

ИССЛЕДОВАНИЕ НА АВМ ПОВОРОТА ПУЧКА МИКРОТРОНА ВОКРУГ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ ФОРМИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

В. П. ИВАНЧЕНКОВ, П. А. ДЮГАЙ, Л. В. ШИЛЯГИНА

(Представлена научным семинаром АВТА)

При транспортировке пучка от инжектора к основному ускорителю ставится задача проводки пучка без потерь и формирование на выходе тракта инжекции характеристик пучка, наиболее полно удовлетворяющих условиям захвата частиц в ускорение. Характерной особенностью инжектора синхротрона ТПИ на 1,5 Гэв является то, что горизонтальный эмиттанс ϵ_x выведенного из микротрона пучка имеет большие размеры, чем эмиттанс пучка в вертикальной плоскости ϵ_y , в то же время горизонтальный адмиттанс синхротрона значительно меньше, чем адмиттанс в вертикальной плоскости. В этой связи было предложено для увеличения коэффициента захвата электронов в ускорение на первом этапе инжекции осуществить «перекачку» частиц из горизонтальной плоскости в вертикальную и наоборот и тем самым как бы произвести замену горизонтального эмиттанса на вертикальный, а вертикального на горизонтальный [1].

Такую «смену» эмиттансов можно осуществить двояко: повернув плоскость магнита микротрона на 90° или повернув на такой же угол пучок на выходе микротрона. Первый вариант в нашем случае сопряжен с большими техническими трудностями, поэтому нами решалась задача поворота пучка вокруг оптической оси системы с помощью неоднородного аксиально-симметричного магнитного поля короткой линзы. Из [2, 3] известно, что линза будет короткой, если протяженность поля ее мала по сравнению с фокусным расстоянием.

В цилиндрической системе координат $\{r, \varphi, z\}$ движение электрона в поле короткой линзы описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d^2 r}{dz^2} = -\frac{e}{8 m_0 \Phi_r} B_z^2 r, & (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dz} = \sqrt{\frac{e}{8 m_0 \Phi_r}} B_z, & (2) \end{cases}$$

где $\frac{e}{m_0}$ — удельный заряд электрона,

Φ_r — релятивистский потенциал, определяемый через ускоряющий потенциал Φ соотношением

$$\Phi_r = \Phi \left(1 + \frac{e\Phi}{2 m_0 c^2} \right), \quad (3)$$

B_z — распределение индукции магнитного поля вдоль оси z .
 B_z было выбрано в виде

$$B_z = \frac{B_0}{1 + \left(\frac{z}{d}\right)^2}, \quad (4)$$

которое хорошо аппроксимирует поле короткой линзы [2]. Здесь B_0 — максимальное значение B_z , d — полуширина, характеризует протяженность поля. Уравнение (1) описывает траекторию движения электрона в плоскости, вращающейся вместе с электроном вокруг оптической оси системы с угловой скоростью, определяемой выражением (2).

Задача решалась на аналоговой вычислительной машине МН-14.

Решение сводилось к нахождению такого значения B_0 , при котором пучок при прохождении линзы повернулся бы на 90° . Решение проводилось в цилиндрической системе координат с параллельным преобразованием результатов в декартову систему по соотношениям

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi; \\ y = r \sin \varphi; \\ x' = r' \cos \varphi - r \sin \varphi \varphi'; \\ y' = r' \sin \varphi + r \cos \varphi \varphi'. \end{cases} \quad (5)$$

Структурная схема решения задачи приведена на рис. 1. Интегратор 1, функциональный блок 2 и масштабный блок 3 используются для воспроизведения распределения магнитной индукции B_z , блоки перемножения

