

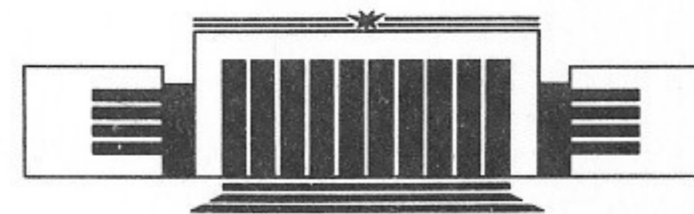


24
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

А.Г. Валентинов, П.Д. Воблый, С.Ф. Михайлов,
Н.Г. Гаврилов, Н.И. Зубков, В.Н. Корчуганов,
В.С. Кузминых, Г.Н. Кулипанов, Е.Б. Левичев,
Э.М. Трахтенберг, Г.И. Эрг

**МАГНИТНАЯ СИСТЕМА
НАКОПИТЕЛЯ СИБИРЬ-2—
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА СИ**

ПРЕПРИНТ 89-174



НОВОСИБИРСК

Магнитная система
накопителя Сибирь-2 —
специализированного источника СИ

*А.Г. Валентинов, П.Д. Воблый, С.Ф. Михайлов,
Н.Г. Гаврилов, Н.И. Зубков, В.Н. Корчуганов,
В.С. Кузминых, Г.Н. Кулипанов, Е.Б. Левичев,
Э.М. Трахтенберг, Г.И. Эрг*

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Накопитель электронов Сибирь-2, создаваемый в ИЯФ СО АН СССР, является первым в Советском Союзе специализированным источником синхротронного излучения с энергией электронов 2,5 ГэВ. В данной работе описывается магнитная система Сибирь-2, приводятся конструкция и основные параметры магнитных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ИЯФ СО АН СССР ведется создание специализированного источника синхротронного излучения — накопителя электронов Сибирь-2 для ИАЭ им. И.В. Курчатова (Москва).

Накопитель Сибирь-2 (максимальная энергия электронов 2,5 ГэВ) является основной частью комплекса, в состав которого входят также (см. рис. 1) бустерный накопитель Сибирь-1 (450 МэВ), линейный ускоритель (80—100 МэВ) и два канала транспортировки электронных пучков.

Сибирь-2 будет иметь до 40 каналов вывода СИ из поворотных магнитов и специальных источников излучения в диапазоне длин волн от 0,1 до 2000 Å.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ИСТОЧНИК СИ СИБИРЬ-2

Магнитная структура Сибири-2 оптимизирована с целью получения большого спектрального потока и высокой спектральной яркости источника излучения и обеспечивает:

- возможность постановки сильнополевых сверхпроводящих «змеек» для получения пучков жесткого рентгеновского излучения;
- возможность постановки ондуляторов для получения ярких пучков ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения;

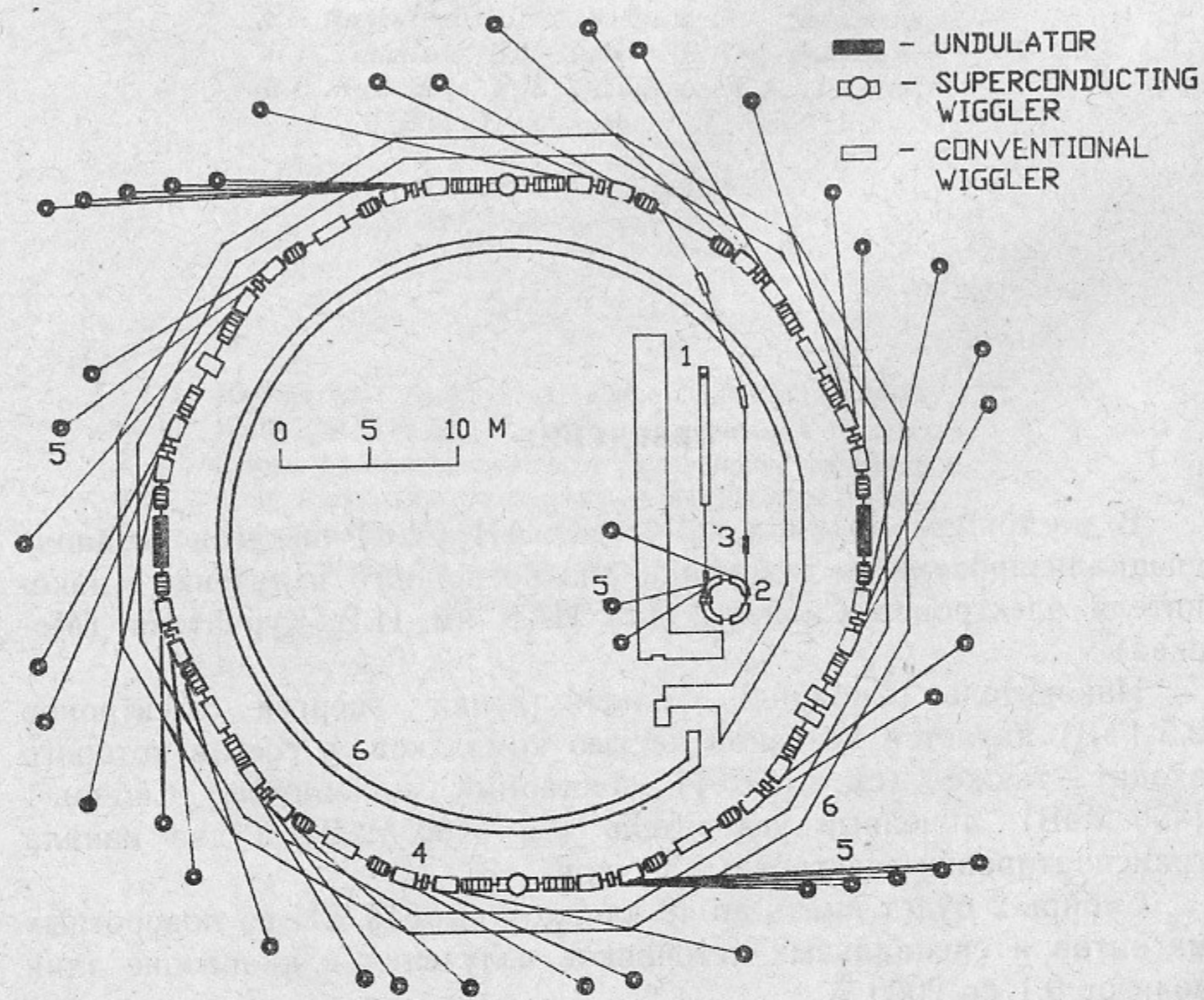


Рис. 1. Схема комплекса Сибирь:

1 — линейный ускоритель; 2 — накопитель Сибирь-1; 3 — каналы транспортировки пучка электронов; 4 — накопитель Сибирь-2; 5 — каналы вывода СИ; 6 — биозащита.

