



Рис. 6 Зависимость погрешности (в километрах) от фазового сдвига (в градусах)

Такое расстояние спутник преодолевает чуть более секунды. Если навигатор предназначен для включения передатчиков телеметрической (либо какой-нибудь другой) информации при пролёте над наземным измерительным пунктом, такая погрешность не окажет ощутимого влияния на качество сеанса связи.

#### Список использованных источников

1. Иванов В. В. Микропроцессорный геомагнитный вычислитель параметров круговой орбиты / Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. материалы Всероссийской НТК – Самара: Изд-во СГАУ, 2009. - С. 195.
2. Справочник по теоретическим основам радиотехники, / Под ред. Б.Х.Кривинского. В 2-х т. Т.2. - М.: Энергия. 1977.
3. Левантовский В.И. Механика космического полёта в элементарном изложении. - М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980.

## РАЗРАБОТКА ЦИКЛИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

А.В. Пияков

Самарский государственный аэрокосмический университет, г.Самара

Для проведения ударных экспериментов используются различные типы ускорителей, однако наиболее “чистыми” являются электростатические и линейные ускорители, в которых ускорение частиц осуществляется энергией электрического поля. Такие ускорители высокоскоростных твёрдых частиц основаны на ускоряющей системе Слоуна – Лоуренса, где синфазность движения частиц с изменением напряжения на трубках дрейфа достигается путем выполнения дрейфовых трубок разных длин. Они имеют

узкий диапазон ускоряемых частиц и небольшое число ускоряющих секций, что обусловлено тем, что данная система не позволяет ускорить частицы в широком диапазоне масс без предварительной перенастройки геометрии ускоряющего тракта. Кроме того, данному классу ускорителей характерны относительно большие габариты и масса.

Для дальнейшего повышения эффективного ускоряющего напряжения предложена конструкция циклического ускорителя твердых частиц. В основе этого ускорителя лежит принцип электродинамического ускорения частиц. Удержание частиц в замкнутом ускоряющем тракте осуществляется посредством тороидальных дефлекторов. Структурная схема циклического ускорителя пылевых частиц приведена на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: 1 - источник питания инжектора, 2 - инжектор заряженных частиц, 3 - источник высокого напряжения (~100кВ), 4 - зарядочувствительный усилитель, 5 - линейный электростатический ускоритель (ЛЭСУ), 6 - вакуумный отсекающий, 7 - система вакуумной откачки и контроля вакуума (СВОКВ), 8 - измерительная линейка, 9 - вакуумная камера для экспериментов, 10 - управляемый тороидальный дефлектор, 11 - линейный электродинамический ускоритель (ЛЭДУ), 12 - система управления ускорителем.

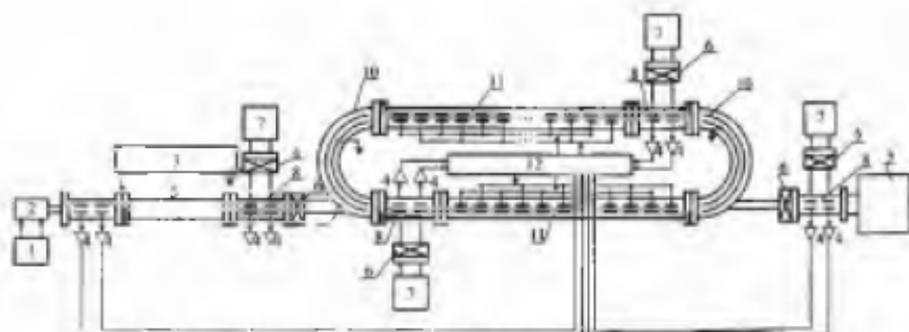


Рис. 1. Структурная схема циклического ускорителя пылевых частиц

Ускоритель работает следующим образом: инжектор частиц выпускает в тракт заряженные частицы с требуемым интервалом следования (примерно 1 частица в секунду). Частица последовательно проходит первую измерительную линейку, ЛЭСУ, вторую измерительную линейку и попадает в тракт циклического ускорителя. По измеренным временам пролета первой и второй измерительных линеек, а также заданного напряжения ЛЭСУ, система управления ускорителем вычисляет удельный заряд частицы. Затем частица пролетает несколько кругов по тракту циклического ускорителя, каждый раз ускораясь в четырех ЛЭДУ. Управляемые тороидальные дефлекторы предназначены для искривления траектории частицы. В зависимости от скорости частицы (которая постоянно измеряется

