

ИССЛЕДОВАНИЯ НА АВМ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЦИКЛОТРОНЕ

А. А. КОМОВ, Б. А. РЫЖКОВ, Н. В. ТРИХАНОВА, С. Н. ЮЖАКОВА

(Представлена кафедрой вычислительной техники)

Большой разброс энергий ионов в выведенном из циклотрона пучке затрудняет проведение физических экспериментов по разрешению близко расположенных энергетических уровней атомных ядер. Улучшить монохроматичность выводимого пучка ускоренных ионов можно применением магнитного анализа, что однако связано с большой потерей интенсивности. Возможны другие способы улучшения монохроматичности выводимого пучка: применение фокусирующих диафрагм на дуантах циклотрона, смещение источника от геометрического центра и поворот его на некоторый угол [1, 2].

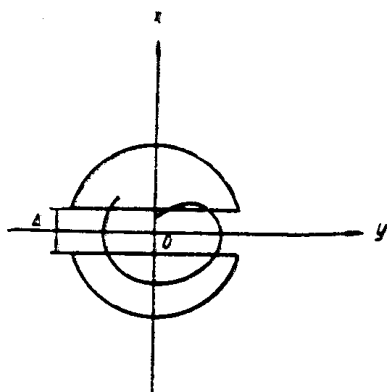


Рис. 1. Схематическое изображение дуантов циклотрона

Для получения полной информации о возможности расстановки щелей и определения их местоположения необходимо провести расчет орбит ионов для различных начальных условий. Движение ионов в центральной области циклотрона (рис. 1) в декартовой системе координат описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= \omega \frac{dy}{dt} + \frac{q}{m_0} \frac{V_m}{\Delta} \cos(\omega t + \varphi_0), \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= -\omega \frac{dx}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

в ускоряющем промежутке и системой уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= \omega \frac{dy}{dt}, \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= -\omega \frac{dx}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

вне ускоряющего промежутка.

Здесь ω — частота обращения иона,

q, m_0 — заряд и масса иона,
 V_m — амплитуда ускоряющего электрического высокочастотного поля,
 Δ — расстояние между дуантами.

Решение систем дифференциальных уравнений (1), (2) проводилось [1] графоаналитическим методом при анализе работы циклотрона в режиме с нерегулируемой энергией выводимых ионов. При этом не учитывается действие диафрагм, которые экранируют пространство между дуантами от провисания электрического поля. С введением экранировки картина электрического поля относительно геометрической оси, проходящей вдоль дуантов, становится несимметричной. Применение графоаналитического метода для расчета орбит циклотрона, работающего в режиме с регулируемой энергией, требует слишком больших затрат времени, так как необходимо вычислять орбиты для случаев ускорения ионов с различными начальными условиями и с различным отношением зарядов к массе.

Для расчета были применены аналоговые вычислительные машины (АВМ), обеспечивающие достаточную точность результатов при вычислении нескольких первых орбит, которые и определяют формирование пучка. АВМ обеспечивают наглядность решения, что дает возможность сразу видеть непригодные варианты, удобства задания начальных условий и изменения величин параметров, что способствует быстрому проведению расчетов в удобной для анализа форме. Составленная на основе систем уравнений (1), (2) структурная схема модели представлена на рис. 2, где 1—6 — интеграторы, 7 — инвертор, K_1 — K_4 — блоки постоянных коэффициентов. Интеграторы 1, 2 предназначены для решения первого уравнения, 3, 4 — второго уравнения системы (1). Блоки 5—7 предназначены для воспроизведения ускоряющего синусоидального высокочастотного поля. При разомкнутом ключе осуществляется решение системы (2), при замкнутом ключе — системы (1). Управление процессом решения, т. е. переход от решения системы уравнений (1) к системе (2), выполняется программным устройством, обеспечивающим возможность использования значений переменных, полученных в конце предыдущего участка, как начальные значения для следующего участка. Использование для построения программного устройства электромагнитных реле недопустимо, так как для благоприятного масштаба времени время перелета контактов реле сравнимо со временем решения на участке движения иона в ускоряющем промежутке; диодные ключи вполне соответствуют необходимым требованиям и не вносят ощутимой погрешности.