— возможность изменять параметры СИ из «змеек» и ондуляторов и делать их оптимальными для эксперимента, не влияя существенно на работу накопителя.

Наиболее важным условием повышения спектральной яркости СИ является минимизация горизонтального эмиттанта электронного пучка в накопителе. Требование минимизации эмиттанта и получение в то же время оптимизированных значений структурных функций (β_x , β_z , η_x) на азимутах вывода СИ определяют магнитную структуру достаточно однозначно.

При проектировании Сибири-2 учитывались следующие условия:

1. Основными источниками СИ по излучаемой мощности являются поворотные магниты, определяющие орбиту.

2. Все поворотные магниты одинаковы. При этом резко уменьшается стоимость таких магнитов, экспериментальные станции, работающие с излучением из поворотных магнитов, становятся взаимозаменяемыми.

3. Требования на параметры излучения одинаковы для всех поворотных магнитов, поэтому поведение β - и η -функций в зависимости от азимута также должно быть одинаковым во всех поворотных магнитах кольца.

4. Специальные источники излучения — «змейки» и ондуляторы — размещаются в достаточно длинных (~ 3 м) прямолинейных промежутках, причем в промежутках, где устанавливаются «змейки», дисперсионная функция $\eta_x = 0$.

5. Для обеспечения высокой степени симметрии магнитной структуры кольца накопитель состоит из нескольких идентичных суперпериодов, что позволяет существенно уменьшить набор работающих «машинных» резонансов.

В результате, выбранная структура Сибири-2 состоит из шести зеркально-симметричных суперпериодов, каждый из которых содержит горизонтальный ахроматический поворот и промежуток с зануленной дисперсионной функцией. Как показано в [1], для накопителя, состоящего из N ахроматических поворотов, минимальный горизонтальный эмиттанс, обусловленный квантовыми флуктуациями $\epsilon_{x\min} = kE^2\varphi_m^2$, где E — энергия электронов, $\varphi_m = \pi/N$ — угол ахроматического поворота, а постоянная k определяется конкретной структурой. Для выбранной магнитной структуры Сибири-2

$$\epsilon_{x\min} \sim 1.1 \cdot 10^{-5} E^2 (\text{ГэВ}) \cdot \varphi_m^3 (\text{рад}) = 7.9 \cdot 10^{-6} \text{ см} \cdot \text{рад}.$$

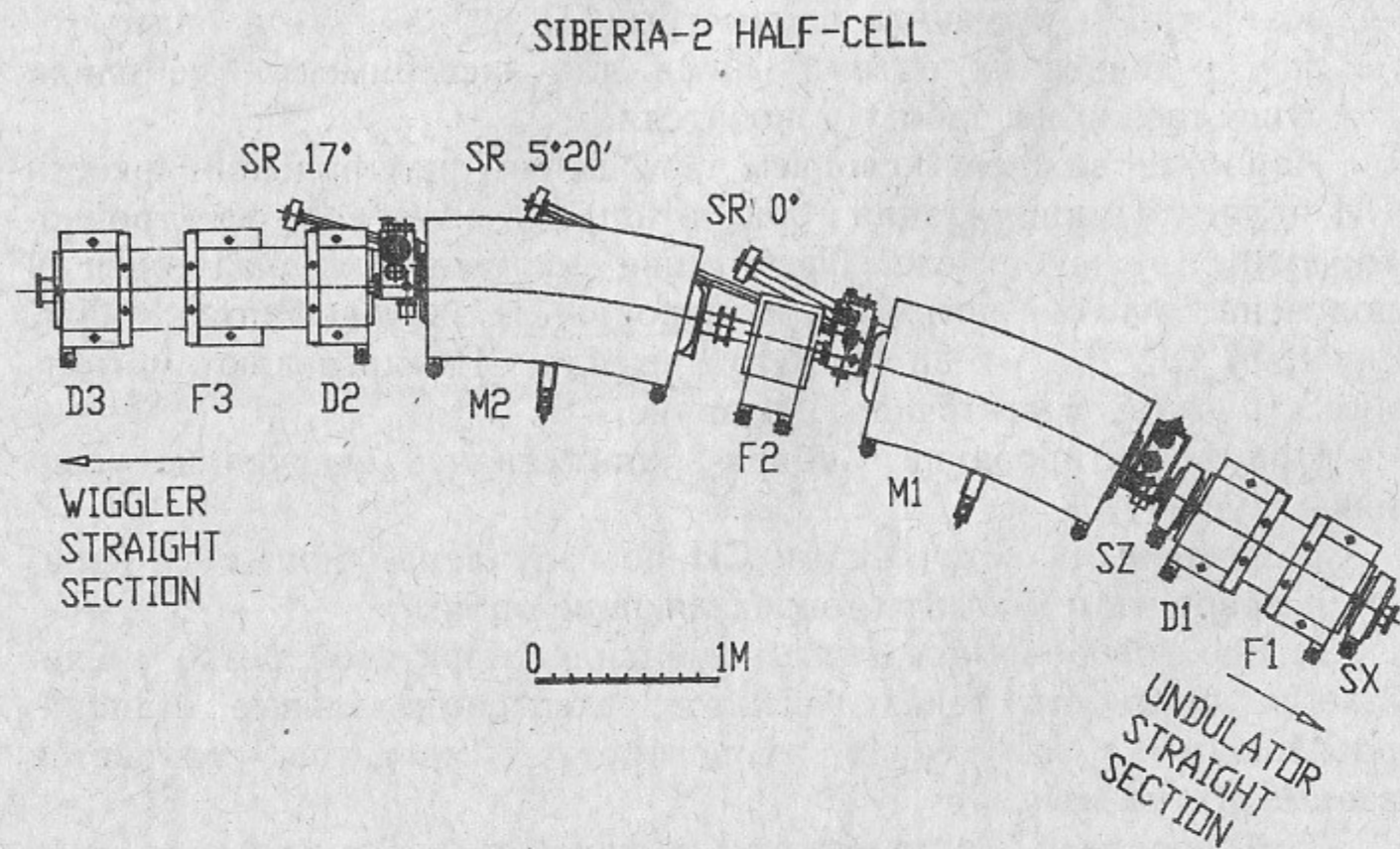


Рис. 2. Половина суперпериода накопителя Сибири-2.

