Fermilab Library
0 1160 0063182 4

Институт теоретической и
экспериментальной физики

2-98

ITEP-2-98

И.А.Воробьёв, С.А.Высоцкий

ОПТИМИЗАЦИЯ СОГЛАСУЮЩЕГО КАНАЛА УСКОРИТЕЛЯ "ИСТРА-36". ПРОГРАММЫ РАСЧЁТА.

FERMILAB
JUL 17 1998
LIBRARY

Москва 1998

УДК 621.387.324 М-16

ОПТИМИЗАЦИЯ СОГЛАСУЮЩЕГО КАНАЛА УСКОРИТЕЛЯ "ИСТРА-36". ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА: Препринт ИТЭФ 2-98/

И.А.Воробьев, С.А.Высоцкий - М., 1998 - 20с.

На примере канала транспортировки пучка от создаваемого источника протонов к существующей секции с ПОКФ ускорителя "Истра-36" показана методика подготовки начальных данных для оптимизации параметров канала с помощью программ TRANSPORT, GIOSP, TRACE 3-D, PREINJ. На основе анализа функциональных возможностей программ обоснован выбор TRACE 3-D для вычислений. Приводятся полученные результаты. Сформулированы направления совершенствования матричных оптимизирующих программ.

On the example of the canal for transportation of the beam from creating source of the protons to the existing section RFQ of the accelerator "Istra-36" the procedure of the preparation inital data for the optimization the parameters of the canal with assistance of the programs TRANSPORT, GIOSP, TRACE 3-D, PREINJ was showed. On the base of the analysis of the functional resources of the programs the choice of TRACE 3-D for calculations was grounded. Substantiate the obtained results. Formulated directions of the developing matrix optimizing programs.

Рис. - 4, список лит. - 14 наим.

© Институт теоретической и экспериментальной физики, 1998

В настоящее время в ИТЭФ проводятся работы по модернизации ускорителя "Истра-36" [1] для создания на его базе многоцелевой облучательной установки. Пучок с энергией 36 МэВ предполагается направлять на бериллиевую мишень, расположенную в центре субкритической реакторной сборки, образуя первую действующую модель трансмутационной установки. Предусматривается возможность вывода пучка с энергией 36,10 и 3 МэВ для наработки радионуклидов, производства эмиттеров для томографии, проведения элементного активационного анализа, экспериментального облучения материалов и изделий. В рамках этих мероприятий требовалось на ранних этапах проектирования определить технические параметры канала транспортировки пучка от вновь создаваемого источника протонов к существующей ускоряющей секции ПОКФ. Ожидаемые параметры пучка на выходе из источника (ИИ) и требуемые параметры на входе в секцию с ПОКФ

приведены в Таблице 1. Была выбрана конструкция согласующего канала с двумя соленоидами (рис.1). Подобная конструкция применена в ускорителе LEDA (Los Alamos) [2]. Длина всего тракта от выхода источника протонов ИИ до секции с ПОКФ постоянна и составляет 2,8м.

Таблица 1. Характеристики пучка.

Параметры пучка	Источник (ИИ)	Вход ПОКФ
Ток пучка (мА)	300	300
Энергия частиц (кэВ)	100	100
Диаметр пучка R_0 (мм)	20	20
Нормализованный эмиттанс V_n (см мрад)	0,2	0,2
Угол наклона огибающей пучка R_0' (мрад)	100	100

Для моделирования движение заряженных частиц через оптические элементы канала нам были доступны программы: TRANSPORT [3], разработанная в SLAC (Stanford); GIOSP [4,5], разработанная в Гессенском университете; TRACE 3-D [6], разработанная в Лос-Аламосе; Preinj, разработанная в CERN и существенно модернизированная в ИТЭФ.

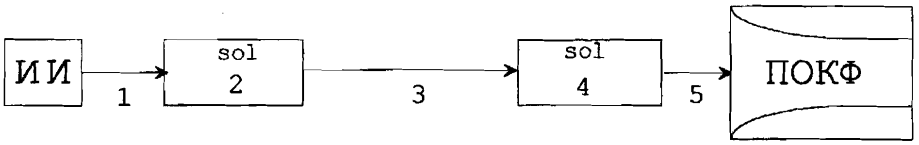

Рис.1. Канал согласования ионного источника ИИ с секцией ПОКФ (sol 2, sol 4 - соленоиды; 1,3,5 - дрейфовые промежутки).

