

10; 12

## АХРОМАТИЧНЫЕ МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ВАРЬИРУЕМЫМ УГЛОМ ПОВОРОТА ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

А. А. Капустин, В. И. Петрунин, Ю. П. Севергин

Рассмотрен принцип построения ахроматичных систем с варьируемым углом поворота пучка заряженных частиц. В качестве примера приведена ахроматичная система промышленного томографа, обеспечивающая формирование электронного пучка постоянного поперечного размера при его сканировании по протяженной мишени. Ахроматичные системы с варьируемым углом поворота могут использоваться в схемах разводки пучков на экспериментальные мишени, а также для целей формирования однородных полей облучения в медицине.

### Введение

Ахроматичные системы с фиксированным углом поворота заряженных частиц широко используются в магнитооптических устройствах и каналах разводки пучков. Отличие их состоит в том, что на выходе системы отсутствуют как линейная, так и угловая дисперсии. Особенно это важно, когда в пучке частицы имеют значительный разброс по импульсам. Теория ахроматичных систем и примеры реализации изложены в монографиях [1, 2].

Появление в магнитной оптике нового класса — ахроматичных систем с варьируемым углом поворота обусловлено в первую очередь необходимостью создания для целей промышленной томографии схем, которые позволяют при сканировании пучка по протяженным мишеням сохранять стабильным его поперечный размер. Известные схемы сканирования пучка, состоящие из системы поперечной фокусировки и импульсного отклоняющего магнита, не удовлетворяют требованиям данной задачи. В поле магнита частицы, отличающиеся по импульсам, отклоняются на различные углы. В результате в плоскости поворота размер пучка в разных местах облучаемой мишени изменяется. Одним из основных критериев достижения высокого разрешения в промышленной томографии является минимальный и постоянный поперечный размер пучка электронов в любой точке протяженной радиационной мишени.

В работе рассмотрен возможный способ построения систем с варьируемым углом отклонения пучка. На выходе этих систем отсутствуют как линейная и угловая дисперсии, так и возмущение поперечного движения моноэнергетических частиц. Приведены основные параметры системы сканирования пучка промышленного томографа, разрабатываемого в НИИЭФА.

### 1. Основные положения

Покажем принципиальную возможность создания ахроматичных систем с варьируемым углом поворота и определим условия, которым они должны удовлетворять. Для определенности рассмотрим следующую схему (рис. 1): *I* — источник заряженных частиц; *II* — некоторая магнитооптическая система (МАС), особенности которой мы должны определить; *III* — импульсный дипольный магнит (ДМ), осуществляющий отклонение пучка на угол  $\pm \Psi$ ; *IV* — облучаемый объект.

Система МОС—ДМ будет ахроматичной в том случае, если на входе в магнит ДМ (рис. 1, точка 3) линейная  $a_{13}(3)$  и угловая  $a_{23}(3)$  дисперсии будут изменяться в зависимости от угла поворота  $\Psi$  по закону

$$a_{13}(3) = \rho(t)[1 - \cos \Psi(t)], \quad a_{23}(3) = -\sin \Psi(t), \quad (1)$$

где  $\rho(t)$  — радиус поворота пучка в магните ДМ.

Следовательно, система МОС должна обладать возможностью динамически управлять дисперсией и ее производной  $a_{13}(3, t)$ ,  $a_{23}(3, t)$ . Управлять дисперсией можно с помощью квадрупольных линз  $Q$  при условии, что линейная дисперсия  $a_{13}(Q)$  в линзах не равна нулю. Значит, МОС обязательно должна включать в себя поворотные магниты, которые создают дисперсию. С другой стороны, МОС при  $\Psi = 0$  должна быть ахроматичной, так как в данный момент времени  $a_{13}(3) = a_{23}(3) = 0$ . В дальнейшем изложении будем считать, что МОС — ахроматичная поворотная система.