Структура половины суперпериода Сибири-2, содержащая 6 квадрупольных линз и 2 поворотных магнита (см. рис. 2), функционально состоит из двух частей. В первой части, включающей в себя промежутки ондулятора, квадрупольные линзы F_1 , D_1 , F_2 и поворотные магниты, обеспечивается возможность получения ахроматического поворота и больших β_x , β_z в промежутке ондулятора. Вторая часть, включающая в себя линзы D_2 , F_2 , D_3 и промежуток змейки, позволяет изменять частоты бетатронных колебаний без нарушения ахроматического поворота. На рис. 3 показаны бетатронные функции 1/2 суперпериода Сибири-2.

Минимальный возможный эмиттанс в Сибири-2 достигается при оптимизации поведения β_x - и η_x -функций в поворотных магнитах. Особенностью структуры является то, что используются два 15-градусных поворотных магнита с фокусирующей линзой F_2 между ними вместо одного 30-градусного магнита. Это позволяет легко управлять положением минимума β_x в магните при получении необходимого эмиттанса. В результате, во всех поворотных магнитах величина β_x не превышает 3.5 м, а в точках излучения равна 2.5 и 0.6 м, что обеспечивает вывод излучения с яркостью, близкой к максимально возможной.

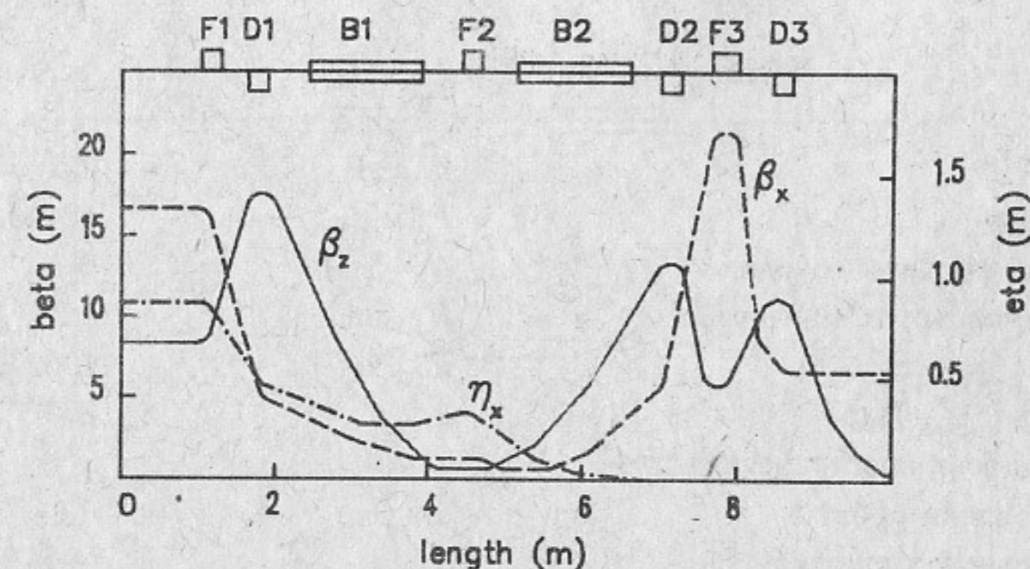


Рис. 3. Структурные функции половины суперпериода Сибири-2.

Промежутки, предназначенные для постановки ондуляторов, характеризуются большими бетатронными функциями, необходимыми для получения малорасходящегося электронного пучка, $\beta_x = 15$ м, $\beta_z = 5$ м и малой дисперсионной функцией $\eta_x = 90$ см, при которой синхротронные колебания не дают большого вклада в размер пучка. В промежутках, предназначенных для постановки сверхпроводящих «змеек» с большим магнитным полем, дисперсионная функция и ее производная равны нулю ($\eta_x = \eta'_x = 0$). Благодаря этому есть возможность при постановке «змеек» уменьшать эмиттанс. β_z -функция в центре промежутка «змейки» мала (~ 0.5 м), что гарантирует малый сдвиг вертикальной бетатронной частоты при постановке сильнополевых «змеек». Горизонтальная бета-функция достаточно велика ($\beta_x = 6$ м), чтобы не накладывать слишком жесткое ограничение на точность зануления дисперсионной функции.

Расчет структуры накопителя Сибири-2 подразумевал также минимизацию натурального хроматизма. Для компенсации хроматизма в промежутке с $\eta_x \neq 0$ каждого суперпериода размещены (рис. 2) секступольные линзы, по две в x - и z -направлениях.

Основные параметры Сибири-2 приведены в табл. 1.

Рассчитанная структура имеет довольно большие биения бета-функций, большие градиенты квадрупольных линз и сильные секступоли для компенсации хроматизма. Это означает, что коэффициент γ усиления ошибок выставки элементов (т. е. отношение среднеквадратичной величины искажения замкнутой орбиты в накопителе к среднеквадратичному смещению магнитных элемен-

Таблица 1

Основные параметры Сибири-2

Энергия	E , ГэВ	2.5
Периметр	P , м	124, 128
Количество суперпериодов	N	6
Поле в поворотах магнитных	$B_{1,2}$, кГс	4.25; 17
Радиусы поворота	$R_{1,2}$, см	1962.6; 490.65
Бетатронные числа	ν_x, ν_z	7.75; 7.72
Коэффициент пространственного уплотнения орбит	α	$8.8 \cdot 10^{-3}$
Натуральный хроматизм	ξ_x, ξ_z	-21.8; -19.9
Горизонтальный эмиттанс	ϵ_x , см·рад	$7.9 \cdot 10^{-6}$
Времена затухания	τ_z, τ_x, τ_s , мс	3.04; 3.14; 1.5
Среднеквадратичный разброс энергии в пучке	σ_E/E	$9.54 \cdot 10^{-4}$
Потери энергии на оборот	кэВ	681.1
Частота обращения	МГц	2.4152
Кратность ВЧ		75
Напряжение ВЧ	$U_{ВЧ}$, МВ	1.5—1.8
Частота ВЧ	МГц	181.14
Максимальный ток	мА	
одногустковый режим		100
многогустковый режим		300
Энергетическая апертура	$(\Delta E/E)_{\max}$	$\pm 2 \cdot 10^{-2}$
Время жизни по Тушеку при токе 100 мА, связь $\kappa=0.2$	часов	5
Длина сгустка ($U_{ВЧ}=1.8$ кВ)	$2.35\sigma_s$, см	4.4

тов относительно расчетного положения) будет велик ($\gamma_z=39$, $\gamma_x=43$). Поэтому для начального периода работы Сибири-2 целесообразно предусмотреть режим, в котором этот коэффициент мал. Структурные функции в одном из вариантов такого режима показаны на рис. 4. В этом режиме сила квадрупольных магнитов меньше, чем в основном, примерно в 3 раза, а секступольных — в 10 раз. Коэффициент усиления ошибок снижается примерно в 4 раза ($\gamma_x=\gamma_z=10$).