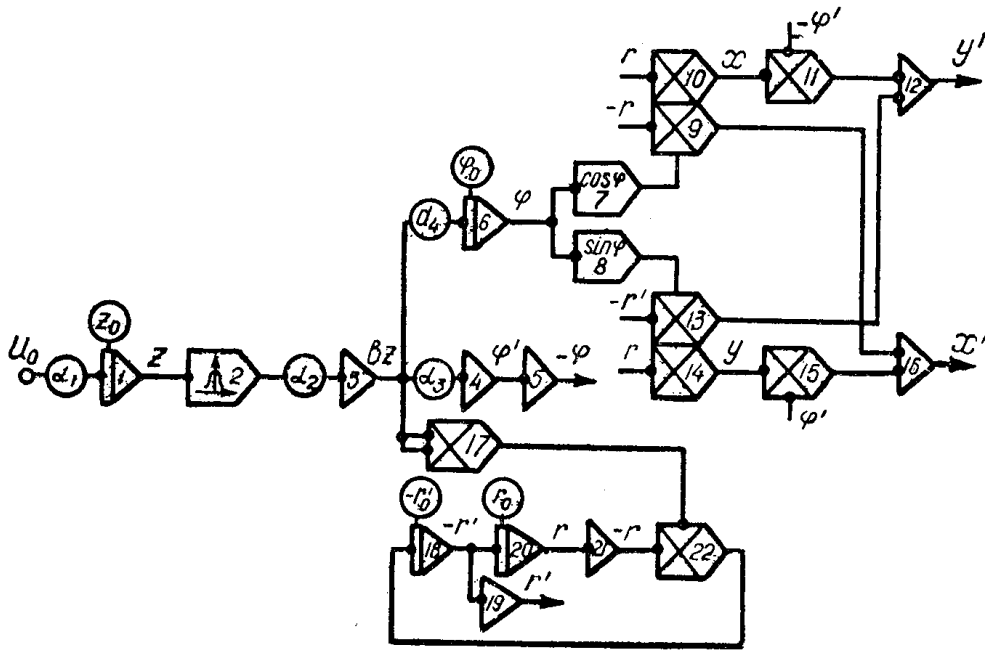


Рис. 1. Структурная схема модели

17,22, интеграторы 18,20 и инверторы 19,21 осуществляют решение уравнения (1), интегратор 6 — уравнения (2), а схема, собранная на основе тригонометрических блоков 7 и 8, блоков перемножения 9, 10, 11, 13, 14, 15 и сумматоров 12 и 16, осуществляет преобразование результатов решения из цилиндрической системы координат в декартову систему.

В ходе решения прослеживалась траектория движения крайних (граничных) частиц в фазовых плоскостях xx' , yy' и в плоскости xu при вращении пучка относительно оптической оси на 90° .

В цилиндрической системе координат частицы в горизонтальной плоскости удовлетворяют условию $\varphi_0=0$. Если источник электронов расположен вне поля линзы, то $\varphi_0'=0$. Это условие в нашем случае выполняется, поэтому из (5) следует, что

$$x_0=r_0, x_0'=r_0', \text{ а } y_0=0 \text{ и } y_0'=0.$$

Начальные условия $r_0=x_0$ на блок 20, и $r_0'=x_0'$ на блок 18 задавались для конкретных значений x_0, x_0' горизонтального эмиттанса ε_x (рис. 2).

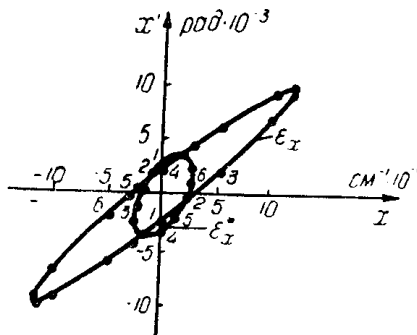


Рис. 2. Горизонтальные эмиттансы: ε_x — начальная, ε_x^* — конечный

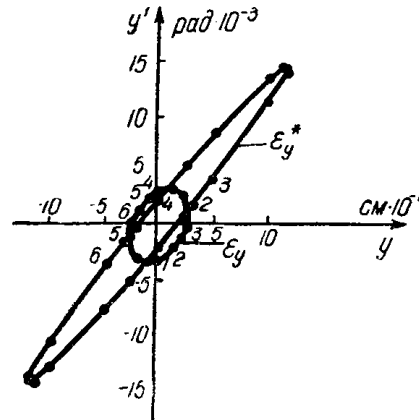


Рис. 3. Вертикальные эмиттансы: ε_y — начальный, ε_y^* — конечный

Результаты решения приведены на рис. 4, 5, 6. Из этих рисунков видно, что траектории частиц, первоначально имевших отклонение x_0 и расходимость x_0' , в результате прохождения через магнитную линзу, поворачивающую пучок на 90° , сходятся на фазовой плоскости xx' в начало координат (рис. 5), а в плоскости yy' (рис. 6) эти же частицы, выйдя из начала координат, приобретают некоторые значения y и y' .