Влияние квадрупольной линзы  $Q$ , включенной в МОС, на изменение дисперсии  $\Delta a_{13}(3)$  и ее производной  $\Delta a_{23}(3)$  на входе в ДМ в приближении тонких линз записывается следующим образом:

$$\Delta a_{13}(3, Q) = -a_{12} \frac{\omega^2}{l^2} a_{13}(Q), \quad \Delta a_{23}(3, Q) = -a_{22} \frac{\omega^2}{l^2} a_{13}(Q), \quad (2)$$

где  $a_{12}$  и  $a_{22}$  — коэффициенты матрицы перехода от центра квадрупольной линзы  $Q$  до входа в дипольный магнит ДМ;  $a_{13}(Q)$  — дисперсия в квадруполь-

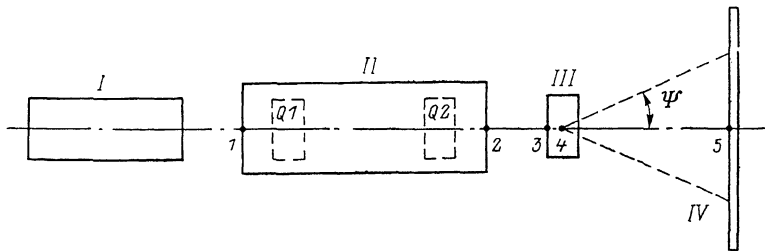


Рис. 1.

ной линзе  $Q$ ;  $l$  — эффективная длина линзы;  $\omega^2 (l^2/B\rho) (\partial B/\partial x)$  — безразмерный параметр линзы (положительному градиенту  $\partial B/\partial x$  соответствует фокусировка в плоскости поворота), характеризующий ее оптическую силу.

Из (2) видно, что  $\Delta a_{13}$  и  $\Delta a_{23}$  зависят от величины линейной дисперсии  $a_{13}(Q)$ . Чем больше  $a_{13}(Q)$ , тем меньше возмущение необходимо ввести.

Чтобы обеспечить ахроматичные условия системы МОС—ДМ при переменном  $\Psi$ , достаточно включить две квадрупольные линзы  $Q_1$  и  $Q_2$ , при этом закон изменения градиента поля в них должен удовлетворять решению системы двух линейных уравнений

$$\Delta a_{13}(Q_1) + \Delta a_{13}(Q_2) = \rho(1 - \cos \Psi), \quad \Delta a_{23}(Q_1) + \Delta a_{23}(Q_2) = -\sin \Psi. \quad (3)$$

Но линзы  $Q_1$  и  $Q_2$  одновременно будут возмущать движение моноэнергетического пучка. В результате поперечный размер пучка на облучаемом объекте будет изменяться, но уже по другой причине. Этот эффект может быть устранен введением двух дополнительных линз  $Q_3$  и  $Q_4$ , которые целесообразно установить на участках МОС, где поперечная дисперсия равна нулю. Закон изменения градиентов в линзах  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  должен удовлетворять решению уже четырех уравнений, два из которых, учитывающих возмущение поперечного размера моноэнергетического пучка на мишени, являются трансцендентными.

Таким образом, задача формирования электронного пучка постоянного поперечного размера при его сканировании по протяженному объекту в общем случае может быть решена путем установки перед отклоняющим магнитом ДМ поворотной ахроматичной системы МОС, в которую включены 4 импульсные квадрупольные линзы. Градиент в каждой линзе изменяется по определенному закону в зависимости от угла отклонения пучка  $\Psi$ .

## 2. Принципы построения ахроматичных систем с варьируемым углом поворота [3]

Из анализа формирования ахроматичных систем с варьируемым углом поворота следует, что система управления при общем рассмотрении оказывается сложной. Возникает естественное желание найти дополнительные приемы, которые позволили бы создать такие системы технически легко реализуемыми.

