

микроконтроллера фирмы MICROCHIP PIC16C74. Также в устройстве предусматривается вывод информации о концентрации на жидкокристаллический дисплей. для связи с компьютером используется последовательный порт в стандарте RS-232, что позволяет разрабатывать различные измерительные комплексы.

**УДК 621.37/39**

## **УСТРОЙСТВО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ**

**Пняков А.В., Воронов К.Е.**

Интерес к разработке и изучению методов высокоскоростного (единицы десятки километров в секунду) метания твердых тел имеет как чисто научную, так и практическую основу. Соударение тел с высокими скоростями позволяет исследовать поведение веществ в достигаемых при этом экстремальных условиях - при высоких давлениях, плотностях, температурах. Появление и развитие космической техники обусловило необходимость проведения оценок повреждения элементов конструкций космических аппаратов при ударах микрометеоритов, что потребовало лабораторного моделирования метеоритного удара. Кроме перечисленных, развитие данного направления стимулирует еще ряд научных и технических проблем, среди которых следует отметить задачу подпитки термоядерного реактора топливом.

Существует несколько способов построения ускорителей, но большинство из них для придания частице требуемой скорости используют большие напряжения, что в свою очередь создаёт трудности в коммутации высоких напряжений. К тому же источники больших напряжений слишком громоздки.

В связи с вышесказанным наиболее оптимальным является конструкция, где заряженная частица многократно ускоряется одним сравнительно невысоким напряжением. Однако здесь существуют свои трудности. Если в линейных ускорителях статического типа любая частица, поступающая в начало ускорительного тракта, будет ускорена до предельной скорости, то в проектируемом ускорителе, чтобы обеспечить высокую вероятность надёжного ускорения частицы, следует с заданной точностью определить значение удельного заряда частицы и её начальную скорость. Следует также отметить и достоинства проектируемого ускорителя, к которым относятся относительно малые габариты и возможность задания для частиц с конкретной массой конкретных конечных скоростей.

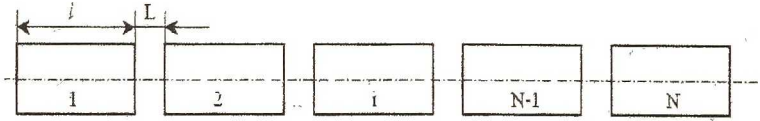


Рисунок 1 – Упрощённая схема ускорительного тракта.

Структурно ускорительный тракт состоит из  $N$  электродов длиной  $L$ . Расстояние между электродами ( $L$ ) одинаковое и определяется только значением напряжения пробоя.

Для определения оптимального количества электродов и оптимального способа управления ускоряющим полем определим скорости и времена нахождения частицы в различных местах ускорительного тракта. Для этого за начало отсчёта примём начало первого ускоряющего электрода и введём следующие обозначения:

- $V_0$  - начальная скорость частицы (на входе в первый электрод);
- $V_i$  - скорость частицы при прохождении  $i$ -ого электрода;
- $T_{Hi}$  - время нахождения частицы в начале  $i$ -ого электрода;
- $T_{Ki}$  - время нахождения частицы в конце  $i$ -ого электрода.

Также будем считать, что частица имеет некоторую массу  $m$  и положительный заряд  $Q$ . Тогда можно определить ускорение, с которым движется частица между соседними ускоряющими электродами:

$$a = \frac{U}{L} \cdot \frac{Q}{m} \quad (1)$$

где  $U$  – приложенное между электродами напряжение.

Таким образом, по классическим формулам физики получаем:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_0, \\ V_2 &= \sqrt{2 \cdot a \cdot L + V_1^2} = \sqrt{2 \cdot a \cdot L + V_0^2}, \\ V_3 &= \sqrt{2 \cdot a \cdot L + V_2^2} = \sqrt{2 \cdot a \cdot L + \left(\sqrt{2 \cdot a \cdot L + V_0^2}\right)^2} = \sqrt{4 \cdot a \cdot L + V_0^2}, \\ &\dots \\ V_i &= \sqrt{(2 \cdot i - 2) \cdot a \cdot L + V_0^2}, \\ V_N &= \sqrt{(2 \cdot N - 2) \cdot a \cdot L + V_0^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставив (1) в (2) получим:

$$V_i = \sqrt{(2 \cdot i - 2) \cdot \frac{U}{L} \cdot \frac{Q}{m} \cdot L + V_0^2} = \sqrt{(2 \cdot i - 2) \cdot U \cdot \frac{Q}{m} + V_0^2}. \quad (3)$$

Как видно из формулы (3) скорость частицы (в том числе и конечная) не зависит от расстояния между ускоряющими электродами. Поэтому данное расстояние целесообразно выбирать как можно меньшим с целью уменьшения общей длины ускорительного тракта.