Основные функциональные возможности программ сведены в Таблицы 2 и 3. Применённый в перечисленных выше программах алгоритм позволят путём перемножения вектора $\mathbf{K}(z_1)$, задающего состояние пучка, на матрицу $\mathbf{R}$, описывающую состояние отдельных элементов ускорителя, получить вектор $\mathbf{K}(z_2)$, который характеризует пучок на выходе моделируемого участка ускорителя:

$$\mathbf{K}(z_2)=\mathbf{R}\cdot\mathbf{K}(z_1) \qquad (1).$$

Эти программы позволяют выполнять расчёты в приближении параксиального пучка [7,8], при этом используется модель, согласно которой в начальный момент времени сгустки частиц представляют собой равномерно заряженные трехосные эллипсоиды, оси которых параллельны координатным осям, а центры совпадают с равновесными частицами. Обычно используется правовинтовая криволинейная ортогональная система координат X,Y,Z, в которой ось Z совпадает с траекторией частицы, лежащей

на оси пучка, плоскость XZ горизонтальна, а координаты X>0 расположены слева от оси, если смотреть в направлении движения частиц по оси Z, положительные координаты Y находятся сверху; радиус кривизны r(Z) осевой траектории считается положительным при повороте вправо [9].

Программы, позволяющие рассматривать отклоняющие системы без ускорения (например, GIOSP) требуют задания только поперечных фазовых характеристик пучка: проекций эллипсоида на фазовые плоскости X, P_x, Y, P_y (вместо проекций импульса P_x, P_y часто требуется задать угол траектории с осью системы $P_x = X' \cdot P_z; P_y = Y' \cdot P_z$) - эллипсов, уравнения которых имеют вид:

$$\begin{aligned} \gamma_x X^2 + 2\alpha_x XX' + \beta_x (X')^2 = \varepsilon_x \quad , \\ \gamma_y Y^2 + 2\alpha_y YY' + \beta_y (Y')^2 = \varepsilon_y \end{aligned} \qquad (2)$$

где $\varepsilon_{x,y}$-площади эллипсов, делённые на π.

По условиям нормировки

$$\beta_{x,y}\gamma_{x,y} - \alpha_{x,y}^2 = 1 . \qquad (3)$$

Максимальный угловой полураствор пучка - X'_m, Y'_m и пространственная координата наиболее удалённой точки

пучка $-X_m, Y_m$ связаны с параметрами эллипса соотношениями.

$$X'_m = \sqrt{\varepsilon_x \gamma_x} \quad , \quad Y'_m = \sqrt{\varepsilon_y \gamma_y} \quad . \qquad (4)$$
$$X_m = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x} \quad , \quad Y_m = \sqrt{\varepsilon_y \beta_y}$$

Полезно отметить, что радиус R_0 и угол наклона R'_0 огибающей пучка связаны с параметрами эллипсов $\beta_{x,y}$, $\alpha_{x,y}$ [10], необходимыми для задания начальных условий в программе TRACE 3-D, соотношениями:

$$\alpha_{x,y} = \rho_{x,y} \frac{d\rho_{x,y}}{d\tau}; \ \beta_{x,y} = S\rho^2_{x,y};$$
$$(5)$$
$$S = \beta\lambda; \ \rho_{x,y} = \frac{R_0}{F_0}; \ \frac{d\rho_{x,y}}{d\tau} = R'_0 \cdot \frac{S}{F_0}; \ \tau = \frac{L}{S}; \ F_0 = \sqrt{\frac{S \cdot V_{\Pi_{x,y}}}{\beta\gamma}}.$$