Рассмотрим сначала, при каких условиях возмущение, вносимое первой по ходу движения частиц квадрупольной линзой 1  $Q$  на поперечное движение моноэнергетического пучка, полностью устраняется последующей 2  $Q$ . Пусть матрица преобразования координат в одной из поперечных плоскостей между центрами линз 1  $Q$  и 2  $Q$  имеет вид

$$\begin{vmatrix} y_1 \\ y_1' \end{vmatrix}_{2Q} = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} y_0 \\ y_0' \end{vmatrix}_{1Q}. \quad (4)$$

В приближении тонких линз суммарное возмущение, вносимое первой  $\omega_1$  и второй квадрупольными линзами  $\omega_2$ , определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} \Delta b_{11} &= b_{12} \frac{\omega_1^2}{l_1^2}, \quad \Delta b_{12} = 0, \\ \Delta b_{21} &= b_{22} \frac{\omega_1^2}{l_1^2} + b_{11} \frac{\omega_2^2}{l_2^2} + b_{12} \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{l_1^2 l_2^2}, \\ \Delta b_{22} &= b_{12} \frac{\omega_2^2}{l_2^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\omega_{1,2}^2$  и  $l_{1,2}$  — безразмерный параметр и эффективная длина соответственно первой и второй линз.

Из (5) следует, что полная компенсация ( $\Delta b_{ji} = 0$ ) достигается при следующих условиях: а)  $b_{12} = 0$  — линзы 1  $Q$  и 2  $Q$  находятся в софокусных точках;

$$\text{б) } b_{22} \frac{\omega_1^2}{l_1^2} = -b_{11} \frac{\omega_2^2}{l_2^2}. \quad (6)$$

Диагональные коэффициенты матрицы перехода (4) при  $b_{12} = 0$  связаны между собой соотношением  $b_{11} b_{22} = 1$ . Значит, условие б) может быть выполнено, если градиенты поля  $[\omega_{1,2}^2 = (l_{1,2}^2 / B\rho) (\partial B_{1,2} / \partial x)]$  в линзах 1  $Q$  и 2  $Q$  различны по знаку. С точки зрения простоты технической реализации целесообразно иметь одинаковые линзы ( $|\omega_1^2 / l_1^2| = |\omega_2^2 / l_2^2|$ ) и запитывать их последовательно от одного источника. В этом случае диагональные элементы матрицы перехода (4) могут принимать только два значения: 1, -1.

Следовательно, если система МОС сформирована так, что матрицы перехода в радиальной и вертикальной плоскостях между линзами  $Q1-Q3$  и  $Q2-Q4$  имеют единичное или минус единичное преобразование, а градиенты в каждой паре линз отличаются знаком и равны по величине, то на выходе МОС возмущение поперечного движения моноэнергетического пучка будет отсутствовать. Закон изменения градиентов в линзах  $Q1$  и  $Q2$  (соответственно  $Q3$  и  $Q4$ ), обеспечивающий ахроматичность МОС—ДМ, удовлетворяет решению системы линейных уравнений (3).

Далее, при небольших углах отклонения пучка в ДМ ( $\Psi < 30^\circ$ ) вместо (1) имеем

$$a_{13}(3) \simeq \frac{\rho \Psi}{2}, \quad a_{23}(3) \simeq -\Psi, \quad (7)$$

где  $\rho$  ( $\Psi/2$ ) — половина длины осевой траектории в магните ДМ.