измерительными линейками, установленными в контуре циклического ускорителя) и удельного заряда частицы, система управления ускорителем управляет высоковольтными усилителями импульсов и высоковольтным усилителем напряжения, которые в свою очередь формируют необходимые напряжения на дрейфовых трубках ЛЭДУ и на обкладках тороидальных дефлекторов. В момент достижения частицей критической скорости (той скорости, при которой максимального выходного напряжения высоковольтного усилителя напряжения становится недостаточно, чтобы удержать частицу в тракте за счет тороидальных дефлекторов) процесс ускорения прекращается и частица выводится в вакуумную камеру для экспериментов. ЭВМ предназначена для ведения статистики об ускоряемых частицах с помощью специально разработанного программного обеспечения.

Технико-экономическая эффективность использования разработки выражается прежде всего в существенной дешевизне лабораторного моделирования по сравнению с постановкой натуральных экспериментов на космических аппаратах. Оптимальное применение материалов и рациональное конструирование, основанное на результатах лабораторных экспериментов, позволит увеличить срок службы космических аппаратов, более точно прогнозировать их срок службы и надежность. Особенно актуальны такие исследования при проектировании аппаратов, предназначенных для научных экспериментов в дальнем космосе при изучении комет, где плотность потока пылевых частиц высока.

### Расчет скорости и энергии частицы

Эквивалентное ускоряющее напряжение линейного электродинамического ускорителя определяется выражением:

$$U = U_{\text{эф}} \cdot T_0,$$

где  $T_0$  - время-пролетный коэффициент электродинамического ускорителя;  
 $U_{\text{эф}}$  - эффективное ускоряющее напряжение ускорителя.

Эквивалентное ускоряющее напряжение всего ускорителя определяется выражением:

$$U_x = U \cdot N,$$

где  $N$  — количество пройденных электродинамических ускорителей.

Максимально возможная скорость частицы при этом будет определяться выражением:

$$V_{\text{max}} = \sqrt{2 \frac{q}{m} U T_0 + V_0^2},$$

где  $q/m$  - удельный заряд;  $V_0$  - скорость частицы на входе.

Максимальное число кругов, которые частица пройдет в ускорителе будет определяться из условия равенства центробежной силы движения

частицы в дефлекторе и электростатической силы электрического поля дефлектора. Отклоняющее напряжение можно оценить по формуле:

$$U_{\text{отб}} = \frac{m \cdot V^2}{q \cdot a} = \frac{2U}{\alpha},$$

где  $\alpha = \frac{1}{\ln(R_2/R_1)}$  - коэффициент геометрии поля;

$R_1, R_2$  - внутренний и внешний радиусы пластин дефлектора.

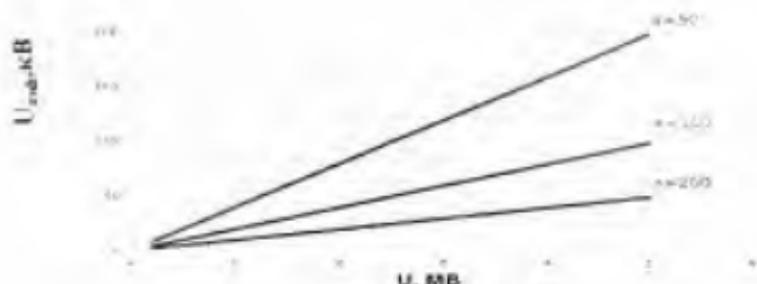


Рис. 2. Зависимость отклоняющего напряжения от эквивалентного ускоряющего напряжения для различных значений  $\alpha$ . Зазор между пластинами  $d=1\text{см}$

### Оценка максимально достижимых скоростей

Максимальная скорость на выходе и максимальное отклоняющее напряжение связаны соотношениями:

$$\begin{cases} V_{\text{max}} = \sqrt{2 \frac{q}{m} U T_0 + V_0^2}, \\ U_{\text{отб}} = \frac{m \cdot V^2}{q \cdot a} \end{cases}$$

Максимальная напряженность электрического поля для различных методов обработки поверхности соответственно: 50 кВ/см — механическая обработка, 70 кВ/см — гальваническая, 100 кВ/см — ионная.

### Оценка необходимого числа оборотов

Максимальная скорость частицы достигается после некоторого числа ускорений. Зависимость требуемого числа ускорений от параметров ускорителя определяется выражением:

$$n_{\text{req}} = \frac{U_{\text{дрэмах}} \cdot \frac{a}{2}}{U},$$

$$N_{req} = \frac{N_{req}}{2},$$

где  $U_{дэф\ max}$  — максимально допустимое отклоняющее напряжение;  $U$  — эквивалентное ускоряющее напряжение линейного электродинамического ускорителя;  $N_{req}$  — требуемое число витков.