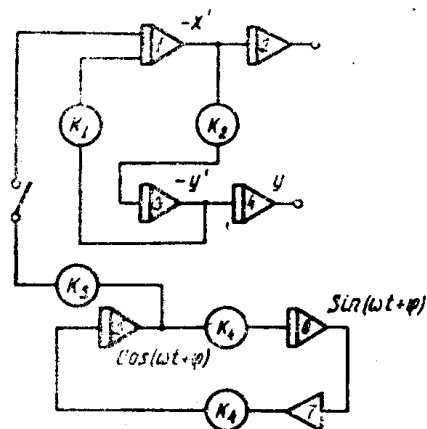


Рис. 2. Структурная блок-схема для решения систем уравнений (1) и (2)

Схема программного устройства приведена на рис. 3. Управляющим напряжением является напряжение с выхода интегратора 2, изображающее координату x . Диоды D_1, D_2 и операционный усилитель 1 выделяют модуль управляющего напряжения, который сравнивается с напряжением E_0 , соответствующим половине расстояния между дуантами. Для уменьшения времени срабатывания ключа следует включить в цепь обратной связи операционного усилителя 2 диодные элементы, обеспечивающие крутой фронт сигнала, управляющего схемой ключа. Схема

ключа, состоящая из диодов $D_3—D_6$ и усилителя 5, может работать при сигналах любой полярности. Сопротивления R_1 и R_2 являются входными сопротивлениями операционного усилителя 5, диоды D_4 и D_5 подключены непосредственно к суммирующей точке, потенциал которой близок к нулю. Такое включение диодов увеличивает чувствительность по отношению к управляющему напряжению. Погрешность срабатывания схемы ключа при изменении управляющего напряжения не превышает 0,1 в. Несимметричность картины электрического поля относительно ко-

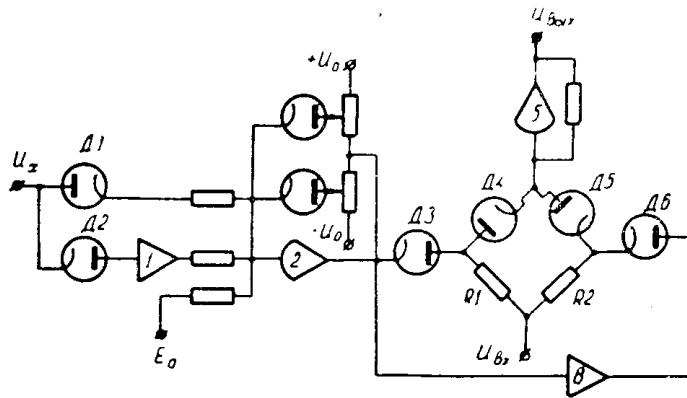


Рис. 3. Схема программного устройства

ординаты y при учете экранировки реализуется несложной дополнительной схемой, управляемой напряжением, пропорциональной производной первого порядка $\frac{dx}{dt}$.

Результаты расчета наблюдались на осциллографе типа И-4М. На рис. 4 приведены осциллограммы траекторий заряженных частиц при различных начальных фазах, постоянной амплитуде и различных