где L - размер системы, V_Π - нормализованный эмиттанс, λ - длина волны ускоряющего поля в свободном пространстве, F_0 - приведённый объём пучка, S - длина периода фокусировки, $\beta\gamma$ - релятивистские параметры. Учитывая, что $V_{\Pi_{x,y}} = \varepsilon_{x,y}\beta\gamma$ и выполнив преобразования, получим соотношения (6) и обратные им соотношения (7):

$$\alpha_{x,y} = \frac{R_{0_{x,y}} R'_{0_{x,y}}}{\varepsilon_{x,y}}; \ \beta_{x,y} = \frac{R^2_{0_{x,y}}}{\varepsilon_{x,y}}. \qquad (6)$$

$$R_{0_{x,y}} = \sqrt{\beta_{x,y}\varepsilon_{x,y}}; \ R'_{0_{x,y}} = \alpha_{x,y}\sqrt{\varepsilon_{x,y}} / \sqrt{\beta_{x,y}}. \qquad (7)$$

Программы, позволяющие проводить вычисления с учётом изменения энергии частиц (в частности TRACE 3-D) требуют задания кроме поперечных ещё и продольных фазовых параметров пучка, которые характеризуются эллипсом (8) на фазовой плоскости $\Delta Z=Z-Z_s$, $\Delta P=P-P_s$:

$$\gamma_z z^2 + 2\alpha_z z\frac{\Delta P}{P_s} + \beta_z\left(\frac{\Delta P}{P_s}\right)^2 = \varepsilon_z, \qquad (8)$$

где Zs, Ps - координата и импульс частицы, скорость которой совпадает с фазовой скоростью ускоряющей волны. В зависимости от особенностей программы в ряде случаев требуется задание продольного движения пучка в координатах $\Delta\varphi$, ΔW (φ - фаза частицы и W - её энергия). Координаты Z и φ [11] связаны соотношением:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta z}{\beta_s\lambda}, \qquad (9)$$

а связь импульса P и энергии частиц W даётся [6] релятивистским соотношением:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\gamma}{\gamma+1}\cdot\frac{\Delta W}{W}. \qquad (10)$$

В новых переменных уравнение эллипса имеет вид:

$$\gamma_z^{(н)}\Delta\varphi + 2\alpha_z^{(н)}\Delta\varphi\Delta W + \beta_z^{(н)}(\Delta W)^2 = \varepsilon_z^{(н)} \qquad (11)$$

согласующих каналов с различными функциональными возможностями. По-видимому, это разнообразие вызвано тем, что в разных лабораториях возникали свои специфические инженерные задачи, под которые создавались собственные программы. К сожалению, их разработчики не полностью учитывали предыдущий опыт и не проводили достаточный анализ достоинств и недостатков имеющихся программ, в связи с чем далеко не всегда удаётся найти требуемый программный продукт, обладающий необходимой функциональной гибкостью и способностью наращивать новые типы структурных элементов в процессе эксплуатации.

По нашему мнению программа, предназначенная для расчёта согласующих и транспортных каналов, должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- должен выполняться трёхмерный анализ движения частиц с учётом пространственного заряда пучка;
- максимально широкий набор типов ускоряюще-фокусирующих элементов;
- возможность добавления специфических элементов и групп элементов канала в базу данных программы;
- функционал оптимизации должен обеспечивать минимальную величину 6-мерного эффективного эмиттанса пучка при согласовании;

Наилучшими возможностями оптимизации параметров канала обладает программа PREINJ. В программу введён обобщённый функционал оптимизации с применением коэффициента согласования, введённого И.М.Капчинским [10]:

$$k = \frac{c+\sqrt{c^2-4}}{2}$$
$$c = \left(\frac{\rho}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^2 + \left(\rho\frac{d\rho}{dt} - \sigma\frac{d\sigma}{dt}\right)^2 , \qquad (12)$$

где σ - функция Флоке канала. Коэффициент k выражает величину максимального роста эффективного эмиттанса, вызванного рассогласованием пучка с каналом. Обобщённый функционал оптимизации составлен следующим образом:

$$\begin{aligned} F = {} & w(1)\cdot\exp(k_x-1) + w(2)\cdot\exp(k_y-1) + w(3)\cdot\exp(k_z-1) + \\ & w(4)\cdot|\beta_x-\beta_x^0| + w(5)\cdot|\beta_y-\beta_y^0| + w(6)\cdot|\beta_z-\beta_z^0| + \\ & w(7)\cdot|\alpha_x-\alpha_x^0| + w(8)\cdot|\alpha_y-\alpha_y^0| + w(9)\cdot|\alpha_z-\alpha_z^0| \end{aligned} \qquad (13)$$

