высоких скоростях.

Рис. 4. Принципиальная схема зарядочувствительного усилителя.

Каждый из усилителей состоит из трех каскадов (рис. 4). Преобразование заряда в напряжение осуществляется с помощью первого каскада, выполненного на микросхеме ОРА656 (DA_1). Напряжение на выходе первого каскада определяется выражением

$$U = -Q/C_1,$$

где Q – заряд микрочастицы, $C_1 = 10$ пФ – емкость в цепи обратной связи первого операционного усилителя.

Второй каскад, выполненный на операционном усилителе AD8005 (DA_2), является инвертирующим усилителем напряжения с коэффициентом усиления, равным 39. Конденсатор C_4 совместно с резистором R_2 образуют фильтр высоких частот с частотой среза около 100 Гц, что позволяет ослабить влияние помех от электрической сети 50 Гц в лабораторных условиях.

Третий каскад представляет собой неинвертирующий усилитель, выполненный на микросхеме ОРА820 (DA_3). Данный каскад предназначен для обеспечения работы усилителя, подключенного к осциллографу, на длинную коаксиальную линию.

В качестве записывающей аппаратуры был использован четырехканальный осциллограф Rigol MSO5104 с максимальной частотой дискретизации 6 GSPS. Питание

осциллографа осуществляется через блок гальванической развязки по цепи питания 220 В, чтобы исключить проникание помех с частотой сети 50 Гц через кабели усилителей в вакуумную камеру. Во время эксперимента осциллограф находится в ждущем режиме с запуском записи по превышению заданного порогового уровня. Запись проводилась одновременно по двум каналам с частотой дискретизации 1 GSPS и глубиной записи 10 миллионов выборок по каждому каналу. Записанный пакет передавался в компьютер через кабель по протоколу Ethernet для последующей обработки в ЭВМ.

На рис. 5 представлены результаты записанных пролетных импульсов с колец Фарадея (K_1, K_2) и сеток C_1 – C_6 .

Рис. 5. Примеры осциллограмм наведенных импульсов:

На рис. 6, 7 показаны погрешности измерения модуля скорости микрочастиц и угла их влета в датчик. В процессе проведения эксперимента минимально измеренный заряд имел величину 10^{-14} Кл.

Рис. 6. Погрешность измерения модуля скорости в зависимости от угла влета микрочастицы δ_V .

Рис. 7. Погрешность измерения угла в зависимости от угла влета микрочастицы δ_α .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Представленный прототип датчика представляет собой модульную конструкцию, что позволяет быстро производить модификацию расположения сеток и проводить измерения модуля вектора скорости и угла влета микрочастиц. Подключение нескольких сеток на вход одного усилителя неизбежно ухудшает отношение сигнал/шум системы, а также снижает быстродействие за счет увеличения входной емкости. В дальнейшем планируются оптимизация конструкции датчик, разработка и изготовление многоканальной системы регистрации данных (с отдельными каналами записи для каждой сетки), которую можно будет разместить в непосредственной близости от датчика (внутри вакуумной камеры).

Результаты проведенных исследований показали, что при больших углах влета микрочастицы в датчик увеличивается число потерь микрочастиц за счет удара их в измерительные сетки. Этого можно избежать, если увеличивать прозрачность сеток.

Погрешность проведенных измерений, скорее всего, связана с погрешностью изготовления и крепления сеток (порядка 0.5 мм). Погрешность измерения увеличивается