Управление ускоряющим полем в тракте может быть осуществлено как с помощью разрядников, так и путём подачи на электроды изменяющегося во времени напряжения. Для определения закона изменения этого напряжения необходимо знать времена прохождения частицей различных участков ускорительного тракта.

Приведём формулы для определения времени нахождения частицы в начале, конце электрода и по середине между электродами:

$$T_{Hi} = \frac{\sqrt{(2 \cdot i - 1) \cdot U \cdot \frac{Q}{m} + V_0^2} - V_0}{U} \cdot L \cdot \left(\frac{Q}{m}\right)^{-1} + l \cdot \sum_{j=1}^{i-1} \frac{l}{\sqrt{(2 \cdot j - 2) \cdot U \cdot \frac{Q}{m} + V_0^2}}$$

$$T_{Ki} = \frac{\sqrt{(2 \cdot i - 1) \cdot U \cdot \frac{Q}{m} + V_0^2} - V_0}{U} \cdot L \cdot \left(\frac{Q}{m}\right)^{-1} + l \cdot \sum_{j=1}^i \frac{l}{\sqrt{(2 \cdot j - 2) \cdot U \cdot \frac{Q}{m} + V_0^2}} \quad (4)$$

$$T_{Li+i} = \frac{L}{U} \cdot \left(\frac{Q}{m}\right)^{-1} \cdot \left[ \sqrt{(2 \cdot i - 1) \cdot U \cdot \frac{Q}{m} + V_0^2} - V_0 \right] + l \cdot \sum_{j=1}^i \frac{l}{\sqrt{(2 \cdot j - 2) \cdot U \cdot \frac{Q}{m} + V_0^2}}$$

При управлении ускорительным трактом с помощью разрядников, включение  $i$ -ого разрядника должно производиться в момент времени  $T_{Hi}$ , а длина электродов  $l$  определяется исходя из времени переходного процесса разрядника. В случае управления с помощью подачи модулированного напряжения переключение происходит также в момент нахождения частицы в начале ускоряющего электрода. Схема ускорительного тракта, для случая использования модулированного напряжения, приведена ниже на рисунке 2.

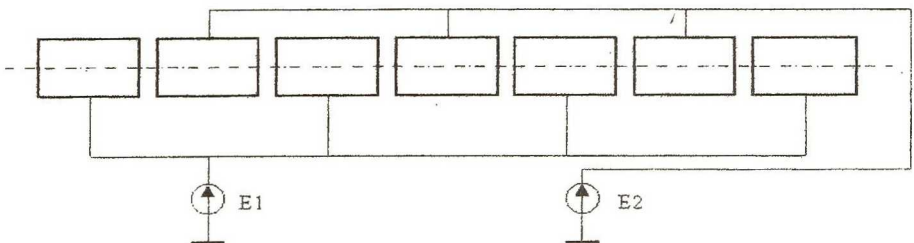


Рисунок 2 - Схема включения ускорительного тракта.

Источники E1 и E2 генерируют на своих выходах сдвинутые на  $\pi/2$  модулированные сигналы прямоугольной формы. Максимум напряжения на выходе E1 соответствует минимуму напряжения на выходе E2 и приходится на момент времени нахождения частицы в ускоряющем промежутке. Таким образом, между двумя соседними электродами создаётся электрическое ускоряющее поле, посредством воздействия которого и происходит ускорение частицы. Следует отметить, что период следования и длительность управляющих импульсов меняется во времени как функция от начальной скорости ускоряемой частицы и её удельного заряда. Очевидно, что чем больший заряд получит частица фиксированной массы в инжекторе, тем большую скорость приобретёт частица двигаясь по ускорительному тракту. Зависимости напряжений источников E1 и E2 от времени для частиц с начальной скоростью 1 км/с и удельным зарядом 350 Кл/кг для первых 25 ускоряющих промежутков приведены на рисунке 3.

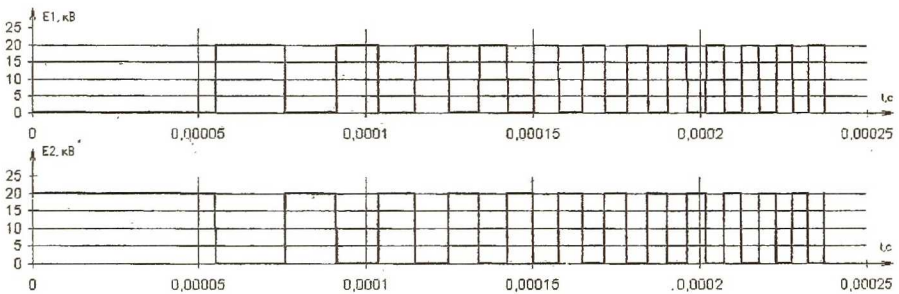


Рисунок 3 – Зависимости напряжений на выходах источников E1 и E2 от времени.