Если магнит ДМ имеет прямоугольные полюса, то  $\rho$  ( $\Psi/2$ )  $\approx$  const, а условия (7) в центре магнита ДМ (рис. 1, точка 4) примут вид

$$a_{13}(4) = 0, \quad a_{23}(4) = -\Psi. \quad (8)$$

Управлять дисперсией, согласно условию (8), можно одной квадрупольной линзой  $Q_1$ . Действительно, если геометрическое положение линзы  $Q_1$  в МОС выбрано так, что середина линзы и центр магнита ДМ являются софокусными точками (коэффициент  $a_{12}=0$  матрицы перехода между ними), то, согласно (2), возмущения поперечной дисперсии не будет, а угловое равно

$$\Delta a_{23}(\bar{l}) = -a_{22} \frac{\omega_1^2}{l^2} a_{13}(\bar{Q}_1).$$

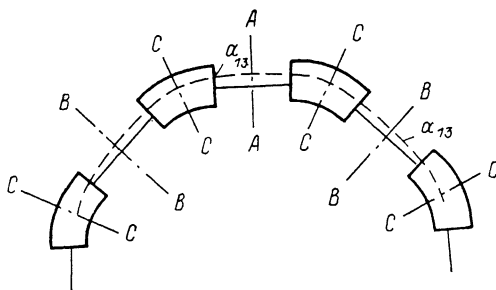


Рис. 2.

Важно, что градиент поля в линзе  $Q_1$  линейно связан с углом отклонения частиц в магните ДМ соотношением

$$\omega^2 \left( \frac{a_{22} a_{13}(\bar{Q}_1)}{l^2} \right) = \Psi.$$

Поэтому можно запитать последовательно от одного источника тока квадрупольные линзы и импульсный магнит.

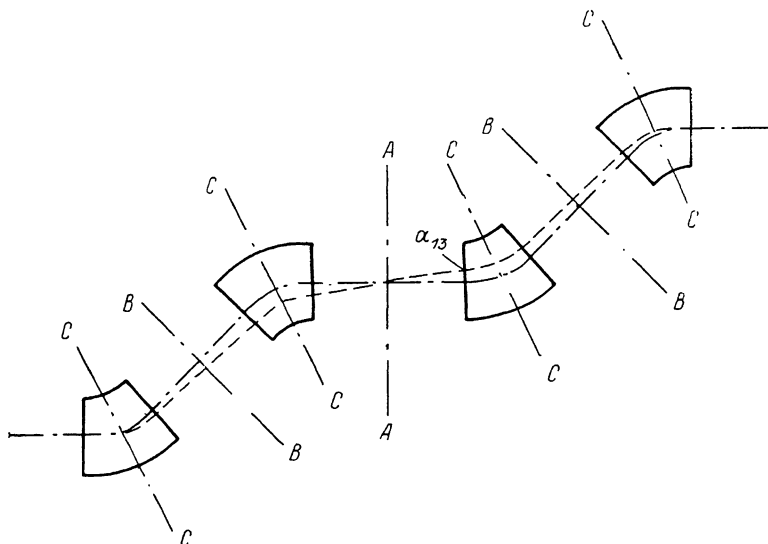


Рис. 3.

Итак, выбором специальных свойств МОС и геометрического расположения двух импульсных линз, запитанных последовательно с магнитом ДМ, можно осуществить ахроматичный поворот частиц без возмущения поперечного движения моноэнергетического пучка. В качестве МОС можно рекомендовать системы, состоящие из четырех одинаковых магнитов. Принцип компоновки поясняют рис. 2, 3. В первом варианте (рис. 2) магнитная структура имеет тройную зеркальную симметрию (плоскости симметрии  $AA$ ,  $BB$ ,  $CC$ ). Во втором варианте (рис. 3) магнитная структура обладает двойной центральной симметрией ( $AA$ ,  $BB$ ). Четверть элемента структуры имеет плоскость зеркальной симметрии  $CC$ ,

проходящую через середину магнита. Полный угол поворота системы равен нулю. Параметры магнита выбираются так, чтобы диагональные коэффициенты матриц перехода в горизонтальной и вертикальной плоскостях были равны нулю. Для магнита с показателем спада  $n=0.5$  указанные условия обеспечиваются при

$$l = \frac{\rho}{\sqrt{2}} \operatorname{ctg} \left( \frac{\varphi}{\sqrt{2}} \right),$$

где  $\rho$ ,  $\varphi$  — радиус осевой траектории и угол поворота пучка в магните;  $l$  — расстояние от эффективной границы магнита до плоскости симметрии  $BB'$ .