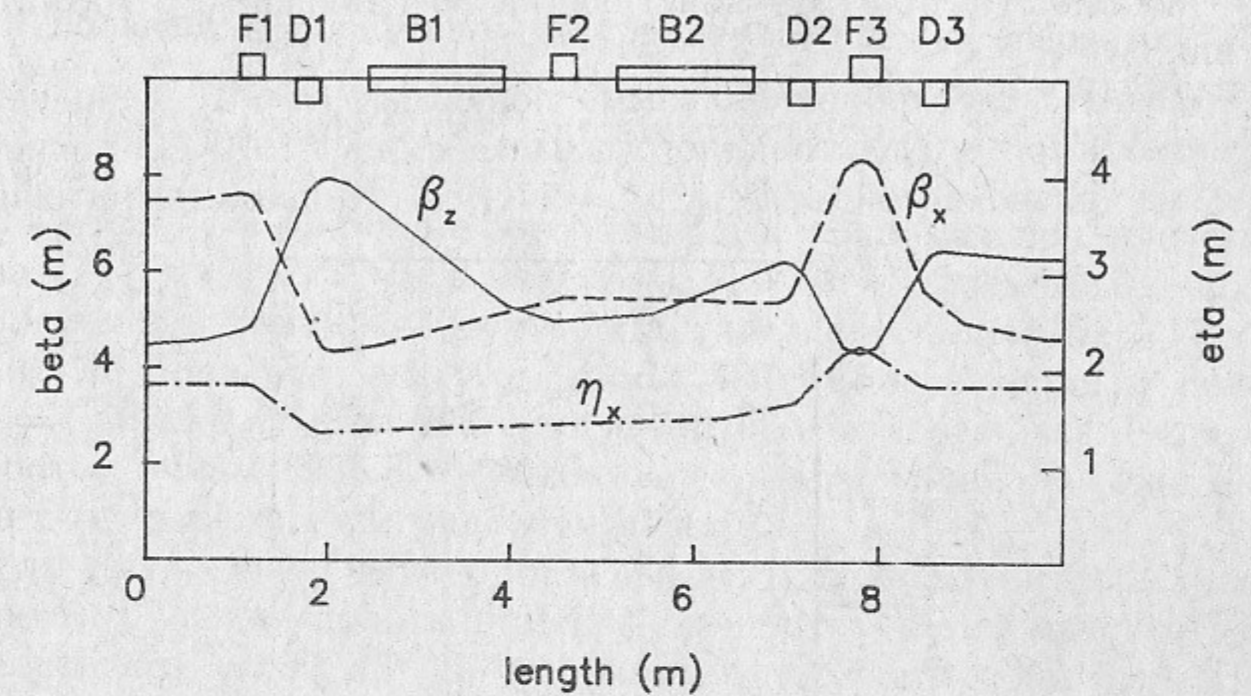


Рис. 4. Структурные функции («гладкий» вариант).

ЭЛЕМЕНТЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СИБИРИ-2

Магнитная система накопителя включает в себя следующие типы магнитных элементов:

- поворотные магниты для задания реперной орбиты;
- квадрупольные линзы для осуществления фокусировки пучка;
- секступольные линзы для коррекции хроматизма;
- октупольные линзы для контроля кубической нелинейности;
- skew-квадрупольные линзы для контроля вертикального размера пучка;
- элементы, корректирующие замкнутую орбиту, и другие типы коррекций.

Поворотный магнит

Магнитная система Сибири-2 включает в себя 24 поворотных 15-градусных магнита, запитанных последовательно. Магнит О-типа с размещением обмоток возбуждения на полюсах имеет сравнительно небольшую длину при больших поперечных размерах, что позволяет легко выводить СИ не только из магнита, но и «змеек» и ондуляторов, расположенных в прямолинейном промежутке.

Вместе с тем такая конфигурация обеспечивает лучшее качество поля и большую простоту конструкции по сравнению с магнитами С-типа.

Магнит с плоскопараллельными полюсами ($n=0$) выполнен из магнитомягкого нешихтованного железа типа АРМКО. Расчетное поле на равновесной орбите $H_0=17$ кГс. Кривая намагничивания

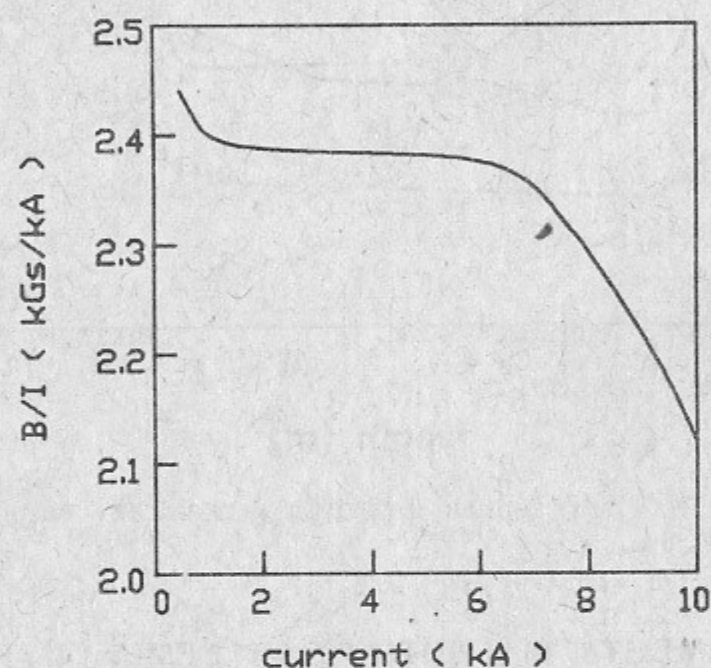


Рис. 5. Зависимость (B/I) от I в поворотном магните.

показана на рис. 5. Характеристическая длина волны СИ на энергии $E=2.5$ ГэВ равна $\lambda_c=1.75$ Å.