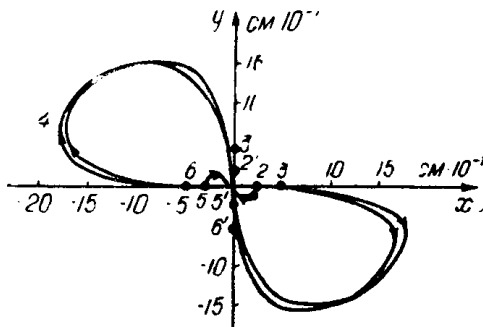


Рис. 4. Проекция траектории движения на плоскость xu при повороте на 90° для частиц горизонтальной плоскости

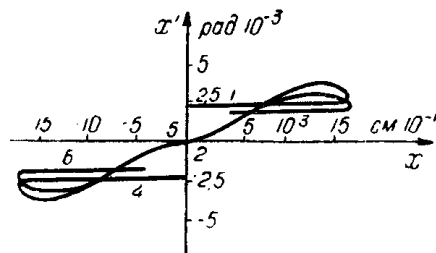


Рис. 5. Проекция траектории движения на плоскость xx' при повороте на 90° для частиц горизонтальной плоскости

Таким образом, осуществляется «перекачка» частиц из горизонтальной плоскости xx' в вертикальную плоскость yy' . Проекция траекторий движения частиц на плоскость xu приведены на рис. 4.

Точкам 1, 2, ..., 6 на горизонтальном эмиттансе ϵ_x (рис. 2) соответствуют кривые 1, 2, ..., 6 на рис. 4, 5 и 6.

Частицы в вертикальной плоскости удовлетворяют условию $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ поэтому для них из (5) $x_0 = 0, x_0' = 0, y_0 = r_0, y_0' = r_0'$. Задавая начальные условия $r_0 = y_0, r_0' = y_0'$ для конкретных значений y_0, y_0' вертикального эмиттанса ϵ_y (рис. 3), получали траектории движения частиц, первоначально находившихся в вертикальной плоскости (рис. 7, 8, 9).

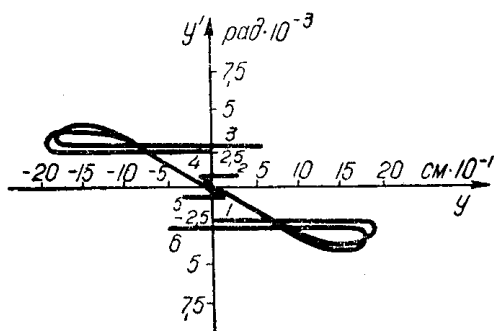


Рис. 6. Проекция траектории движения на плоскость yy' при повороте на 90° для частиц горизонтальной плоскости

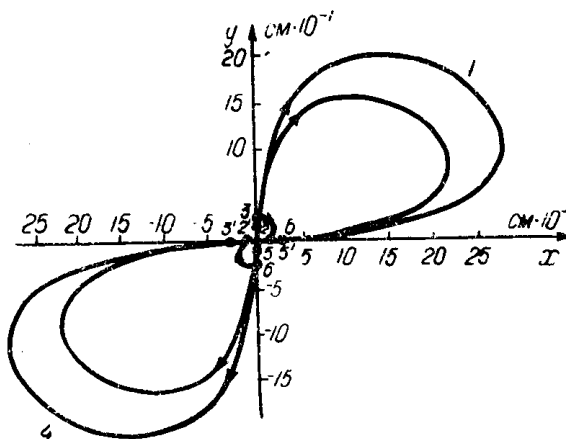


Рис. 7. Проекция траектории движения на плоскость xy при повороте на 90° для частиц вертикальной плоскости

Из рис. 8 и 9 видно, что происходит такая же «перекачка» частиц из вертикальной плоскости yy' в горизонтальную плоскость xx' .

Из сравнения фазовых характеристик ϵ_x, ϵ_y на входе и $\epsilon_x^*, \epsilon_y^*$ на выходе линзы видно, что форма и расположение ϵ_x^* и ϵ_y^* несколько изменились. При этом эмиттанс ϵ_x^* стал равен значению ϵ_y , а ϵ_y^* равен ϵ_x .