Для магнита с однородным полем и краевой фокусировкой ( $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$  — углы скоса торцевого края магнита) параметры магнита определяются из решения уравнения

$$l = \frac{(1 - \varphi \operatorname{tg} \alpha)}{(2 \operatorname{tg} \alpha - \varphi \operatorname{tg}^2 \alpha)} = \frac{(\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg} \alpha) \operatorname{tg} 2\alpha}{2 \cos \varphi \operatorname{tg} \alpha (\operatorname{tg} 2\alpha - \operatorname{tg} \varphi)}.$$

Полная матрица перехода таких систем имеет единичное преобразование в обеих плоскостях. Кроме того, любой участок протяженностью, равной половине длины осевой траектории всей системы, имеет единичное преобразование как в вертикальной, так и горизонтальной плоскостях. Это важно для формирования ахроматичных систем с варьируемым углом поворота, так как облегчается выбор геометрического расположения импульсных линз.

### 3. Система сканирования пучка промышленного томографа

Современное развитие промышленной томографии толстостенных стальных изделий базируется на использовании в качестве источника излучения линейного ускорителя электронов с энергией до 15 МэВ. Одними из наиболее пер-

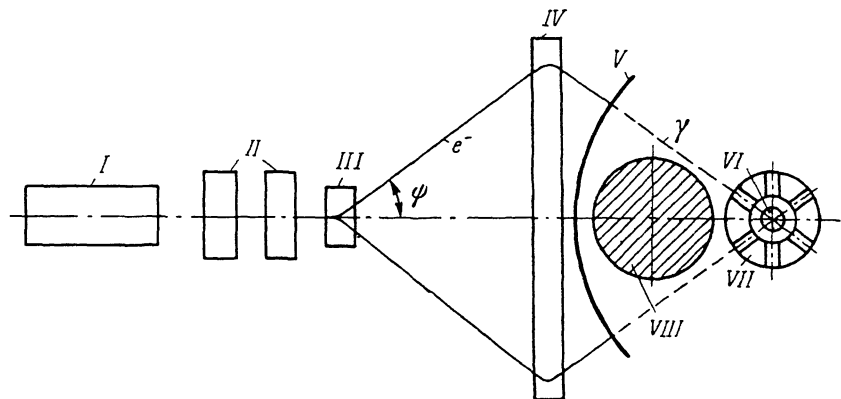


Рис. 4.

спективных являются томографы, построенные по однодетекторной схеме, которая показана на рис. 4. Источник излучения и детектор неподвижны. Электронный пучок от ускорителя  $I$  формируется в поперечной плоскости квадрупольными линзами  $II$ , динамически разворачивается импульсным магнитом  $III$ , фокусируется квадрупольной линзой (линзой Пановского)  $IV$  для нормального падения луча на цилиндрическую мишень  $V$  и преобразуется в поток  $\gamma$ -квантов, максимум которого постоянно ориентирован на детектор  $VI$ . Коллимация пучка  $\gamma$ -квантов осуществляется поглощающим экраном  $VII$ , вращающимся синхронно со сканирующим пучком.

Разрешающая способность томографа зависит от размера пятна пучка ( $\varnothing 2$  мм) электронов на тормозной мишени. Основной причиной размытия пятна является энергетический разброс в пучке. Частицы, отличающиеся по импульсам  $\Delta P/P_0$ , поворачиваются в магните  $III$  на разные углы, в результате чего размер пятна в плоскости поворота возрастает на  $2\Delta x \approx 2r_0 (\Delta P/P_0)$ , где  $r_0$  — расстояние от оси излучателя до положения пятна пучка на мишени.