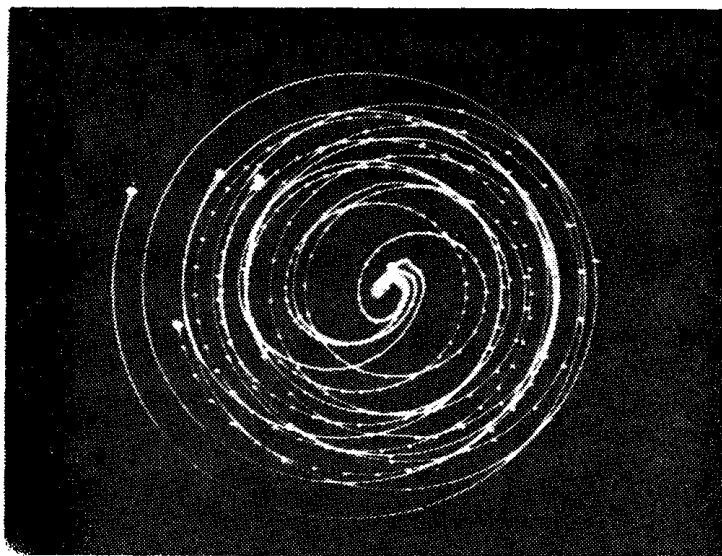


Рис. 4. Результаты решения — осциллограммы траектории ионов в циклотроне при различных начальных фазах

частотах ускоряющего высокочастотного поля. Как видно из рис. 4, траектории частиц взаимно пересекаются, и расстановка диафрагм

привела бы к потере значительной части ионов. На рис. 5 приведены осциллограммы траекторий ионов для различных частот и различных амплитуд ускоряющего высокочастотного поля. Из рис. 5 видно, что изменением амплитуды высокочастотного поля можно добиться сближения орбит ионов, ускоряемых при различных частотах высокочастотного

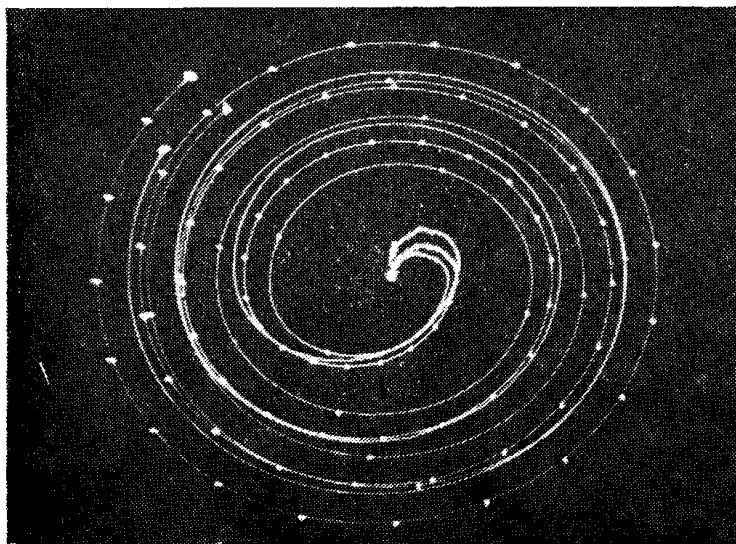


Рис. 5. Результаты решения — осциллограммы траектории ионов при различных амплитудах и частотах ускоряющего напряжения

поля. Анализ результатов расчета показал, что фокусирующие диафрагмы для ускорителя, работающего в режиме с регулируемой энергией, можно использовать при условии регулировки ускоряющего напряжения в диапазоне 100—150 кВ.

Расчет орбит ионов при повороте источника на некоторый угол также был выполнен на АВМ. При этом движение иона на первом полуобороте описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= \omega \frac{dy}{dt} + \frac{q}{m_0} \frac{V_m}{\Delta} \cos \alpha \cos(\omega t + \varphi_0), \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= -\omega \frac{dx}{dt} - \frac{q}{m_0} \frac{V_m}{\Delta} \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_0), \end{aligned} \quad (3)$$

где

α — угол поворота источника ионов. Последующие орбиты описываются системами уравнений (1) и (2). Применение АВМ позволяет гораздо проще определить необходимый угол поворота и величину смещения источника ионов по сравнению с графоаналитическим методом, использованным в [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. И. Веников, Н. И. Чумаков. Ж., «Атомная энергия», т. II, вып. 3. 1961.
2. С. И. Козлов, Р. Ц. Оганесян, Пек Ден Ги, И. А. Щелаев. Расчет движения ионов в центральной области циклотрона при повороте источника. Препринт ОИЯИ, 1966.