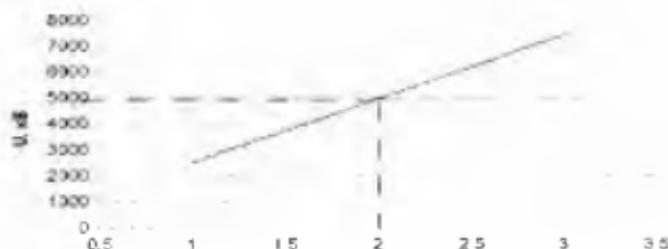


Рис. 3. График зависимости максимального ускоряющего напряжения от радиуса дефлектора для зазора между пластинами  $d=1\text{ см}$

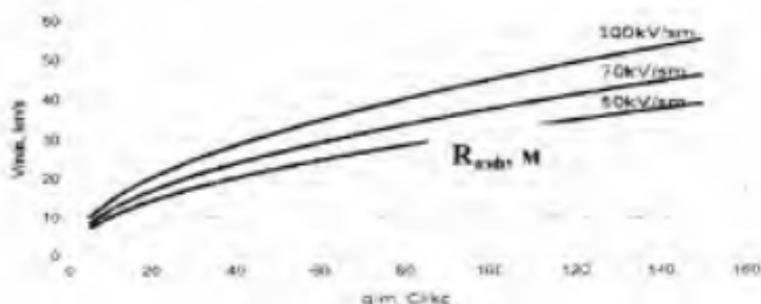


Рис. 4. Зависимость максимальной достижимой скорости от удельного заряда  $q/m$  для различных максимально допустимых отклоняющих напряжений. Радиус основной траектории дефлектора  $R=2\text{ м}$ , ширина зазора между пластинами  $d=1\text{ см}$

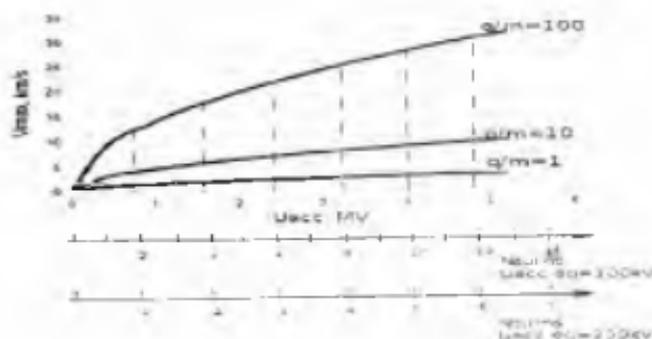


Рис. 5. График зависимости максимально достижимой скорости от ускоряющего напряжения для различных удельных зарядов  $q/m$ .  $N_{turns}$  — число витков необходимое для достижения данной скорости.  $U_{acc\ экв}$  — эквивалентное ускоряющее напряжение линейного электро-динамического ускорителя

## Расчет конструкций ускорителя

Расчет характеристик ускорителя двух разных конструкций приведен в табл. 1.

Таблица 1. Расчет конструкции ускорителя

$U_{acc\ pre}, kV$ , напряжение преускорителя	100	
$N_{gap}$ , количество промежутков электродинамического ускорителя	10	20
$U_{gap}, kV$ , ускоряющее напряжение промежутка	10	
$U_{acc\ eq}, kV$ , эквивалентное ускоряющее напряжение электродинамического ускорителя	100	200
$R_1, m$ , радиус внутренней пластины дефлектора	1,995	
$R_2, m$ , радиус внешней пластины дефлектора	2,005	
$d, m$ , ширина зазора между пластинами	0,01	
$a$ , коэффициент геометрии поля	200	
$U_{def}, kV$ , максимально допустимое отклоняющее напряжение	50	
$n$ , требуемое число ускорений	24	12
$N$ , требуемое число витков	6	3
$U_{acc}, MV$ , суммарное ускоряющее напряжение	4,9	

### Список использованных источников

1. Alexandre Pozwolski. Compact laser-driven accelerator of macroparticles. Laser and Particle Beams 2001, 19.
2. Семкин Н.Д., Пияков А.В. Физика волновых процессов и радиотехнические системы - 2003, том 3. - С. 86.