Серийно выпускаемые линейные ускорители с улучшенными параметрами имеют на выходе  $\Delta P/P_0 = \pm 2.5 \cdot 10^{-2}$ . Исследование крупных изделий ( $r > 40$  см) при таком импульсном разбросе частиц выполнить нельзя, так как

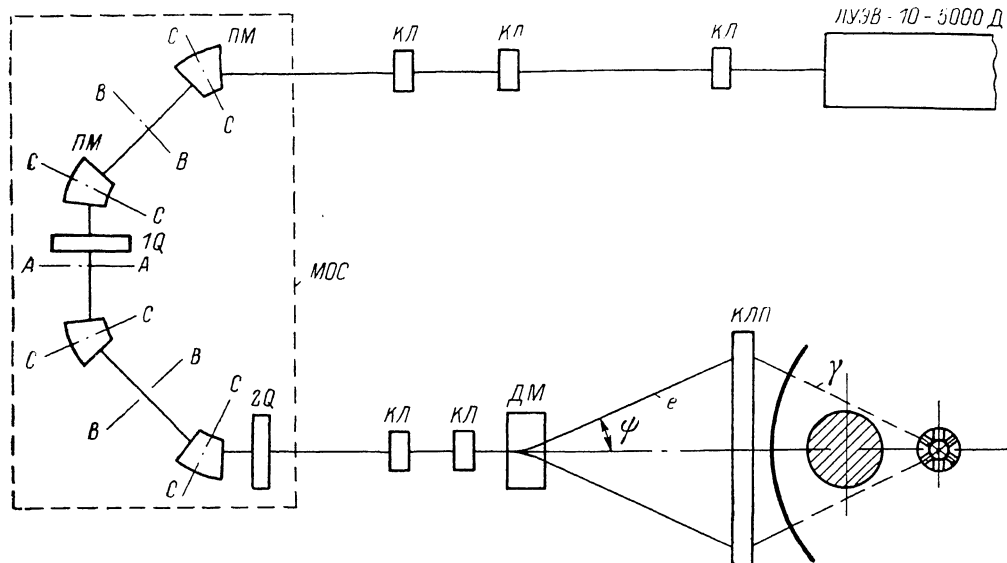


Рис. 5.

размер пучка увеличивается на недопустимо большую величину  $2\Delta x > 2$  см. Импульсный разброс в пучке, включая дрейф средней энергии, должен быть меньше, чем  $5 \cdot 10^{-4}$ .

Если ориентироваться на использование в качестве источника излучения линейный ускоритель, то возможны два подхода к решению данной задачи:

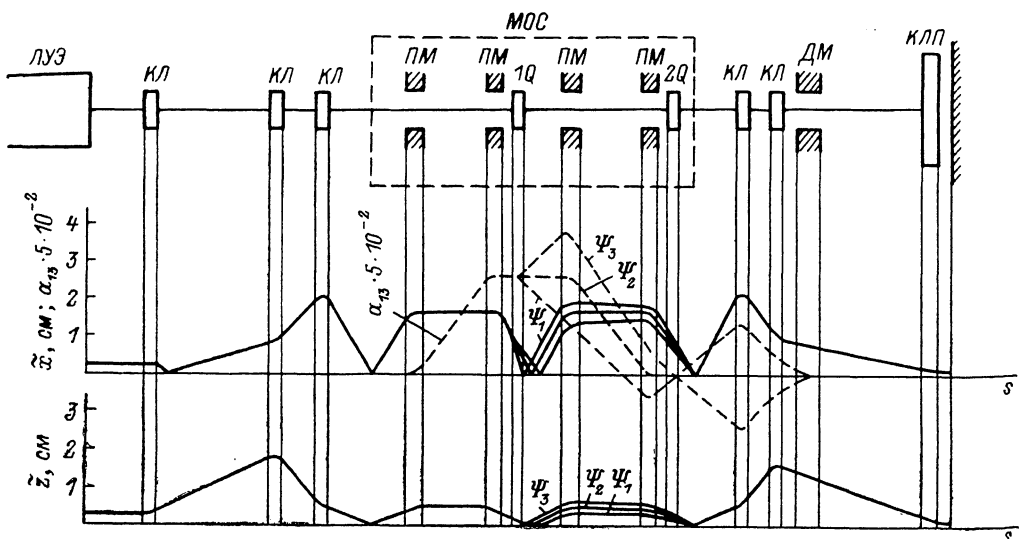


Рис. 6.