при увеличении угла падения микрочастицы, что, скорее всего, связано с большой погрешностью измерения V_x и V_y , вызванной малыми расстояниями между сетками C_2 и C_3 , C_4 и C_5 . Дополнительно проводить измерение скорости микрочастиц можно путем анализа формы наведенного импульса, так как, согласно рис. 5а,б, вид наведенного импульса зависит от угла влета микрочастицы. У такого метода, скорее всего, погрешность будет больше, чем у метода измерения временных отсчетов, что связано с неточностью оценки амплитуды импульсов и с влиянием внутренних и внешних шумов [8, 17]. С другой стороны, комбинация этих двух способов в дальнейшем позволит сократить количество измерительных сеток, а значит, уменьшатся масса и габариты датчика, что важно для применения на космических аппаратах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов В.В., Толкач М.А.// Космическая техника и технологии. 2022. № 1(36). С.125. <https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2022-1-125-143>.
2. Auer S., Grün E., Kempf S., Srama R., Srowig A., Sternovsky Z., Tschernjawski V. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. Art.№084501. <https://doi.org/10.1063/1.2960566>.
3. Xie J., Sternovsky Z., Auerd S., Drake K., Grün E., Horanyi M., Le H., Srama R. // Planetary and Space Science. 2013. V. 89. P. 63. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.01.004>.
4. Auer S. // Optica Acta. 1982. V. 29. № 10. P. 1421. <https://doi.org/10.1080/713820766>
5. Auer S. // Rev. Sci. Instrum. 1975. V. 46. № 2. P. 127. <https://doi.org/10.1063/1.1134155>.
6. Horányi M. // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1996. V. 34. P. 383. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.34.1.383>.
7. Auer S., Grün E., Srama R., Kempf S., Auera R.// Planetary and Space Science. 2002. V. 50. P. 773. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(02\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(02)00019-3).
8. Li Y., Kempf S., Simolka J., Strack H., Grün E, Srama R. // Advances in Space Research. 2017. V. 59. P. 1636. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.12.037>
9. Телегин А.М., Воронов К.Е., Шестаков Д.А.// Инженерная физика. 2024. № 1. С. 49. <https://doi.org/10.25791/infizik.1.2024.1381>.
10. Воронов К.Е., Пияков И.В., Калаев М.П., Телегин А.М.// ПТЭ. 2023. № 6. С. 135. <https://doi.org/10.1134/S0020441223040176>.
11. Поклонский Н.А., Вырко С.А., Кочерженко А.А.// ЖТФ. 2004. Т. 74. № 11. С. 75.
12. Калаев М.П., Родина А.В., Телегин А.М., Исмаилова Е.В. // ПТЭ. 2023. № 6. С. 142. <https://doi.org/10.1134/S0020441223060027>.

13. Wang W., Xue W., Wu S., Mu Z., Yi J., Tang A.J. // *Materials*. 2022. V. 15. P. 3871.
<https://doi.org/10.3390/ma15113871>.
14. Weiner I., Rust M., Donnelly T.D. // *Am. J. Phys* 2001. V. 69. P. 129.
<https://doi.org/10.1119/1.1311785>
15. Пияков А.В., Телегин А.М. // ПТЭ. 2022. № 4. С. 106.
<https://doi.org/10.31857/S0032816222040243>.
16. Thomas E., Simolka J., DeLuca M., Horányi M., Janches D., Marshall R.A., Munsat T., Plane J.M.C., Sternovsky Z. // *Rev. Sci. Instrum.* 2017. V. 88. P. 034501.
<https://doi.org/10.1063/1.4977832>.
17. Воронов К.Е., Телегин А.М., Сухачев К.И., Калаев М.П.// УПФ. 2020. Т. 8. № 6. С. 411.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Структурная схема датчика измерения вектора скорости микрочастиц: 1–6 – сеточные электроды; 7 – траектория движения микрочастиц; 8, 9 – усилители.

Рис. 2. Фотографии прототипа датчика вектора скорости микрочастиц, установленного в вакуумной камере ускорителя: **а** – вид сзади, **б** – вид сбоку.