Для моделирования микрометеоритов будем использовать частицы состоящие из железа (Fe) и меди (Cu). Принимая допущение, что частица имеет сферическую форму, рассчитаем максимальный заряд, который может сообщить её инжектор при напряжении заряда 10 кВ. Для этого вычислим собственную ёмкость частицы по формуле:

$$C = \frac{l}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \oint_{S_{\text{поверх}}} \frac{k \cdot dS}{r}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится кольцо;

$\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-15}$  Ф/м);

$k$  - функция координат точки, зависящая от размеров кольца;

$r$  - расстояние от регистрируемой частицы до малого элемента поверхности  $dS$  кольца.

Для частиц сферической формы выражение (5) принимает вид :

$$C = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R, \quad (6)$$

где  $R$  - радиус частицы.

Заряд частицы определяется как произведение ёмкости частицы на заряжающее напряжение. Для железных частиц при напряжении заряда 10 кВ имеет место следующая зависимость удельного заряда от массы, которая представлена на рисунке 4.

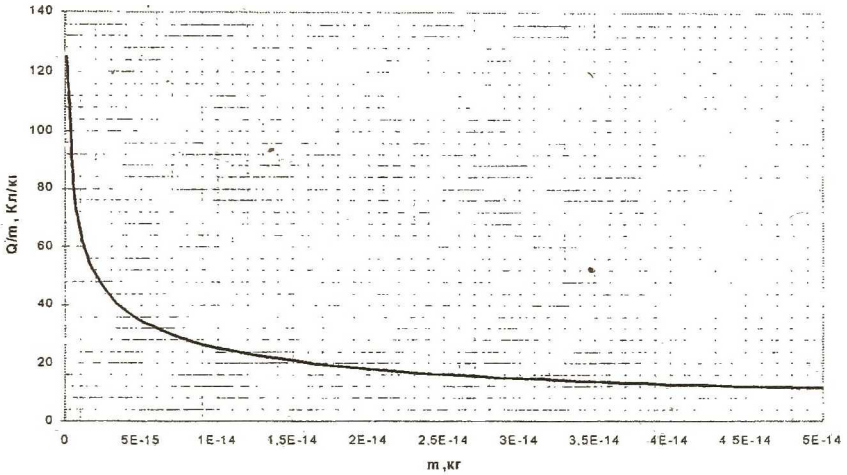


Рисунок 4 – Зависимость удельного заряда частицы от её массы.

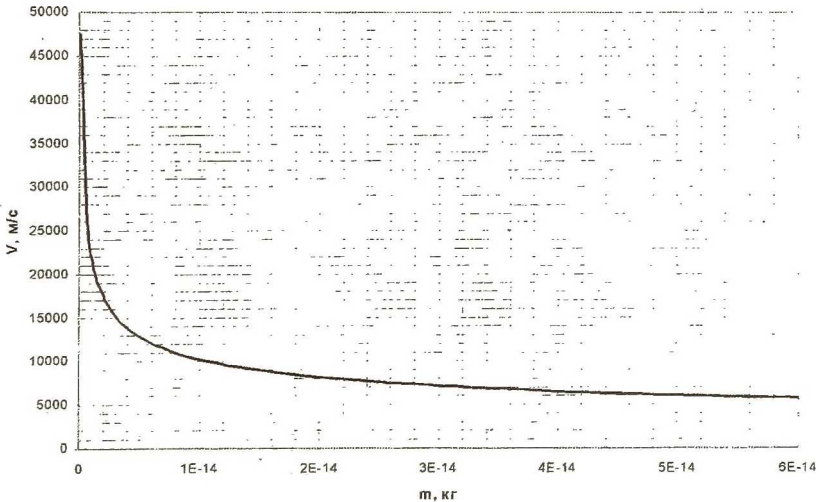


Рисунок 5 - Зависимость конечной скорости частиц от её массы.

Как видно из выражения (3) конечная скорость частицы напрямую зависит от её массы. Данная зависимость приведена на рисунке 5. Для дан-

ной зависимости эффективное ускоряющее напряжение принималось равным 1 МВ.

