

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАКТА ИНЖЕКЦИИ СИНХРОТРОНА НА ЭНЕРГИЮ 1,5 Гэв

П. А. ДЮГАЙ, В. П. ИВАНЧЕНКОВ, В. А. КОЧЕГУРОВ

(Представлена научным семинаром АВТА НИИ ЯФЭА)

В данной статье приводятся результаты исследований тракта инжекции синхротрона на энергию 1,5 Гэв методом математического моделирования и производится выбор его оптимальных параметров и структуры. Синхротрон имеет многооборотную инжекцию. Система инжекции синхротрона состоит из инжектора-микротрона на 5,5 Мэв и тракта транспортировки электронов. Фокусировка пучка при его транспортировке осуществляется двумя парами квадрупольных линз.

Электронный пучок на выходе микротрона в фазовом пространстве X, X', Z, Z' занимает определенную область, ограниченную замкнутой кривой. Экспериментальные исследования синхротрона показали, что огибающая кривой может быть представлена в форме эллипса, уравнение которого в нормализованной форме записывается [2]

$$\gamma(Y) X^2 + 2\alpha(Y) X X' + \beta(Y) X'^2 = \varepsilon, \quad (1)$$

где

$$\varepsilon = \frac{F}{\pi} \text{ — эмиттанс пучка,}$$

F — площадь фазового эллипса,

α, β, γ — коэффициенты фазового эллипса,

Y — расстояние вдоль тракта транспортировки пучка заряженных частиц.

Экспериментальные значения горизонтального и вертикального эмиттансов на входе тракта инжекции равны

$$\varepsilon_x = 29 \cdot 10^{-3} \text{ мм рад; } \varepsilon_z = 8,56 \cdot 10^{-3} \text{ мм рад.}$$

В синхротроне в процессе ускорения захватываются только те частицы, которые имеют определенный угол и отклонение от оптической оси тракта. Вертикальный адмитанс синхротрона описывается уравнением эллипса и является величиной постоянной в процессе инжекции.

Горизонтальный (радиальный) адмитанс синхротрона имеет более сложный характер, так как область, удовлетворяющая условиям захвата в плоскости ρ, γ , в процессе инжекции не остается постоянной и зависит от времени инжекции τ_j [3]. Вход частиц в камеру основного ускорителя осуществляется электростатическим инфлектором. Пластины инфлектора ограничивают возможное отклонение электронов от

оптической оси тракта инжекции, что приводит к потере частиц на пластинах инфлектора. Пластины инфлектора на фазовой плоскости X, X' и Z, Z' изображаются в виде параллелограмма [2].

Выбор оптимальных коэффициентов квадрупольных линз тракта транспортировки необходимо производить из условий согласования эмиттансов пучка на выходе тракта с адмитансом синхротрона (рис. 1) в горизонтальной и вертикальной плоскости с учетом «ограничений», вносимых пластинами отклоняющего устройства при транспортировке пучка. «Ограничения», вносимые внешними пластинами инфлектора, учитываются путем наложения изображения пластин на соответствующий адмитанс ускорителя, т. е. согласование эмиттанса пучка на выходе тракта производится с областью на фазовой плоскости, полученной в результате наложения изображения пластин инфлектора на соответствующий адмитанс ускорителя (рис. 1).

Определение оптимальных параметров и структуры формирующей системы производилось на аналоговой вычислительной машине МНБ-1

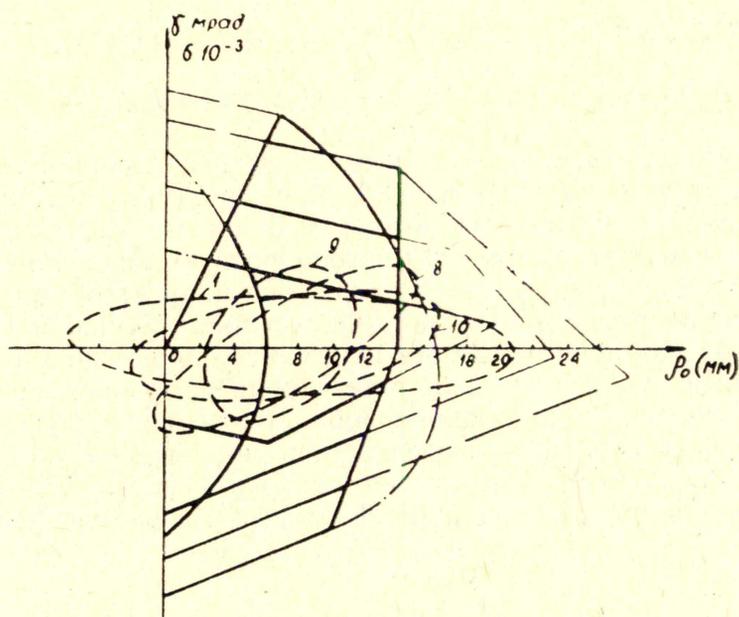


Рис. 1. Диаграммы, поясняющие условия определения оптимальных параметров тракта инжекции синхротрона