Рис. 3. Структурная схема стенда для калибровки датчика вектора скорости: C_1 – C_6 – металлические сетки; K_1 , K_2 – кольца Фарадея, U_1 , U_2 – усилители; ИПУ – источник питания усилителей; M – шаговый двигатель; $ГР$ – гальваническая развязка цифрового интерфейса; $МК$ – микроконтроллер; $ДШД$ – драйвер шагового двигателя; $ОСЦ$ – цифровой осциллограф; $ГРО$ – гальванически развязанный источник питания осциллографа.

Рис. 4. Принципиальная схема зарядочувствительного усилителя.

Рис. 5. Примеры осциллограмм наведенных импульсов: **а** – ось датчика расположена под нулевым углом относительно оси тракта ускорителя; **б** – ось датчика расположена под углом 25° относительно оси тракта ускорителя; **в** – осциллограмма, демонстрирующая удар микрочастиц в сетку C_1 .

Рис. 6. Погрешность измерения модуля скорости в зависимости от угла влета микрочастицы δ_v .

Рис. 7. Погрешность измерения угла в зависимости от угла влета микрочастицы δ_α .

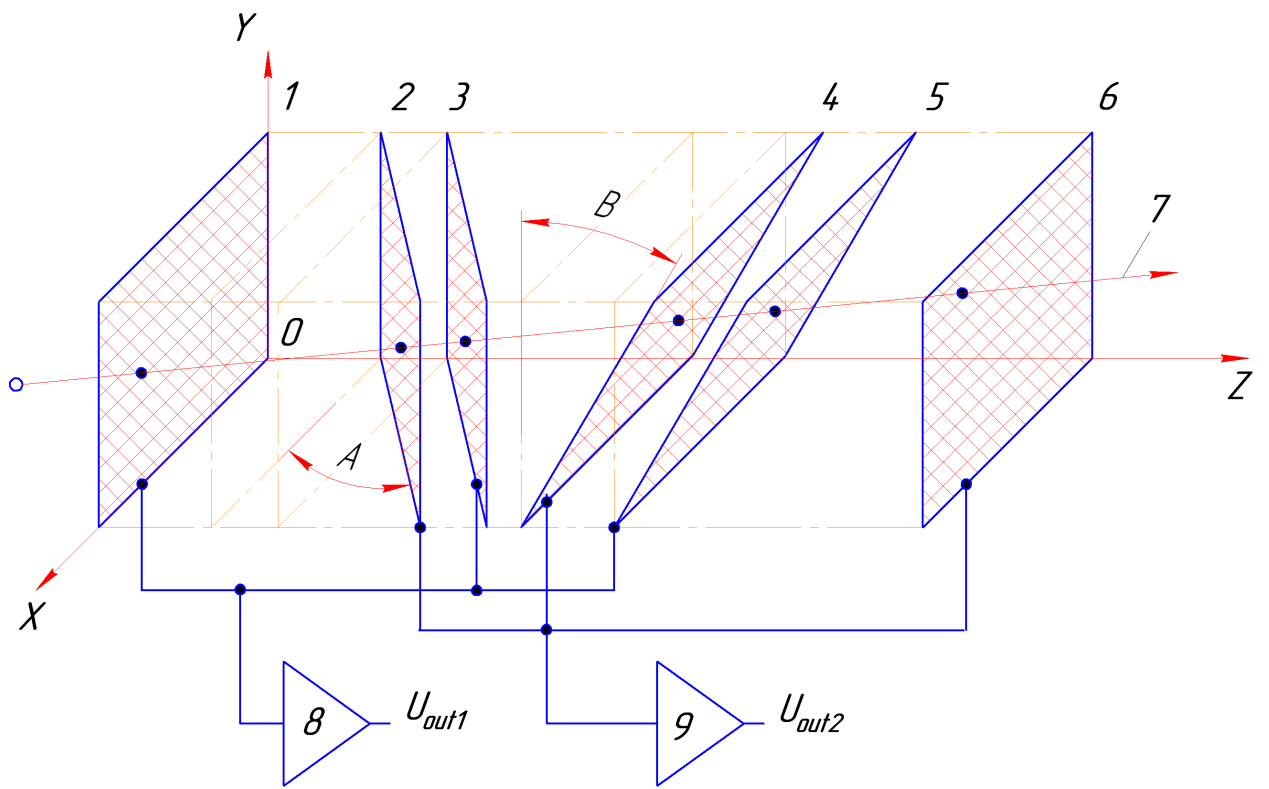


Рис. 1.