Здесь $\alpha^0_{x,y,z}$, $\beta^0_{x,y,z}$ - согласованные параметры Твисса, а w(1),...,w(9) - весовые коэффициенты, с помощью которых уточняется функционал оптимизации. Задавая равными нулю весовые коэффициенты при соответствующих членах, можно отключить оптимизацию по каждому из параметров. Наиболее разумно проводить оптимизацию только по коэффициентам согласования k. При этом гарантируется наименьший рост

эффективного эмиттанса в том случае, если достичь идеального согласования (k=1) не удаётся. Для оптимизации канала в программе PREINJ использована мощная библиотечная подпрограмма MINUIT, позволяющая формировать стратегию поиска большого числа оптимизируемых параметров через определение методов оптимизации, областей поиска, фиксацию значений для любых элементов канала в процессе поиска. Подпрограмма MINUIT обладает также и некоторыми возможностями поиска других локальных минимумов после достижения очередного такого минимума. Опыт работы по подбору градиентов квадрупольных линз согласующего канала на выходе секции с ПОКФ ускорителя "Истра-56" с помощью программы PREINJ показал [12], что оптимизация только по первым трём членам функционала (10) (w(4)=...=w(9)=0) с применением симплексного алгоритма наиболее быстро даёт желаемые результаты. Однако к настоящему моменту отсутствует версия программы PREINJ для IBM PC совместимого компьютера и несколько ограничен набор элементов канала.

Для расчётов нами была выбрана свободно распространяемая программа TRACE 3-D для компьютера IBM PC. Эта программа с 1973 года в результате серии

редакций превратилась из программы пригодной для моделирования только поперечных фазовых характеристик пучка в хорошо отлаженную и проверенную в ряде разработок интерактивную программу, позволяющую в рамках принятых приближений моделировать трёхмерные пучки с учётом пространственного заряда. В ней присутствуют соленоиды и наиболее просто задаётся функциональная взаимосвязь различных параметров канала. На рисунке 2 приведён входной файл, использованный в расчётах.

В результате проделанной оптимизации определены следующие величины дрейфовых промежутков: 1 - 400мм, 3 - 1820мм, 5 - 180мм; длины соленоидовl 2, sol 4 по 200мм каждый (см рис.1) и полей в них: 0,354Тл и 0,388Тл, соответственно. На рисунках 3,4 представлены огибающие пучка и его фазовые характеристики, полученные для выбранного на основе проделанных вычислений положения соленоидов и полей в них. Эти результаты являются предварительными, поскольку не учитывают реального распределения полей в соленоидах и возрастания фазового объёма пучка в процессе транспортировки. Для более точного расчёта необходимо использовать программы,

позволяющие моделировать реальные пучки и поля, например: PROTON [13], OPERA [14].

```
units: mm, mrad, t/m, mamps, MV/m
15:49:38.312/02/97
er=   931.440   q= 1.    v=    0.100    xi=  200.000
emitf=    136.52    136.52    720.00
beami=        -1.83000        0.73000        -1.83000        0.73000        0.00000        180.00000
beamf=         7.30000        0.73000         7.30000        0.73000        0.00000          0.24689
freq=   150.000   pqext=  2.50   ichrom= 0
xq= 40.0   xpm=200.0000   yq= 40.0   dpm=720.   dwm=   10.   dpp=   10.
n1=   1   n2=   5   ssmax= 10.0   pqsmax=   2.0
nel1 =   1,   nel2 =   5
nt=   8   nc=   4

      mp(1,n)   mp(2,n)   value        nvc        value

         1         2      3540.

         1         4      3881.

n   nt(n)   q(i,n)
1    1    400.000000
2    5   3540.276200    200.000000
3    1   1820.000000
4    5   3881.140000    200.000000
5    1    180.000000
```

Рис.2. Экранная копия входного файла программы TRACE 3-D.

