

## ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ НА АНАЛОГОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

В. А. КОЧЕГУРОВ, Б. А. РЫЖКОВ, Н. В. ТРИХАНОВА, В. П. ИВАНЧЕНКОВ

(Представлена кафедрой вычислительной техники)

Расчет ускорителей сводится к расчету траекторий движения заряженных частиц в электромагнитных полях, неоднородных в пространстве и изменяющихся во времени. Эти траектории в большинстве случаев описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, которые не имеют аналитического решения. Использование численных и графоаналитических методов приводит к громоздким вычислениям. Решение же на АВМ проводится довольно просто.

Особенности построения математических моделей и программирования показаны на примерах расчета траекторий заряженных частиц в микротроне и при анализе вывода ускоренных частиц из камеры циклического ускорителя. Описано устройство оптимизации систем транспортировки пучков, работающее совместно с АВМ.

### Моделирование движения частиц в микротроне

Микротрон относится к ускорителям частиц с постоянным управляющим магнитным полем [1]. В процессе ускорения движение частиц происходит в нем по орбитам с увеличивающимся радиусом. При этом частицы ускоряются под действием высокочастотного электрического напряжения на небольшом участке траектории в резонаторе, а вне ускоряющего промежутка частицы совершают движение по циклическим орбитам в постоянном магнитном поле. Для определения параметров ускоряющего промежутка наилучшего положения источников заряженных частиц необходимо знать траектории частиц на первых оборотах. Эти задачи возможно решать на АВМ с достаточной для инженерной практики точностью. Особенностью решения подобных задач является необходимость изменения в процессе решения по определенной программе структурной схемы математической модели.

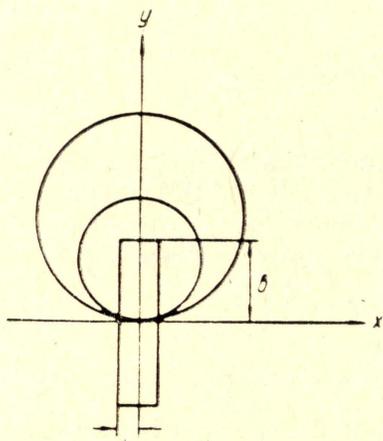


Рис. 1. Траектории электронов в микротроне

На рис. 1 показаны траектории движения заряженных частиц в микротроне на первых оборотах. С учетом релятивистского эффекта уравнения движения электронов имеют вид [2]: в резонаторе при  $|x| \leq h$ ,  $y < b$ :

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{e}{m_0} \sqrt{1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} \left\{ - \left(\frac{dx}{dt}\right) \left(\frac{dy}{dt}\right) \times \right. \\ \times \frac{E_0}{c^2} J_0 \left(y_{01}, \frac{y}{y_0}\right) \sin(\omega t + \varphi_0) - \\ \left. - \frac{dx}{dt} \left[ \frac{E_0}{c} J_1 \left(y_{01}, \frac{y}{y_0}\right) \cos(\omega t + \varphi_0) + B_z \right] \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{c}{m_0} \sqrt{1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} \left\{ \left[ 1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 \right] \times \right. \\ \times E_0 J_0 \left(y_{01}, \frac{y}{y_0}\right) \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) + \\ \left. + \frac{dy}{dt} \left[ \frac{E_0}{c} J_1 \left(y_{01}, \frac{y}{y_0}\right) \cos(\omega t + \varphi_0) + B_z \right] \right\}$$

и вне резонатора ( $|x| > h$ ,  $y > y_0$ ):

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{e}{m_0} \sqrt{1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} \cdot \left(-\frac{dx}{dt} B_z\right), \quad (2)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{e}{m_0} \sqrt{1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} \cdot \left(\frac{dy}{dt} B_z\right),$$

где

$e$ ,  $m_0$  — заряд и масса покоя электрона;

$E_0$  — амплитуда напряженности электрического поля на оси резонатора;

$J_0 \left(y_0, \frac{y}{y_0}\right)$ ,  $J_1 \left(y_{01}, \frac{y}{y_0}\right)$  — функции Бесселя нулевого и первого порядка;

$B_z$  — индукция постоянного магнитного поля;

$\varphi_0$  — начальная фаза движения электрона относительно ускоряющего напряжения.