Магнитное поле в зазоре магнита зависит от азимута так, что на краю магнита, примыкающем к длинному прямолинейному промежутку, есть участок с полем, равным $1/4$ от максимального значения. Это распределение поля достигается с помощью специального размещения обмотки питания магнита при неизменном зазоре между полюсами. Такая конструкция позволяет:

- обеспечивать возможность использования длинноволновой части СИ из магнита, не заботясь о подавлении более жесткого излучения;
- разделить излучение из магнита и специальных генераторов СИ;
- значительно уменьшить тепловую нагрузку на образцы при работе в области мягкого рентгена;
- уменьшить тепловой поток излучения с участков орбиты на краях магнита в прямолинейный промежуток, в котором будут установлены сверхпроводящие системы, требующие глубокого охлаждения.

Основные сечения поворотного магнита показаны на рис. 6. Магнитный зазор между полюсами равен 42 мм, размер рабочей части полюсов в поперечном направлении (между фасками) составляет 140 мм. Для устранения влияния эффектов насыщения полюс выполнен с фасками, снятыми под углом 30° со стороной 60 мм.

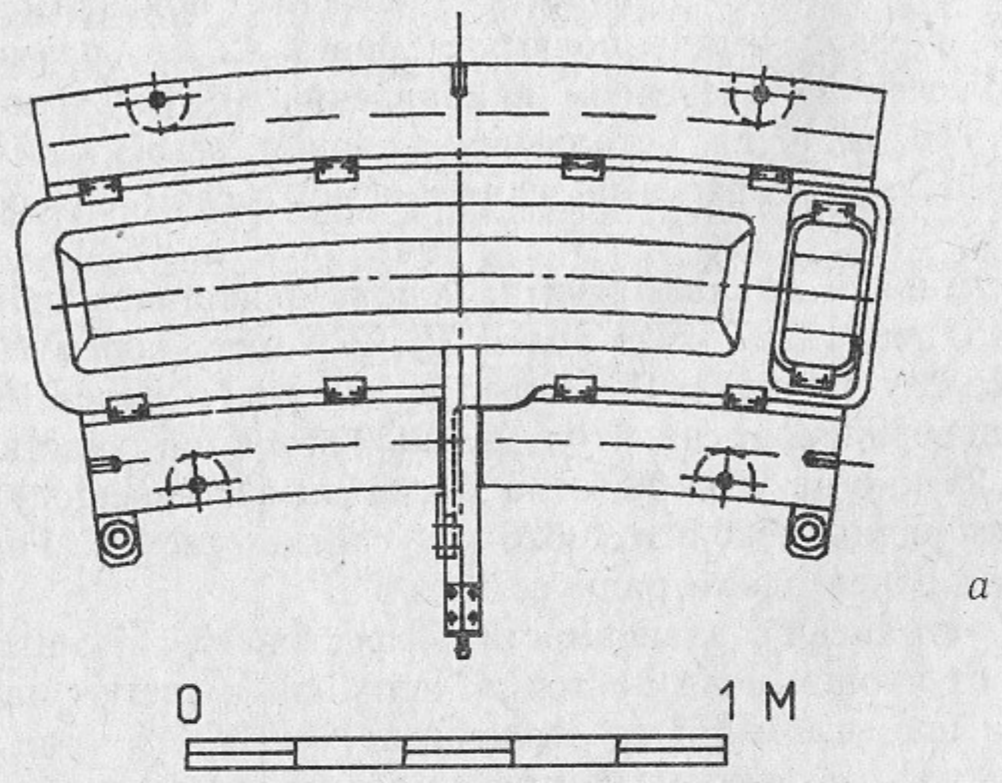
Эффективная длина магнита, использованная при расчетах, равна 1457 мм (1227 мм с полем H_0 , 230 мм с полем $H_0/4$). Длина по железу равна 1447.4 мм. На участке с полем $H_0=17$ кГс магнит поворачивает на угол $\varphi=14^\circ 30' 5$, а на участке с полем $H_0/4=4.25$ кГс на угол $29' 5$ (по магнитным измерениям). Радиусы поворотов равны 4906.5 и 19626 мм, соответственно. Реально весь магнит выполнен одним радиусом 4906.5.

Для устранения зависимости эффективной магнитной длины магнита от уровня поля на торцах длинного участка магнита сняты фаски под углом 45° со сторонами 41 и 38 мм (рис. 6,а). При таких фасках эффективный край магнита со стороны большого поля совпадает с геометрическим краем. Фаска на другом краю полюса обеспечивает нужную эффективную длину всего магнита. На участке с полем $H_0/4$ фаски снимать не надо вследствие отсутствия насыщения.