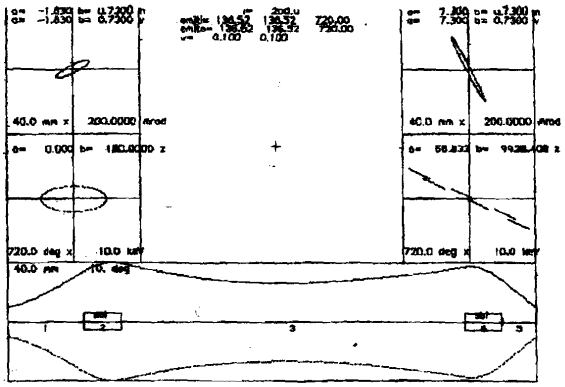

Рис.3. Огибающие согласованного пучка и его фазовые характеристики.

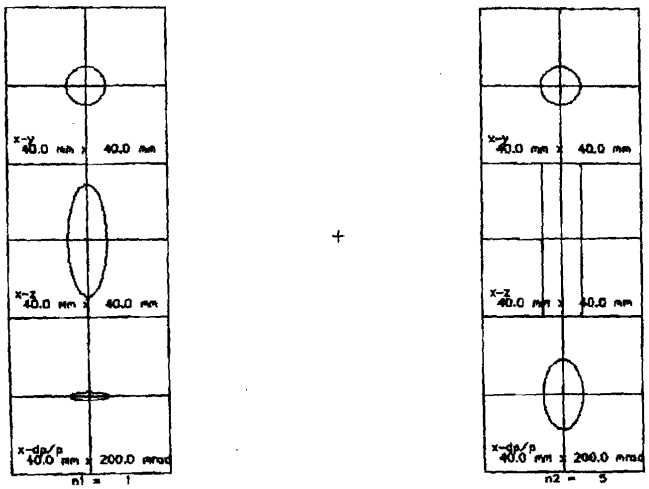

Рис.4. Проекции фазовых эллипсов на координатные оси.

Опыт работы с программой TRACE 3-D показал, что эта программа далеко не сразу может найти оптимальную настройку. В первую очередь это связано с ограничениями на число оптимизируемых параметров элементов канала. Их количество не может превысить совокупное число заданных параметров $\alpha_{x,y,z}$, $\beta_{x,y,z}$ фазовых эллипсов. Задать одновременное изменение как положения соленоидов, так и полей в них при поперечном аксиально симметричном согласовании невозможно (программа игнорирует лишние степени свободы, даже если они заданы пользователем). В случае не совсем

удачного расположения соленоидов по оси канала программа, варьируя значения магнитного поля в них, находит локальный минимум, не достигнув требуемых выходных параметров. В подобной ситуации необходимо вмешательство пользователя для изменения геометрии согласующего канала.

С точки зрения необходимой квалификации пользователя программа TRACE 3-D, по нашему мнению, является наиболее требовательной из имеющихся в нашем распоряжении. Во-первых, она предполагает наличие у него определённой интуиции и навыков расчёта согласующих каналов в связи с ограниченными возможностями оптимизирующего алгоритма. Во-вторых, входной файл программы и работа в интерактивном режиме связаны с прямой засылкой данных в элементы массивов. Это обстоятельство требует повышенного внимания и аккуратности, в противном случае при возможных ошибках в индексации элементов работа программы может стать непредсказуемой. Заполнение массивов в остальных программах происходит внутри этих программ через текущие переменные, что более безопасно.

Как нетрудно видеть, в различных ускорительных центрах создаются программы расчёта транспортных и

Опыт использования программ для оптимизации каналов транспортировки интенсивных пучков заряженных частиц средних энергий, сопоставление данных таблиц 1,2 показывает, что не существует одной программы, которая смогла бы удовлетворить всем требованиям разработчика, в первую очередь, ввиду отсутствия полного набора известных структурных элементов транспортных каналов ускорителей в одной программе. Единственной программой, которая позволяет определять и сохранять в базе данных произвольные элементы и структурные блоки канала, является коммерческая программа GIOSP, которая к тому же имеет хороший пользовательский интерфейс в WINDOWS 3.1 и выше. Её существенным недостатком является невозможность расчёта продольных характеристик пучка, что резко сужает область её применения.

Достоинством программы TRANSPORT является эмуляция смещений транспортных элементов от геометрической оси канала через задание смещения центра эллипса, представляющего проекцию фазового объёма сгустка. К недостаткам программы TRANSPORT следует отнести отсутствие учёта кулоновских эффектов.