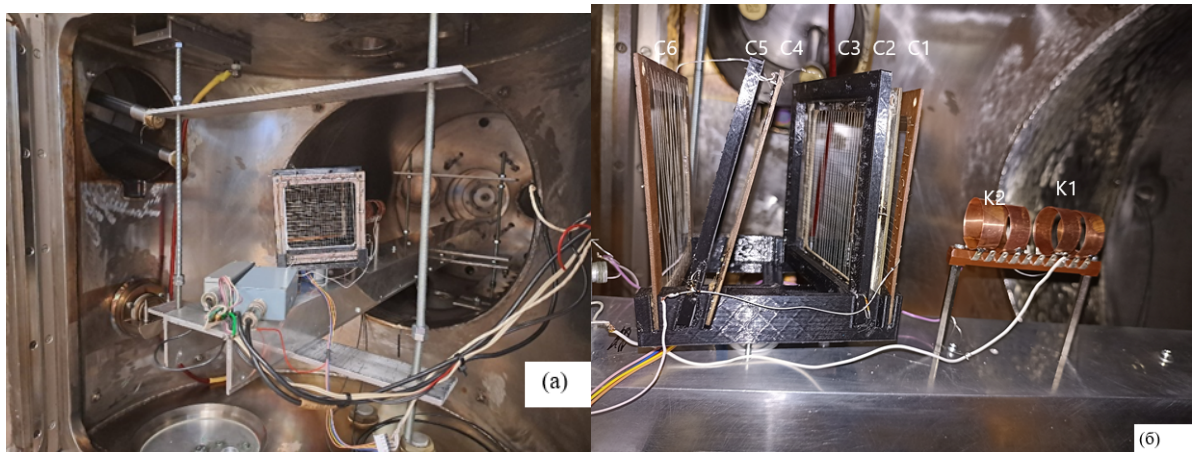


Рис. 2.