с использованием разработанной нами корреляционно-экстремальной системы [1, 2]. При расчете радиальной адмитанс синхротрона задавался для некоторых дискретных значений времени инжекции τ_j . Для каждого значения адмитанса, соответствующего моменту времени τ_j , производился поиск наилучшего варианта параметров K_i . В результате расчета за оптимальный вариант принимался тот, при котором средние потери частиц были наименьшими. Расчет средних потерь частиц для горизонтальной плоскости проводился по следующему выражению:

$$S_{\text{ср.х}} = \frac{S_{\tau_1} + S_{\tau_2} + \dots + S_{\tau_j}}{\pi n \varepsilon_x}, \quad (2)$$

где

S_{τ_j} — потери частиц в момент времени инжекции τ_j .
 n — число интервалов усреднения.

В табл. 1 приведены полученные в процессе расчета оптимальные варианты значений параметров квадрупольных линз K_i для нескольких расстановок вдоль тракта инжекции. Первая расстановка линз

соответствует принятой в настоящее время расстановке квадрупольных линз вдоль тракта инжекции синхротрона. На рис. 3 приведены осциллограммы, показывающие изменение характеристик фазового эллипса пучка в горизонтальной плоскости симметрии формирующей системы при его транспортировке от инжектора в камеру ускорителя. Для оптимального варианта коэффициентов квадрупольных линз при первой расстановке линз потери частиц в процессе инжекции в горизонтальной плоскости составляют 45%. В вертикальной плоскости потери частиц отсутствуют, т. е. вертикальный эмиттанс микротрона после преобразования полностью входит в вертикальный адмитанс синхротрона. С целью уменьшения потерь частиц в процессе инжекции была изменена расстановка линз вдоль тракта (вариант 3 ÷ 5, табл. 1). Проведенные расчеты показали, что выбранные расстановки линз вдоль

Таблица 1

№ п.п.	Расстановка линз	K_1 M^{-2}	K_2 M^{-2}	K_3 M^{-2}	K_4 M^{-2}	S_{nx}	S_{nz}	S_{cp}
1	I	22,5	20,25	14,5	2,25	45,5	0	45,5
2	I	19,5	13,25	10	2,5	49,2	0	49,2
3	II	18,5	12,25	10	2,5	43,9	0	43,9
4	III	21,5	15,75	11,25	2	50,6	0	50,6
5	IV	23	19,75	12,75	2	50,4	0	50,4
6	V	19,5	13,25	10	—	45,8	0	45,8
7	VI	17,75	15,0	10,25	—	47,22	0	47,22
8	I	17,5	22,5	10,75	3	15,6	4,4	20,0
9	V	17,5	22,5	10,75	—	13,1	10,2	23,3
10	I	18,25	20,25	10,75	—	24,32	0	24,32

тракта не приводят к значительному улучшению согласования эмиттанса пучка на выходе тракта с адмитансом синхротрона. При расчете был также исследован тракт транспортировки, состоящий из трех квадрупольных линз вдоль тракта инжекции (варианты 6,7 табл. 1). Из табл. 1 видно, что транспортировка пучка от инжектора в ускоритель может быть осуществлена системой из трех линз, в среднем с тем же эффектом, что и системой, состоящей из четырех квадрупольных линз. В то же время применение электронно-оптической системы, состоящей из трех квадрупольных линз, позволяет освободить пространство на тракте инжекции синхротрона для размещения дополнительной экспериментальной аппаратуры. Измерения токопроводимости по тракту инжекции и через инфлектор показали, что при параметрах квадрупольных линз, приведенных в табл. 1 (варианты 1, 2), удается получить максимальный ток на выходе инфлектора. Измерения проводились на цилиндрах Фарадея на выходе микротрона и за инфлектором. Эмиттанс микротрона в горизонтальной плоскости имеет значительно большие размеры, чем в вертикальной, в то же время область, удовлетворяющая условиям захвата в вертикальной плоскости, 2 ÷ 3 раза превосходит по площади область, удовлетворяющую условиям захвата частиц в ускорение в горизонтальной плоскости. В связи с этим было высказано предположение о целесообразности поворота эмиттанса пучка на 90°. Такой поворот можно осуществить, поворачивая плоскость магнита инжектора на 90° относительно плоскости синхротрона или с помощью аксиально симметричного магнитного поля короткой линзы.