Аналитическое решение этих уравнений довольно трудоемко, так как расчет необходимо провести для большого числа начальных значений и параметров ускоряющего промежутка. АВМ в силу простоты программирования и достаточного быстродействия позволяют получить за короткое время большое количество решений.

Непрерывность процесса решения, то есть переход от системы (1) к системе (2), обеспечивается с помощью специально разработанного переключающего устройства. Использование для этой цели реле нецелесообразно из-за длительного времени переключения контактов, сравнимого со временем решения уравнений траектории в ускоряющем промежутке. Разработаны и использованы электронные переключающие устройства на основе вакуумных диодов и операционных усилителей, которые набираются на типовых элементах АВМ. На рис. 2 приведена схема программного переключающего устройства, обеспечивающая выделение области, ограниченной тремя прямыми.

Диоды  $D_3$ ,  $D_4$ ,  $D_5$ ,  $D_6$  и усилитель 4 представляют схему ключа, который выполняет переключения напряжений любой полярности. Диоды  $D_1$ ,  $D_2$  и усилители 2, 3 создают сигнал управления, выделяющий область  $|x| \leq h$ . Диоды  $D_7$ ,  $D_8$  и усилители 5, 6 создают сигнал управления, выделяющий область  $y \leq b$ , где  $b$  и  $h$  — высота и полуширина резонатора.

Включение ключа между входным сопротивлением усилителя и суммирующей точкой, потенциал которой близок к нулю, позволяет значительно уменьшить влияние управляющих сигналов на управляемое

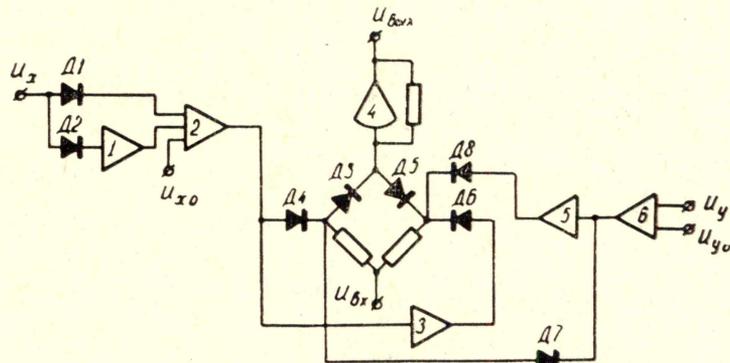


Рис. 2. Схема программного устройства

напряжение. Количество управляющих сигналов, подаваемых на схему ключа, определяется в зависимости от конфигурации области ограничения.

### Исследование вывода ускоренных частиц в циклических ускорителях

Для проведения физических экспериментов пучки заряженных частиц выводятся из камер ускорителей. При этом нужно обеспечить смещение частиц с равновесной орбиты к выводному каналу и осуществить вывод. Для получения эффективного вывода ускоренных частиц нужно знать траектории всех частиц при внешнем возмущении и соответственно выбрать требуемое возмущение. В известных методах исследования невозможно оценить поведение всего пучка выводимых частиц в процессе вывода. Получить такую оценку можно путем представления характеристик пучка на фазовой плоскости. Из-за нелинейности фокусирующих сил в данном случае невозможно оценить поведение пучка по огибающей, так как нелинейность приводит к искажению фазового эллипса [1]. Решение проводилось для случая, когда смещение частиц с равновесной орбиты достигалось за счет несимметричного смещения равновесной орбиты. Движение частиц при этом описывается уравнением

$$\frac{d^2x}{d\theta^2} + F(x) = r_0 \delta(\theta), \quad (3)$$

где  $x$  — отклонение от равновесной орбиты;  
 $\theta$  — азимут частицы;  
 $r_0$  — радиус равновесной орбиты;  
 $\delta(\theta)$  — возмущение;  
 $F(x)$  — фокусирующая сила.