а) разработать и создать специальный линейный ускоритель, работающий совместно с системой внешней монохроматизации пучка (исследования по этому вопросу представлены в работе [4]); б) применить ахроматичную систему с варьируемым углом поворота. Первое направление проигрывает по сравнению со вторым по двум позициям: во-первых, дороже, во-вторых, сложнее в эксплуатации. Поэтому в промышленном томографе, разрабатываемом в НИИЭФА, применена

ахроматичная система с варьируемым углом поворота. Для экспериментальных исследований на стенде в качестве МОС выбрана  $180^\circ$ -ная поворотная система. Схема расположения оборудования томографа показана на рис. 5.

На выходе линейного ускорителя ЛУЭВ-10-5000Д энергия электронов  $E = 9$  МэВ. Разброс частиц по импульсам  $\Delta P/P_0 = \pm 2.5 \cdot 10^{-2}$ , эмиттанс пучка  $\epsilon_x = \epsilon_z = \pi$  см·рад. МОС состоит из четырех одинаковых магнитов с углом поворота  $45^\circ$ , которые скомпонованы по принципу рис. 2. Акспальная фокусировка осуществляется торцевыми полями, которые имеют углы скоса  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.203$  рад. Квадрупольные линзы *KL* запитаны от постоянных источников тока и формируют требуемый размер пучка на мишени ( $\varnothing$  2 мм), когда импульсный магнит *DM* выключен. Импульсные линзы *Q1* и *Q2* включаются одновременно с магнитом *DM*. Конструктивно импульсные квадрупольные линзы и дипольный магнит выполнены так, что запитываются от одного источника тока. Управление пучком осуществляется одним источником.

На рис. 6 представлен ход дисперсионной функции  $a_{13} \cdot 5 \cdot 10^{-2}$  и огибающие пучка при его отклонении магнитом *DM* на углы  $\Psi_1 = 20^\circ$ ,  $\Psi_2 = 0$ ;  $\Psi_3 = -20^\circ$ . Как видно, на выходе поворотной системы отсутствует возмущение моноэнергетического пучка, а на выходе импульсного магнита *DM* отсутствует сепарация частиц по импульсам.

Нелинейные эффекты приводят к увеличению размера пятна на облучаемой мишени в 1.4 раза в основном из-за сферических aberrаций. Удовлетворительная их компенсация достигается с помощью двух импульсных секступольных линз, установленных перед поворотной ахроматичной системой.

### Заключение

Выполненные теоретические и расчетные исследования подтверждают реальность создания несложных ахроматичных систем с варьируемым углом поворота пучка. Применение таких систем для томографии крупногабаритных изделий позволит значительно сократить время экспозиции.

### Список литературы

- [1] Котов В. И., Миллер В. В. Фокусировка и разделение по массам частиц высоких энергий. М.: Атомиздат, 1969. 280 с.
- [2] Штеффен К. Оптика пучков высокой энергии. М.: Мпр, 1969. 224 с.
- [3] Севергин Ю. П., Капустин А. А. Устройство сканирования пучка. Заявка на изобретение № 4056009. Положительное решение от 30.07.87.
- [4] Нагаенко М. Г., Рябцов А. В., Севергин Ю. П. // Докл. IV Всесоюз. совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Л., 1982. Т. I. С. 122—129.

Поступило в Редакцию  
4 мая 1988 г.