Проведенные расчеты подтвердили правильность сделанного предположения (табл. 1, варианты 8 ÷ 10).

Варианты 8—9 получены при повернутом эмиттансе на входе тракта, вариант 10 — на выходе тракта (рис. 1). Осциллограммы эмиттансов пучка на выходе тракта в горизонтальной и вертикальной плоскостях симметрии для оптимальных параметров квадрупольных линз (вариант 8,9 — поворот эмиттанса пучка на входе тракта на 90°) приведены на рис. 4. С учетом энергетического разброса инжектируемого

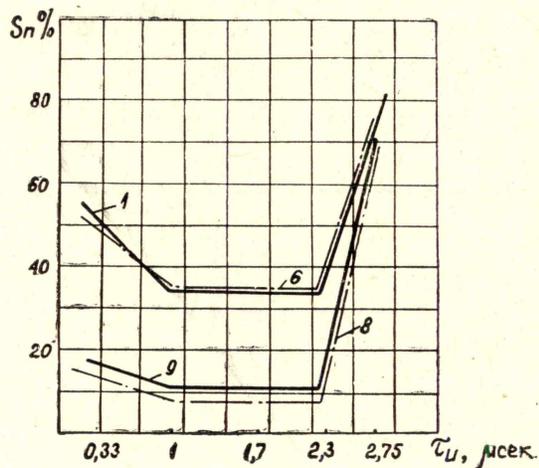


Рис. 2. Зависимость изменения средних потерь частиц для различных параметров формирующей системы от времени инжекции

пучка поворот эмиттансов пучка на 90° на входе тракта (вариант 8, 9) позволяет увеличить коэффициент захвата на первом этапе инжекции в 1,5—2 раза.

В настоящее время на синхротроне проводится разработка системы поворота эмиттансов на 90° . На рис. 2 показаны расчетные зависимости $S_{ср} = f(\tau)$ для полученных оптимальных вариантов коэффициентов квадрупольных линз 1, 6, 8, 9 (табл. 1). Из рис. 2 видно, что наибольшие потери частиц происходят в начале и в конце первого этапа инжекции. В интервале времени инжекции $\tau_{и} = 1 \div 2,3 \text{ мсек}$ потери частиц остаются постоянными. Опыт проведенного исследования тракта инжекции синхротрона показал, что разработанная корреляционно-экстремальная система позволяет в 30—40 раз сократить время, необходимое для анализа и синтеза наилучшей структуры тракта транспортировки, и произвести выбор оптимальных параметров с достаточной для инженерной практики точностью.