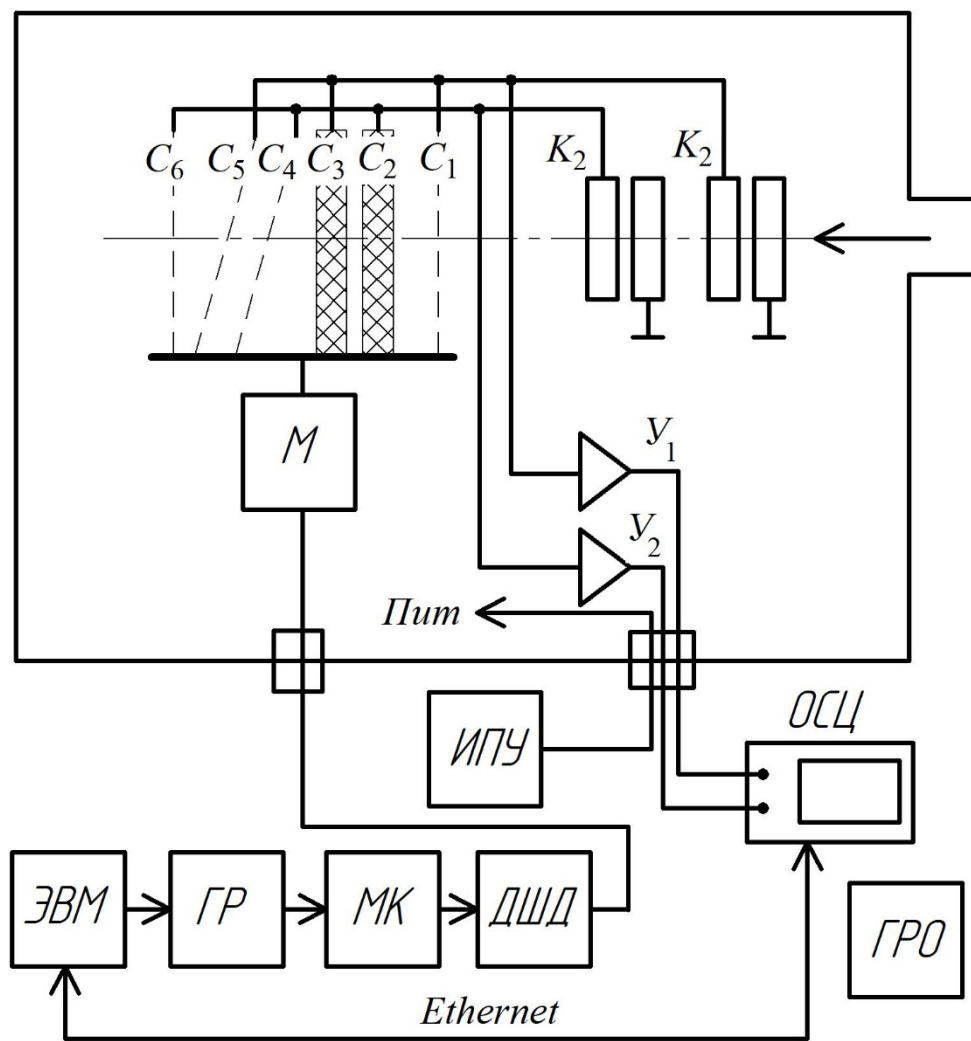


Рис. 3.