Возмущения, вызывающие несимметрию равновесной орбиты, могут находиться на различных азимутах. В зависимости от положения возмущения необходимо предусмотреть наличие переключающего устройства, обеспечивающего непрерывность процесса решения. Схема решения уравнения, описывающего вывод частиц, представлена на рис. 3. В данном случае возмущение подается на азимуте от  $\pi$  до  $2\pi$ , и величина возмущения линейно возрастает от 0 до  $\delta$ .

В случае расстановки возмущения на различных азимутах необходимо предусмотреть дополнительные переключающие устройства.

### Автоматическая оптимизация систем транспортировки пучков заряженных частиц

Система транспортировки пучков заряженных частиц ускорителей в общем случае представляет собой сложную электронно-оптическую систему, состоящую из некоторого набора фокусирующих и юстирующих элементов. При разработке и исследовании систем транспортировки пучков заряженных частиц одной из основных проблем является задача отыскания такого набора параметров электронно-оптической системы, которые бы наиболее полно отвечали поставленным требованиям. Анализ и синтез таких систем с целью выбора оптимальных параметров представляет сложную задачу и требует применения средств вычислительной техники и устройств, реализующих тот или иной метод поиска. Поиск оптимальных параметров электронно-оптической системы для конкретных условий ее применения в ускорителях различного типа может производиться по следующим критериям:

1. Выбор оптимальных параметров системы из условия согласования характеристик (эмиттанса) пучка на выходе тракта с характеристиками, удовлетворяющими заданным требованиям.
2. Выбор оптимальных параметров из условия обеспечения транспортировки пучка заряженных частиц без потерь с минимально возможной стоимостью системы.
3. Выбор оптимальных параметров системы из условий обеспечения первого и второго критерия одновременно.

Выбор оптимальных параметров тракта транспортировки может быть сравнительно легко и просто осуществлен на АВМ с использованием разработанной нами корреляционно-экстремальной системы [4]. Рассмотрим решение задачи согласования эмиттанса инжектируемого пучка с адмитансом ускорителя. Подобная задача решается при внешней инжекции в мощных циклических ускорителях [5].

Поиск оптимальных параметров формирующей системы осуществляется следующим образом: на АВМ решается уравнение амплитудной функции  $\beta$ , которое характеризует изменение параметров пучка на фазовой плоскости при его движении вдоль тракта [3]. Напряжение, характеризующее в выбранном масштабе амплитудную функцию  $\beta$  и ее производную на выходе тракта, поступает на устройство преобразования (генерирования) фазового эллипса. Построение фазового эллипса, например, для горизонтальной плоскости, по полученным значениям  $\beta$  и  $\beta'$  осуществляется путем решения уравнения

$$x_{1,2} = \frac{1}{\beta} \left[ \pm \sqrt{\epsilon\beta - x^2} + \frac{1}{2} \beta' x \right], \quad (10)$$

$x$  — поперечное смещение частицы от оси,  
 $x'$  — ее угловая расходимость.

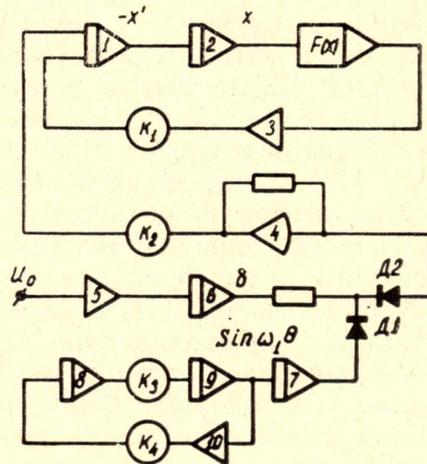


Рис. 3. Структурная схема для решения уравнения (3)