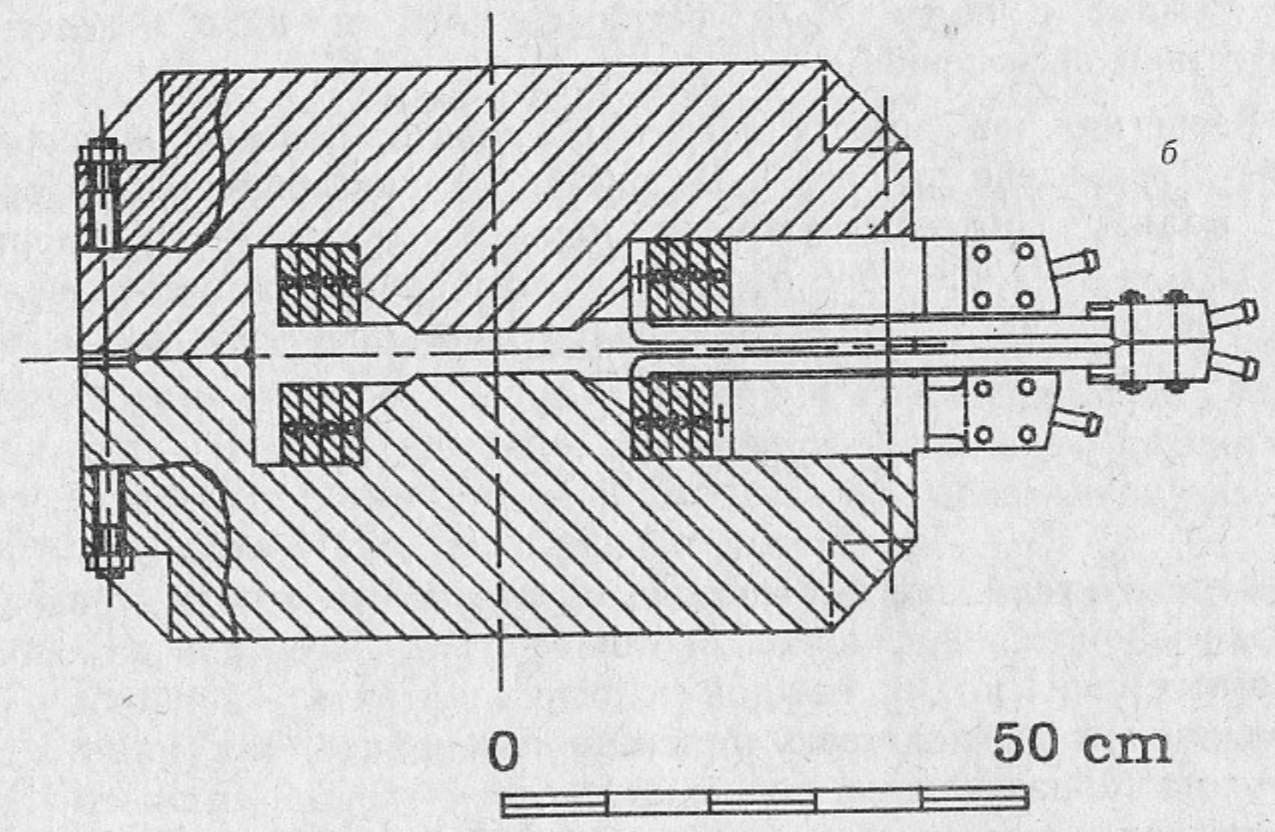
Расчетная зависимость магнитного поля от поперечной координаты x приведена на рис. 7. На рис. 8 показана область «хорошего поля» соответствующего относительному отклонению $|\Delta H/H_0|=10^{-3}$ при поле $H_0=17$ кГс. Выбранная геометрия полюсов обеспечивает в требуемой радиальной апертуре $2a_x=60$ мм квадратичную нелинейность не более

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = 2.5 \frac{\text{Гс}}{\text{см}^2}.$$

Конструктивно магнит состоит из двух симметричных половин (верхней и нижней, рис. 6,а), которые стягиваются при помощи 4 сквозных шпилек. Вес каждой половины магнита ~ 2 т, они устанавливаются на подставку при помощи крана. Для монтажных работ на торцах каждой половины предусмотрены рым-болты. Геодезическая выставка магнита осуществляется при помощи точных подвижек по горизонтали и вертикали, имеющих на регулируемой подставке. Координатная привязка магнита осуществляется благодаря двум реперным знакам, кронштейны которых установлены на нижней половине магнита и обрабатываются одновременно



a



b

Рис. 6. a — Вид сверху на нижнюю половину поворотного магнита; б — поперечное сечение поворотного магнита.

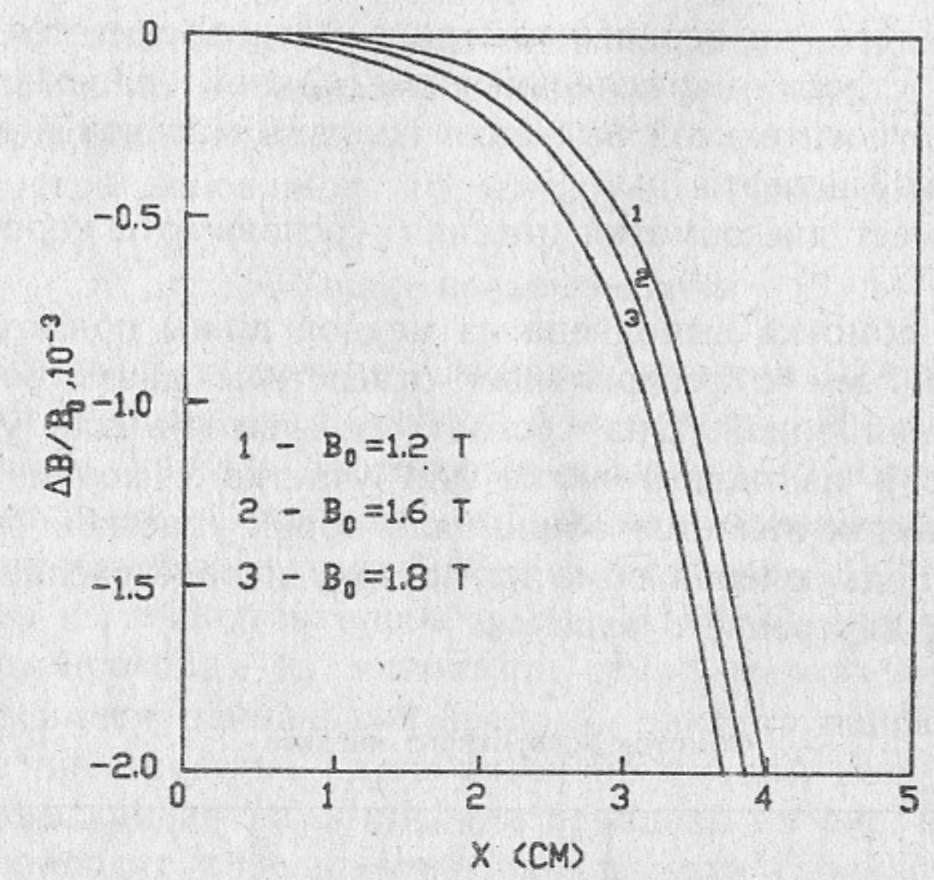


Рис. 7. Зависимость поля в поворотном магните от поперечной координаты для разных уровней тока.

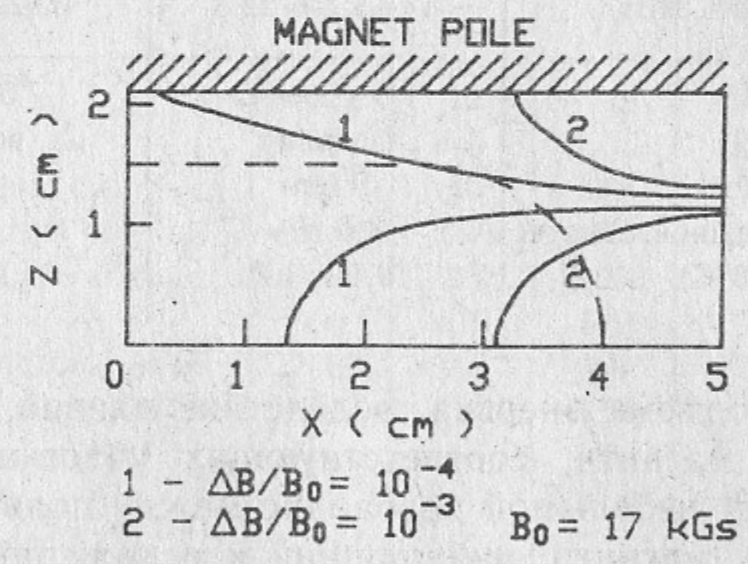


Рис. 8. Область «хорошего поля» в поворотном магните (штриховой линией показана вакуумная камера).