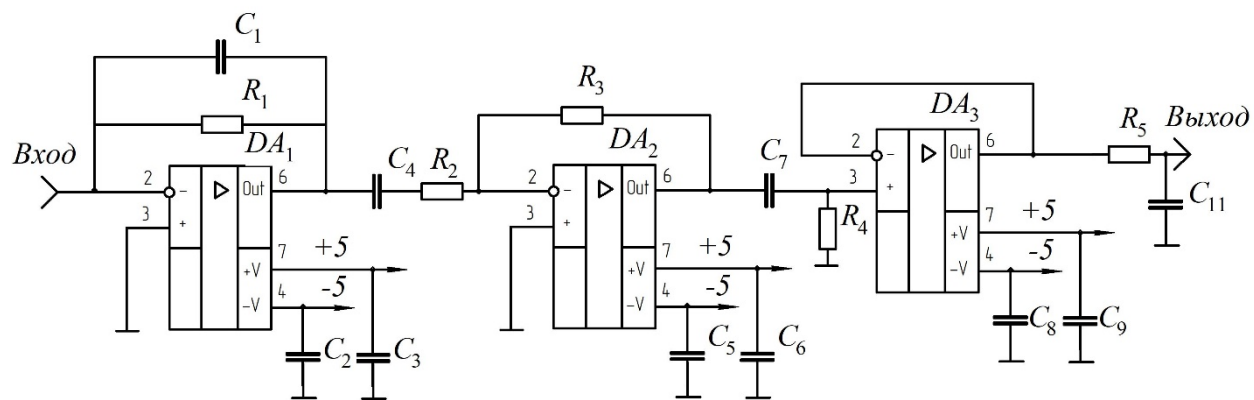
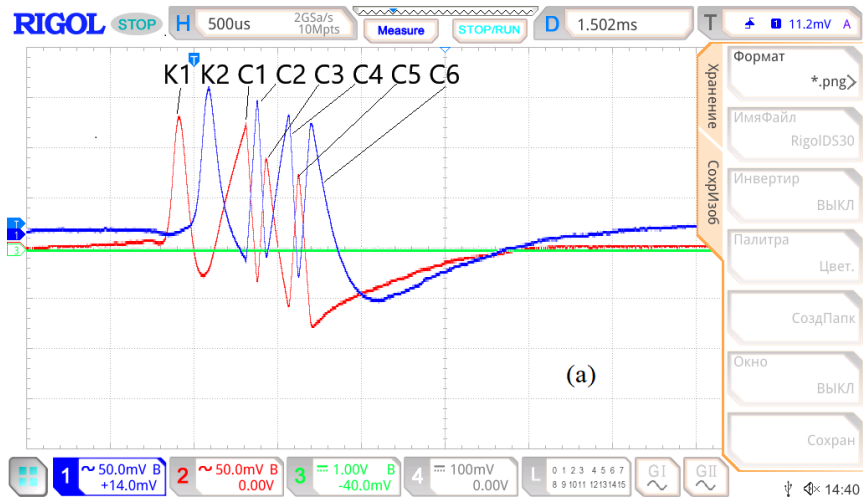
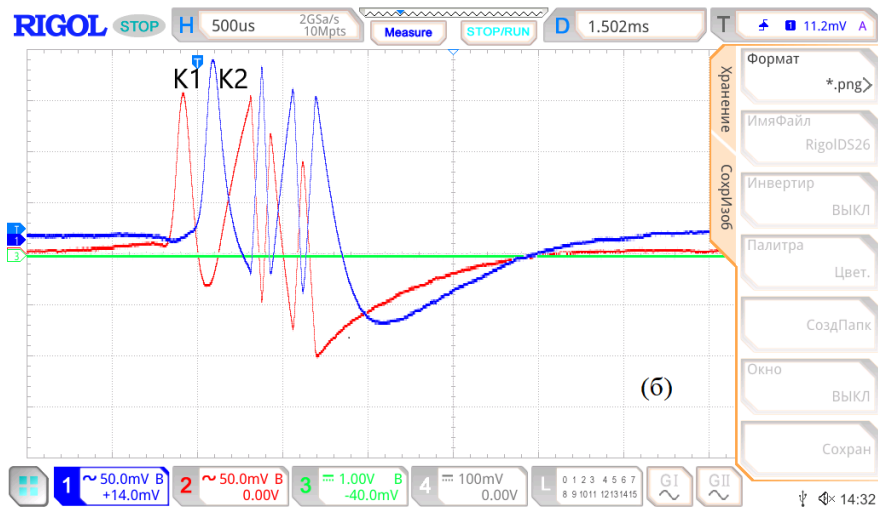


Рис. 4.

MSO5104 Thu March 28 14:40:24 2024



MSO5104 Thu March 28 14:32:43 2024



MSO5104 Thu March 28 17:00:13 2024

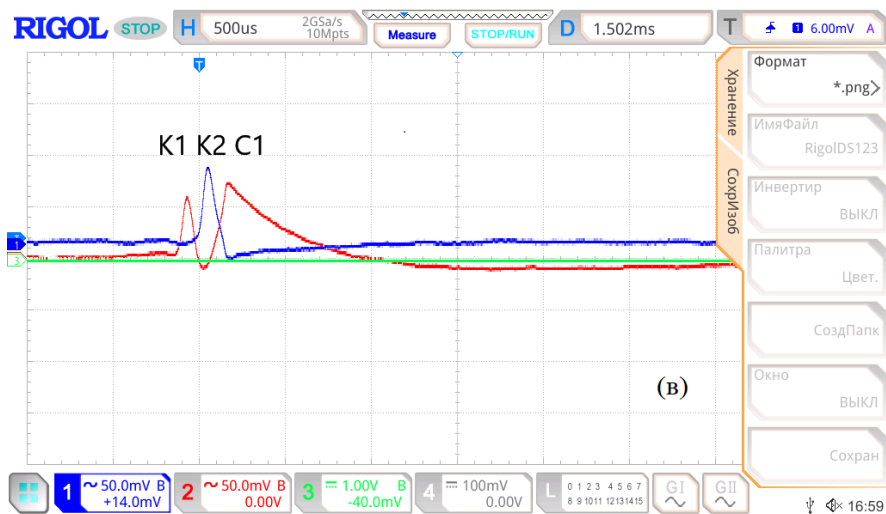


Рис. 5.