Напряжение, пропорциональное переменной  $x$  в уравнении (10), задается генератором линейно-растущего напряжения, уровень которого изменяется дискриминатором  $x_{\max}$  так, чтобы при изменении  $\beta$  в процессе решения всегда выполнялось условие

$$x_{\max} = V\sqrt{\varepsilon\beta}. \quad (11)$$

Для воспроизведения эммитанса пучка в виде оптического изображения на экране электроннолучевой трубки разработано специальное фотоэлектронное сканирующее устройство, с помощью которого осуществляется засветка площади фазового эллипса, расположение и форма которого изменяется в зависимости от параметров  $K_i$  фокусирующих линз [6]. В оптическом корреляторе производится сравнение эммитанса пучка на выходе тракта, полученного при определенных значениях коэффициентов  $K_i$ , с адмитансом ускорителя. В качестве вычислительного устройства оптического типа используется оптический коррелятор Берджера [7]. С помощью оптимизатора ОП осуществляется поиск параметров электронно-оптической системы, при которых получается максимальное согласование эммитанса пучка на выходе тракта с адмитансом основного ускорителя. Поиск оптимальных параметров  $K_{i\text{opt}}$  осуществляется по одному из алгоритмов стохастического поиска, например, по алгоритму покоординатного самообучения с произвольным законом изменения вероятности [8]. Переключения в структурной схеме для решения уравнения амплитудной функции  $\beta$  и синхронизация работы экстремальной системы осуществляются специальным программным устройством.

Если же необходимо минимизировать стоимость системы транспортировки пучка заряженных частиц, то выбирается в качестве минимизируемой функции объем воздушного зазора для всех магнитов системы

$$V = \sum_{i=1}^n l_i \sqrt{\varepsilon_x \cdot \varepsilon_z \cdot \beta_i^{(x)} \cdot \beta_i^{(z)}}, \quad (12)$$

где

$n$  — количество формирующих элементов системы транспортировки;  
 $l_i$  — длина  $i$ -го элемента.

В этом случае для поиска оптимальных параметров фокусирующей системы в состав экстремальной системы введено дополнительное устройство для вычисления

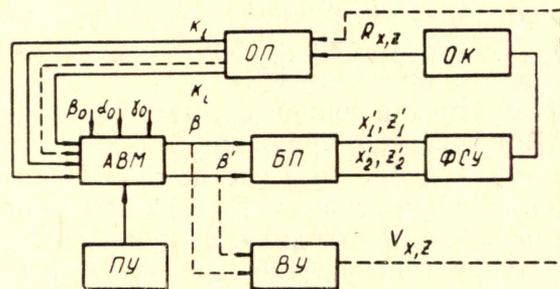


Рис. 4. Блок-схема устройства для оптимизации параметров системы транспортировки пучков заряженных частиц

объема по выражению (12). Устройство для вычисления объема выполнено на стандартных блоках АВМ.

На рис. 4 показана блок-схема устройства для оптимизации параметров системы транспортировки пучков заряженных частиц

С помощью разработанного аналогового вычислительного устройства был произведен расчет и поиск оптимальных параметров

тракта инъекции синхротрона на 1,5 ГэВ НИИ ЯФЭА при Томском политехническом институте [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Ливингуд. Принципы работы циклических ускорителей. Перевод с англ., ИЛ, 1963.
2. Н. Rogenhagen und F. Haberstok. Zeitschrift für Angewandten Physik, 19, Band., Heft 1, Berlin (1965), S. 5—10.
3. В. А. Кочегуров, Н. В. Триханова. Электронная техника, I, I, № 1, 1967.
4. В. П. Иванченков, В. А. Кочегуров, Г. А. Желтовский. Применение оптического коррелятора для расчета тракта инжекции ускорителей. Тезисы доклада XXI научно-технической конференции ЛИАП. Л., 1967.
5. А. А. Воробьев и др. Синхротрон ТПИ на 1,5 Гэв, М., Атомиздат, 1968.
6. В. П. Иванченков, Г. А. Желтовский, Фотоэлектронное сканирующее устройство для анализа систем транспортировки пучков заряженных частиц. Тезисы доклада научно-технической конференции, посвященной Дню радио. Томск, 1968.
7. F. V. Berger. Optical Cross-Correlator, Patent of United States of America, № 27 87188, 1957.
8. А. А. Растрингин. Статистические методы поиска. М., Изд-во «Наука», 1968.