- оптимизирующий алгоритм должен учитывать заданные ограничения на параметры пучка и технические характеристики канала;
- максимальное число оптимизируемых параметров должно быть достаточным для расчёта каналов с большим числом оптимизируемых структурных элементов;
- должно обеспечиваться задание функциональной связи между элементами канала в процессе оптимизации;
- ввод данных должен быть удобным и безопасным на всех этапах работы с программой;
- должен обеспечиваться как графический, так и текстовой вывод результатов в формате, пригодном для дальнейшего использования приложениями в среде WINDOWS.

Представленные в настоящей работе обзор и сопоставление возможностей различных программ расчёта согласующих каналов, как нам кажется, смогут облегчить пользователям выбор подходящей программы.

Авторы выражают благодарность А.А.Коломийцу за обсуждение работы и сделанные полезные замечания и А.Ф.Клыкову - за помощь в оформлении публикации.

Таблица 2. Основные функции в различных программах расчёта транспортных каналов.

Функция	Transport	GIOSP	Trace 3-D	Preinj
Наличие реперной частицы	нет	есть	нет	нет
Форма начального фазового объёма пучка	эллипс	эллипс и параллелограмм	эллипс	эллипс
Размерность фазового объёма	6	4	6	6
Учёт роста фазового объёма	возможен[1]	нет	возможен[2]	возможен[3]
Метод расчёта траекторий	матричный	матричный	матричный	матричный
Возможность введения дополнительных формул	нет	есть	нет	нет
Расчёт оптических аберраций	до 2-го порядка	до 3-го порядка	возможен для тонкой линзы	нет
Учёт смещений элементов от оси канала	есть[4]	нет	нет	нет
Учёт кулоновского поля пучка	нет	есть	есть	есть
Функционал оптимизации	сумма квадратов отклонений заданных параметров от искомых значений по заданной точности	сумма квадратов отклонений заданных параметров от искомых значений с весами	параметры Твисса	обобщённый коэффициент согласования в 6-мерном фазовом пространстве и параметры Твисса с весами

Метод оптимизации	неизвестен	симплексный и сопряжённых градиентов	неизвестен	Совокупность и последовательность методов, входящих в библиотечную программу MINUIT[5]
Максимальное количество оптимизируемых параметров	неизвестно	неизвестно	по числу параметров оптимизации (≤6)	не больше 100 в данной версии MINUIT
Возможность ограничения значений оптимизируемых параметров	нет	есть	нет	есть
Задание функциональной взаимосвязи между элементами канала	есть	есть	есть	нет
Интерактивность	нет	есть по указанию в начальных данных	есть при запуске программы	нет
Платформа реализации	VAX	IBM PC (DOS & WINDOWS)	IBM PC (DOS)	VAX

[1] *Задаётся пользователем с помощью произвольной матрицы передачи.*

[2] *Учитывается поправка к поперечным скоростям при прохождении ВЧ-зазора.*

[3] *Учитывается поправка к поперечным скоростям при прохождении ВЧ-зазора и при формировании продольного эмиттанса из непрерывного пучка..*

[4] *Эмуляция смещений элементов смещением центра пучка.*

[5] *Метод случайного поиска, симплексный алгоритм, градиентный метод Давидона, ограниченные возможности поиска глобального минимума. Задание пользователем последовательности методов и областей поиска, фиксация параметров с последующим продолжением минимизации по другим параметрам и отмена фиксации.*

Таблица 3. Состав элементов транспортных каналов ускорителя в различных программах.

Элемент	Transport	GIOSP	Trace 3-D	Preinj
Дрейфовый промежуток	есть	есть	есть	есть
Магнитная тонкая линза		есть	есть	нет
Магнитный квадруполь	есть	есть	есть	есть
Магнитный секступоль	есть	есть	нет	нет
Магнитный октуполь	нет	есть	нет	нет
Квадруполь на постоянных магнитах	нет	нет	есть	нет
Магнитный дублет	может быть определён[1]	может быть определён[2]	есть	нет
Магнитный триплет	--"--	--"--	есть	есть
Соленоид	есть	нет	есть	нет
Электростатическая тонкая линза	нет	есть	нет	нет
Электростатический квадруполь	нет	есть	нет	нет
Электростатический секступоль	нет	есть	нет	нет
Электростатический октуполь	нет	есть	нет	нет
Ячейка RFQ	нет	нет	есть	есть
Z-Pinch плазменная линза	нет	есть	нет	нет
Фильтр Вэйна	нет	есть	нет	нет
Прямоугольный поворотный магнит	есть	есть	нет	есть
Секторный поворотный магнит	есть	есть	есть	есть
Край поворотного магнита	есть	есть	есть	нет
Секторный электростатический дефлектор	нет	есть	нет	нет
Ускоряющий зазор	может быть определён	нет	есть	есть
Ускоряющий зазор на высоких гармониках	--"--	нет	есть	нет
Ускоряющая ячейка	--"--	нет	есть	нет
Ускоряющий отсек	есть	нет	есть	нет
Группирователь	может быть определён	нет	может быть определён	есть