с ней. Кроме того, на верхней половине магнита имеется базовая поверхность, строго параллельная медианной плоскости. Для однозначной относительной выставки половин магнита в конструкцию заложены 3 штифта.

Магнит имеет две обмотки питания — основную и корректирующую.

Основная обмотка выполнена из медной шины прямоугольного сечения 70×17 мм с центральным отверстием диаметром 11 мм для охлаждения водой. Она состоит из 4 витков для участка с полем 17 кГс и из одного витка для участка с полем 4.25 кГс, причем этот виток является общим для обоих участков (рис. 6,а). Выводы для подключения обмотки по току и воде сделаны в центре магнита с внутреннего радиуса.

Таблица 2

Обмотки поворотного магнита

	Основная обмотка	Корректирующая обмотка
Сечение по меди, мм ²	1095	1.54 (Ø1.4 мм) (провод ПСДК)
Ток, А	7200	3
Количество витков	4×2=8	258×2=516
Плотность тока, А/мм ²	6.6	2.0
Рассеиваемая мощность, кВт	11.4×2=22.8	0.022×2=0.044
Падение напряжения на концах обмотки, В	1.6×2=3.2	7.3×2=14.6
Тип охлаждения	водяное	воздушное
Давление воды на входе	8 атм	—
Потери давления на одной обмотке	3.5 атм	—
Расход воды ($\Delta T=10^\circ\text{C}$)	16.4 л/мин	—

В процессе подъема энергии, вследствие разной степени насыщения полюсов магнита, соответствующих участкам с разными полями, возникает небольшой разбаланс между полями в основной и краевой частях магнита, приводящий к искажению равновесной орбиты. Из расчета магнитных полей следует, что максимальное отклонение от линейной зависимости поля от тока составляет не более 5% на энергии 2.5 ГэВ, а искажение орбиты при этом $\delta_{x \max} \approx 1$ мм. Для компенсации такой нелинейности на краевых участках каждого полюса поворотных магнитов достаточно разместить обмотки коррекции с $I\omega=0.4$ кА·в. Для работы с коррек-

торами по отклонению равновесной орбиты в проекте принято $I\omega=1.6$ кА·в. Это позволяет проводить промеры апертуры на энергии инжекции (450 МэВ).

Параметры основной и корректирующей обмоток приведены в табл. 2.

Квадрупольные линзы

В магнитной структуре Сибири-2 имеется 72 квадрупольные линзы, обеспечивающие жесткую фокусировку. Линзы объединены в 6 семейств, каждое из которых содержит 12 линз, запитанных последовательно. Семейство объединяет одноименные линзы в каждом суперпериоде (например, F_1 , см. рис. 2). Полюсы линз выполнены из нешихтованного железа АРМКО, остальные элементы магнитопровода — из магнитной стали марки 08КП. Полюсы всех линз имеют одинаковый профиль, диаметр вписанного в межполюсное пространство круга равен 56 мм для всех квадрупольей. Измеренная кривая намагничивания приведена на рис. 9. Насыщение железа приводит к нелинейной зависимости градиента от тока в линзе. Эта нелинейность в данном случае не превышает 8% при

Таблица 3

Параметры квадрупольных линз

Параметры	F_1	D_1	F_2	D_2	F_3	D_3
Количество	12	12	12	12	12	12
Диаметр апертуры, см	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
Эффективная длина, см	30	30	31.5	30	40	30
Длина по железу, см	28.6	28.6	30	28.6	38.6	28.6
Градиент на 2.5 ГэВ, кГс/см	2.220	-2.752	3.050	-3.013	3.367	-3.079
Ток питания, А	490	610	670	670	760	670
Сопротивления обмоток, мОм	9.6	9.6	7.8	9.6	11.3	9.6
Напряжение на квадруполье, В	4.7	5.86	5.23	6.43	8.57	6.4
Мощность на кв. линзе (2.5 ГэВ), кВт	2.3	3.57	3.50	4.3	6.51	4.31
Мощность для цепи питания, кВт	27.7	42.9	42.0	51.7	78.2	51.7

токе 0.8 кА. По результатам магнитных измерений область поля с отклонением градиента $|\Delta G/G_0| \leq 10^{-3}$ от расчетного составляет ± 2 см по x - и z -координатам в центре линзы на максимальном градиенте. Область «хорошего градиента» показана на рис. 10.

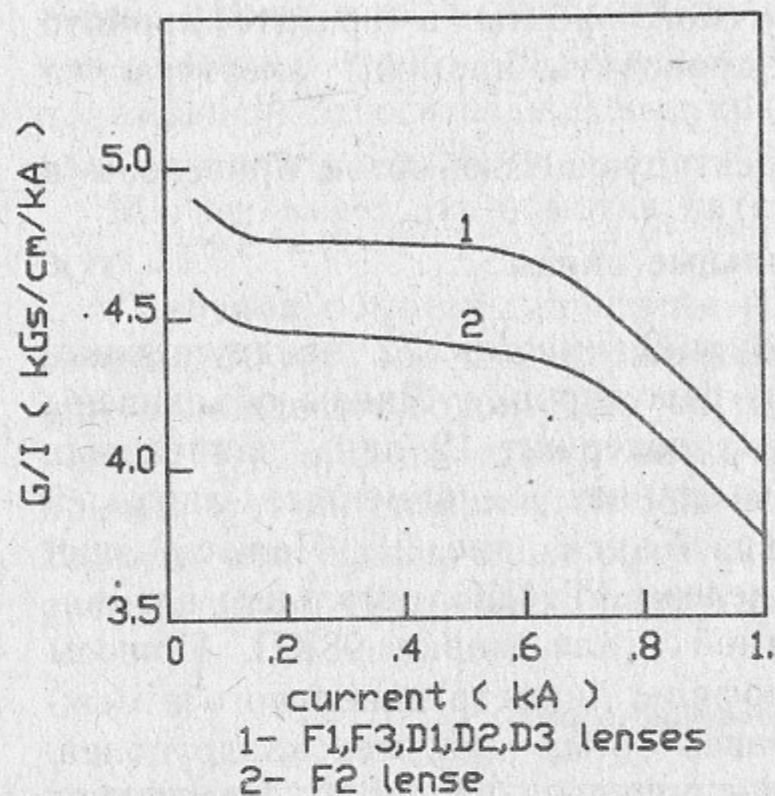


Рис. 9. Зависимость (G/I) от I для квадрупольных линз.