При проектировании таких ускорителей немаловажным является вопрос о фокусировке частиц при прохождении их по ускорительному тракту. Форма электрического поля определяется формой электродов, число которых может быть сравнительно большим. Особо следует указать на фокусирующее действие зазора между двумя цилиндрическими линзами, несущими разные потенциалы. На рисунке 6 дана схема силовых линий электрического поля в зазоре между двумя цилиндрическими электродами.

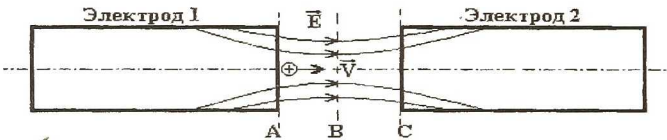


Рисунок 6 — Силовые линии поля в зазоре между двумя электродами

Положительно заряженные частицы с энергией  $W_0$  движутся внутри левой цилиндрической линзы вправо, как показано стрелкой. Приблизившись к щели, они попадают в область действия электрического поля. Вектор напряженности электрического поля  $E$  можно разложить на две составляющие: горизонтальную  $E_{||}$ , которая ускоряет частицы вдоль оси источника, и вертикальную  $E_{\perp}$ , которая вначале фокусирует, а затем расфокусирует частицы, не изменяя их энергии в основном направлении. Если разность потенциалов между двумя линзами  $U$  и энергия частицы до подхода к щели  $W_0$ , то на линии В (середина щели) её энергия равна  $W_0 + U/2$ , а после того как частица попадет в правую линзу, эта энергия составит  $W_0 + U$ . С некоторым приближением можно считать, что левую половину щели, до линии В, частица проходит со средней энергией  $W_0 + U/4$ , а правую, после линии В — с энергией  $W_0 + 3U/4$ . Средняя скорость движения частицы в осевом направлении и время, в течение которого частица проходит первый и второй участки пути, определяются выражениями :

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (W_0 + U/4)}{m}}; \quad V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (W_0 + 3 \cdot U/4)}{m}}; \quad (7)$$

$$t_1 = l \cdot \sqrt{\frac{m}{2 \cdot (W_0 + U/4)}}; \quad t_2 = l \cdot \sqrt{\frac{m}{2 \cdot (W_0 + 3 \cdot U/4)}}$$

Напряженности поля  $E_{\perp}$  в правой и левой частях будем считать равными по величине и противоположными по направлению. Тогда вертикальная составляющая скорости частицы, приобретенная на первом и втором участках пути, будет пропорциональна времени прохождения этих участков, т. е.:

$$\frac{V_{\perp 1}}{V_{\perp 2}} = \frac{t_1}{t_2} = \sqrt{\frac{W_0 + 3V/4}{W_0 + V/4}}. \quad (8)$$

Так как на первом участке частица будет находиться дольше, чем на втором, то преобладает фокусирующее действие. Оно заметно только в том случае, если энергия  $W_0$  близка к  $U$ . Так как напряжение большее 100 - 200 кВ приложить к линзам практически невозможно, то фокусирующие линзы могут создать эффект только для частиц малых энергий, порядка нескольких десятков и сотен килоэлектронвольт.

*Список использованных источников*

1. Мерзлевский Л.А., Титов В.Н., Фадеев Ю.И., Швецов Г.А. Высокоскоростное метание твёрдых тел. Физика горения и взрыва., 1987, т.23, №5, с.77-91.
2. Кмар Е.Г. Основы ускорительной техники. М.: Атомиздат, 1975.
3. Гольдин Л.Л. Физика ускорителей. М.: Наука, 1983.

**УДК 62. 501**

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АЦП ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ  
КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ**

**Кондоров Д.А., Кудрявцев И.А.**

Датчики встроенного контроля (ДВК) применяются для построения систем диагностики технического состояния узлов трения в жидкостных системах. Диагностика производится на основе анализа параметров частиц износа, генерируемых в рабочую жидкость узлами трения. Информационными параметрами являются концентрация частиц и их гранулометрический состав.

При изготовлении ДВК необходимой операцией, качество которой определяет характеристики готового устройства, является настройка, при которой необходимо анализировать выходной сигнал и сравнивать с данными эталонного устройства.

Необходимо отметить, что вся информация в сигнале заключена в случайной составляющей. При этом часто случайными являются такие параметры, как период повторения импульсов и их длительность. Это исключает возможность исследования таких сигналов осциллографическими методами (в классическом виде), поскольку сигнал не является периодическим.

Примером подобного случайного сигнала могут служить импульсы на выходе датчика встроенного контроля. Их параметры (амплитуда, длительность, скважность) являются случайными величинами и зависят лишь