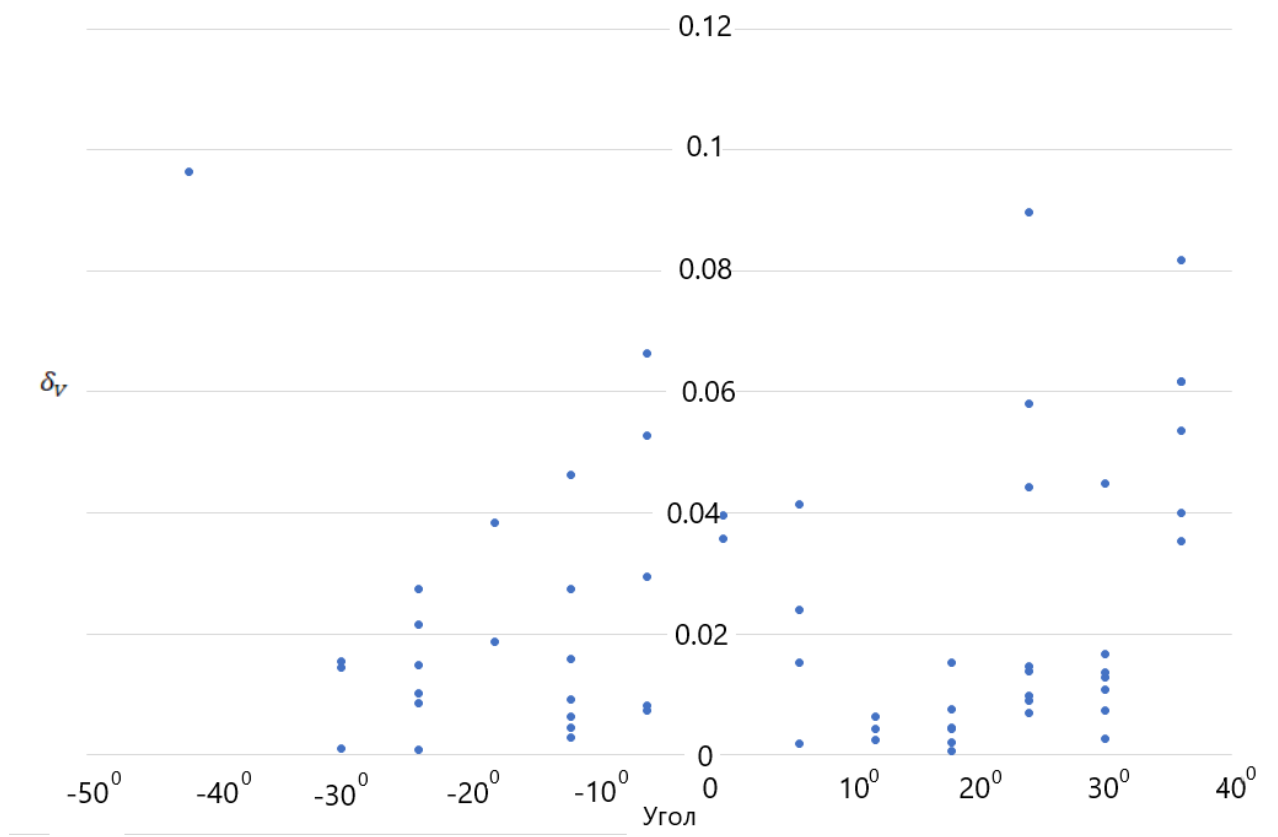


Рис. 6.