Разгруппирователь	--"--	нет	--"--	есть
Группирователь на удвоенной гармонике	нет	нет	--"--	есть
Произвольный элемент[3]	есть	нет	нет	нет
Специальный элемент[4]	нет	нет	есть	есть
Специальные параметры для элементов	есть	нет	нет	нет
Вращение элемента в системе координат	есть	нет	есть	нет
Повторяющиеся идентичные элементы	есть	есть	есть	нет
Возможность объединения элементов в структурные блоки	нет	есть	нет	нет
Возможность задания зеркальной симметрии в структуре канала	нет	есть	нет	нет
Возможность сохранения структурных блоков в постоянной базе данных	нет	есть	нет	нет

[1] *Задаётся через связывание параметров.*

[2] *Задаётся в виде блока из квадруполей.*

[3] *Задаётся в виде цифровых коэффициентов матрицы передачи, в том числе не сохраняющих фазовый объем.*

[4] *Определяется пользователем в виде дополнительной подпрограммы, написанной на языке FORTRAN. Для использования этой возможности необходимы исходные тексты программы.*

Список литературы

1. Балабин А.И., Капчинский И.М., Козодаев А.М., Коломиец А.А., Липкин И.М., Угаров С.Б. Основные физические параметры протонного линейного ускорителя "Истра-56" (Часть-I). М., Препринт ИТЭФ, 1989, №157.
2. Hansborough L.D., Hodgkins D.J. et al. Mechanical Engineering of a 75-keV Proton Injector for the Low-Energy Demonstration Accelerator. // Particle Accelerator Conf., May 12-16, 1997, Vancouver, B.C., Canada.
3. Brown K.L., Carey D.C., Iselin C. and Rothacher F., CERN-Rep. (1980), 80-04.
4. Wollnik H., Brezina J., Berz M.// Proc. AMCO-7, GSI-Rep. THD-26 (1984), 679.
5. Wollnik B., Brezina J., Berz M.// Nucl. Instrum. and Meth. A258 (1987), 408.
6. Crandall K.R. Trace 3-D Documentation, Los Alamos National Lab., LA-UR-90-4146.
7. Лоусон Дж.. Физика пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1980.
8. Теория и расчёт линейных ускорителей.// Сб. статей ФТИ АН УССР. М., Госатомиздат, 1962.
9. Котов В.И., Миллер В.В. Фокусировка и разделение по массам частиц высокой энергии. М.: Атомиздат, 1969.
10. Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей. М.: Энергоиздат, 1982.
11. Власов А.Д.. Теория линейных ускорителей. М.: Атомиздат, 1965.

12. Воробьёв И.А., Капчинский И.М., Козодаев А.М., Коломиец А.А., Липкин И.М.. Основные физические параметры протонного линейного ускорителя "Истра-56" (Часть-II). М., Препринт ИТЭФ, 1989, №158.

13. И.А.Воробьёв и др. Численное моделирование динамики пучка в ускорителе ИТЭФ с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой. М., Препринт ИТЭФ, 1986, №52.

14. Opera-3d Reference Manual. VF-05-96-D4. Vector Fields Limited, 24 Bankside Kidlington, Oxford OX5 1JE, England.

Подписано к печати 03.03.98 Формат 60x90 I/I6
Усл.-печ.л.I,25. Уч.-изд.л.0,9. Тираж IOI экз. Заказ 2.
Индекс 3649

Отпечатано в ИТЭФ, II7259, Москва, Б.Черемушкинская, 25