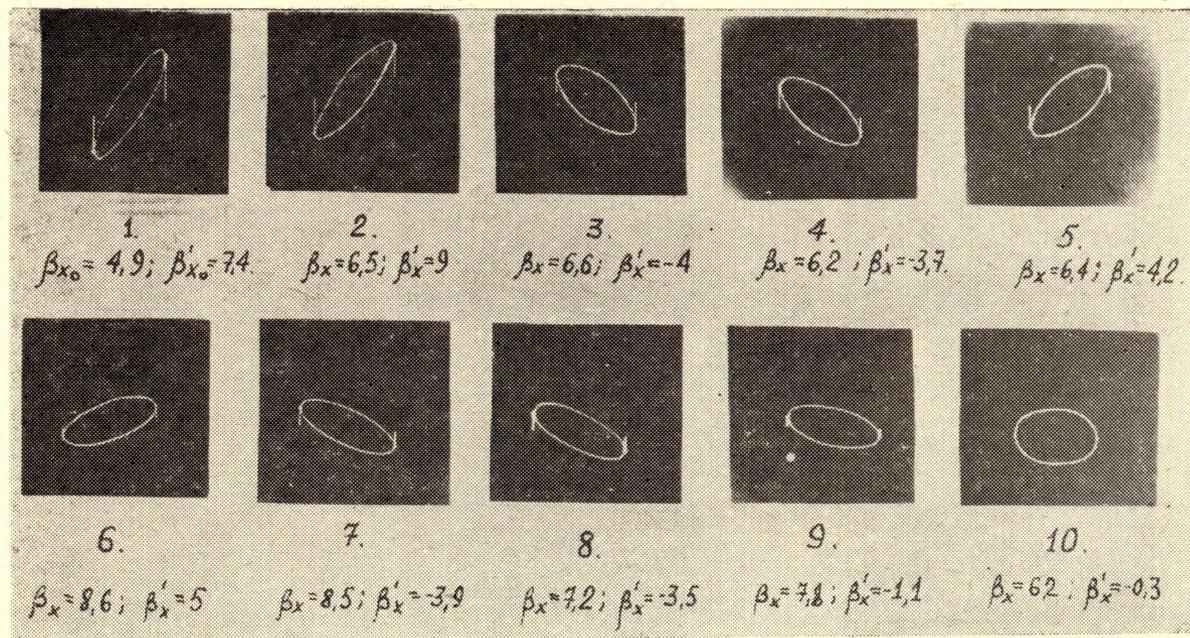


Рис. 3. Изменение параметров фазового эллипса пучка при его движении вдоль тракта инжекции: 1 — горизонтальный эмиттанс на входе тракта инжекции; 2 — эмиттанс на входе 1 квадрупольной линзы; 3 — эмиттанс на выходе 1 квадрупольной линзы; и т. д.; 10 — эмиттанс на выходе тракта инжекции

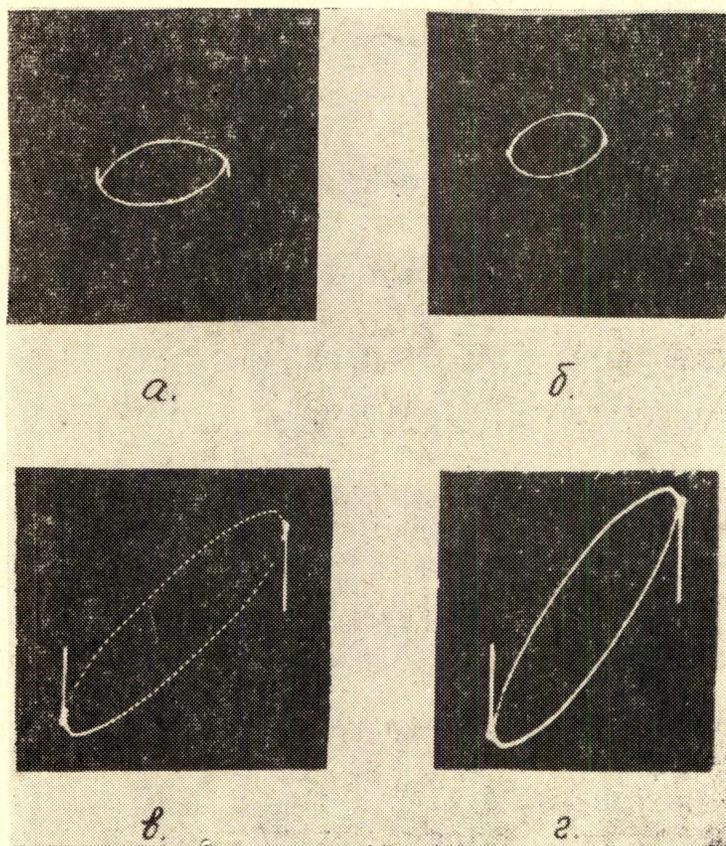


Рис. 4. Осциллограммы эмиттансов пучка на выходе тракта при его повороте на 90° : *а, в* — горизонтальный и вертикальный эмиттансы для оптимального варианта параметров формирующей системы, состоящей из двух пар линз; *б, г* — горизонтальный и вертикальный эмиттансы для оптимального варианта параметров формирующей системы, состоящей из 3 линз

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Иванченков, В. А. Кочегуров. Разработка и применение экстремальных систем в задачах электронной оптики. Тезисы доклада IV Всесоюзного симпозиума по экстремальным задачам, Каунас, 1969.
2. Н. В. Триханова, В. А. Кочегуров. Расчет на аналоговой вычислительной машине электронно-оптических систем с учетом фазового объема пучка. «Электронная техника», серия I, вып. 1, 1967.
3. М. П. Щанин. Вопросы разработки, создания и исследования системы инжекции синхротрона на 1,5 Гэв. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, ТПИ, 1966.