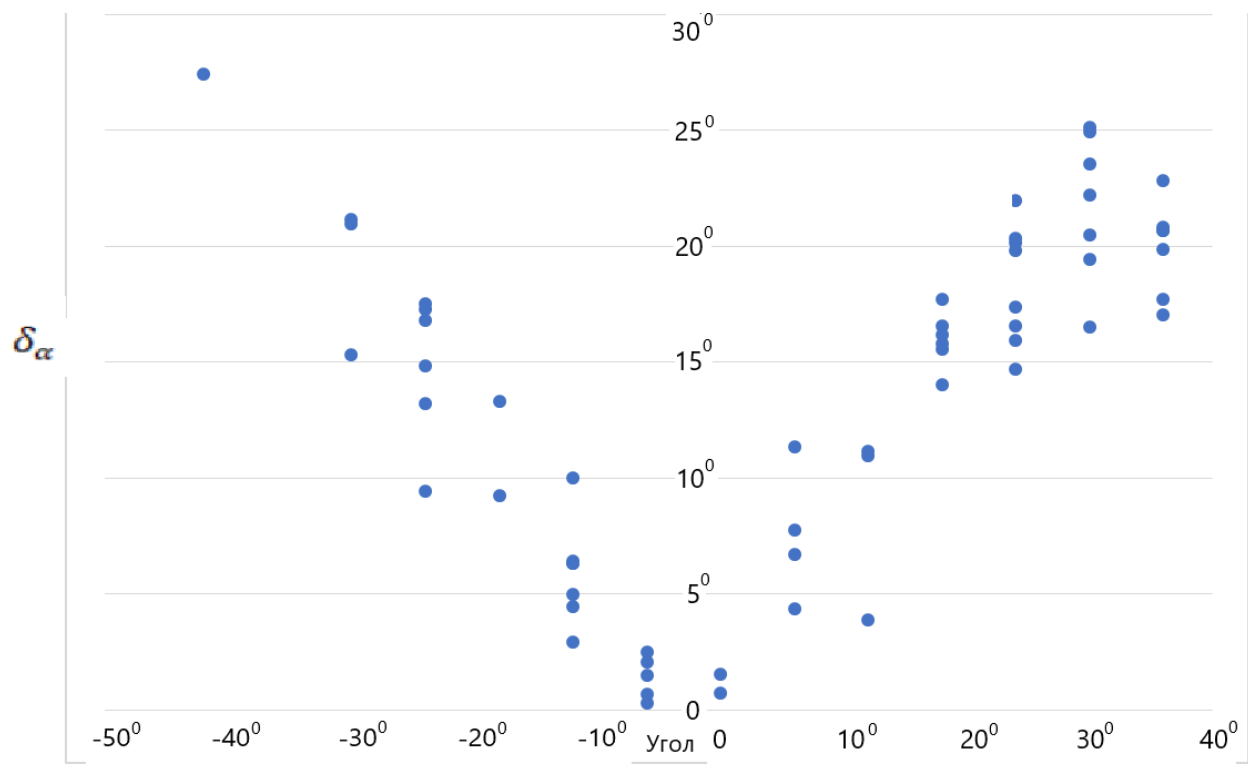


Рис. 7.

~~EXPERIMENTAL STUDY OF A GRID SENSOR FOR MEASURING THE VELOCITY
VECTOR OF MICROMETEOROIDS AND SPACE DEBRIS PARTICLES~~

~~M.P. Kalach, A.M. Telegin*, K.E. Voronov~~

~~SAMARA NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY~~

~~The article describes a prototype sensor for measuring the velocity vector of micrometeoroids and space debris particles based on grid metal electrodes. The results of an experimental study and proposals for further modification of the measurement system are presented.~~

~~Key words: micrometeoroids, space debris, microparticle, induced impulse,
velocity vector.~~