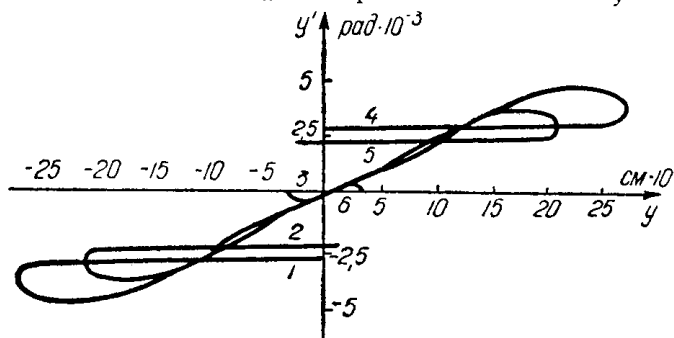


Рис. 8. Проекция траектории движения на плоскость xx' при повороте на 90° для частиц вертикальной плоскости.

Исследование показало, что внутри линзы наблюдается существенный рост радиуса r . Максимальное значение r_{\max} в несколько раз превышает значение радиуса на входе линзы. Значение r_{\max} определяет выбор апертуры поворотной линзы. Значение r_{\max} уменьшается при сжатии поля по оси z . Но так как поворот пучка вокруг оптической оси должен остаться прежним $\left(\frac{\pi}{2}\right)$, то величина интеграла $\int_{z_0}^z B_z dz$ не

должна измениться. Поэтому сжатие поля по оси z ведет к росту его максимального значения B_0 . Расчеты показали, что при полуширине поля $d=2$ см, максимальном значении индукции $B_0=1,328$ тл внутренний диаметр катушки должен быть равен 20 см. Такое концентрированное поле можно создать, используя бронированную магнитную линзу с полюсным наконечником.

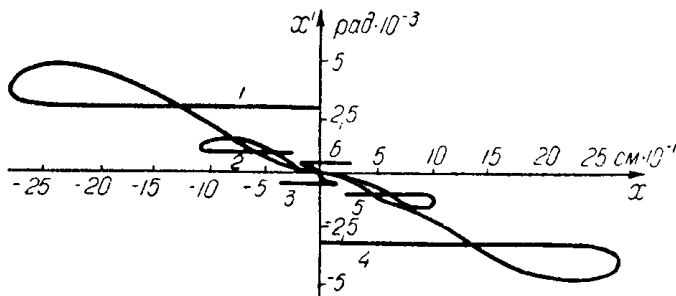


Рис. 9. Проекция траектории движения на плоскость yu' при повороте на 90° для частиц вертикальной плоскости

Проведенные исследования показали, что «смену» эмиттансов пучка на входе тракта можно осуществить с помощью простой магнитной линзы, имеющей неоднородное распределение поля вдоль оси вращения.

Следует отметить, что применение для поворота пучка микротрона однородного магнитного поля соленоида [1] может оказаться неэффективным, так как в однородном поле каждый отдельный электрон имеет собственную ось вращения, не совпадающую в общем случае с оптической осью формирующей системы. Проекция траектории движения на плоскость, перпендикулярную силовым линиям, представляет окружность с радиусом

$$\rho = \frac{mV_n}{eB_z}, \quad (6)$$

где V_n — поперечная составляющая скорости движения частицы. Из (6) видно, что на электроны, движущиеся параллельно оптической оси, однородное магнитное поле вообще не оказывает никакого действия. В этой связи не удастся повернуть полностью пучок на 90° и осуществить полную «перекачку» частиц из одной плоскости в другую, например, из горизонтальной в вертикальную.

Проведенные расчеты по выбору оптимальных параметров формирующих элементов тракта инжекции показали [4], что поворот пучка микротрона на 90° позволяет увеличить коэффициент захвата на первом этапе инжекции в $1,5 \div 2$ раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Г. Знякаев, А. Д. Ошеско, И. П. Чучалин, М. Г. Шивырталов, П. М. Шапин. Поворот эмиттанта инжектора-микротрона. Труды VII межвузовской конференции по ускорителям. Атомиздат, 1970.
2. В. Глазер. Основы электронной оптики. М., Гостехиздат, 1957.
3. В. М. Кельман, С. Я. Явор. Электронная оптика. Л., «Наука», 1968.
4. В. П. Иванченков, П. А. Дюгай, В. А. Кочегуров. Разработка и исследование корреляционно-экстремальной системы для оптимизации параметров трактов транспортировки пучков заряженных частиц. Научный отчет НИИ ЯФЭА № 03825. Томск, 1970.