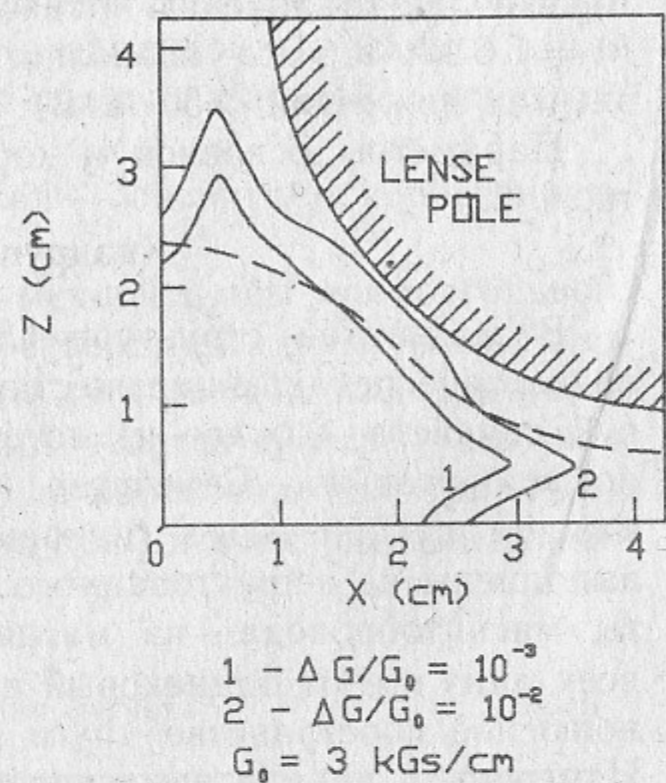


Рис. 10. Область «хорошего градиента» в квадрупольных линзах (штриховой линией показана вакуумная камера).

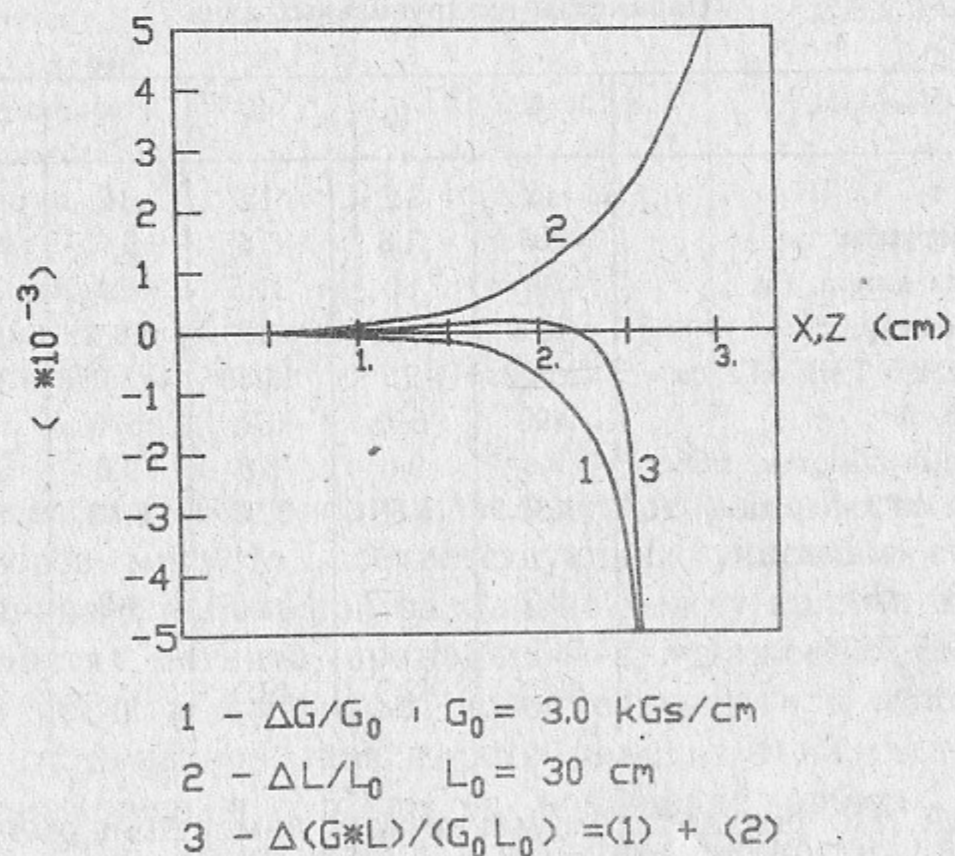


Рис. 11. Кубическая нелинейность (эффективная) для квадрупольной линзы.

В Сибири-2 синхротронное излучение из «змеек» и ондуляторов, прежде чем выйти за пределы кольца, проходит два или три квадрупольных линзы. Поэтому квадрупольная линза рассчитана на то, чтобы вакуумная камера в ней могла пропустить пучок СИ с размером по горизонтали ± 5 см. При расчетах магнитной структуры линзы разделялись на две группы по эффективной длине: 40 см (линза F_3) и 30 см (все остальные). Эффективная длина по результатам магнитных измерений приведена в табл. 3. На торцах полюсов каждой линзы сделаны фаски под углом 45° размером 17×17 мм. Измерения показали, что при таком размере фаски наблюдается наименьшая зависимость эффективной длины линзы от тока ($\delta l_{eff} \approx 0.5$ мм для тока 750 А).

Измерения показали также, что кубическая нелинейность линзы определяется, во-первых, зависимостью градиента поля от поперечных координат x и z , и, во-вторых, зависимостью от x и z эффективной длины линзы (см. рис. 11). Совместное влияние этих двух эффектов определяет эффективную кубическую нелинейность, которая составляет

$$\frac{\partial^3 H_z}{\partial x^3} = 0.3 \frac{\text{Гс}}{\text{см}^3} \quad \text{при} \quad G_0 = 3.0 \frac{\text{кГс}}{\text{см}}$$

Конструктивно каждые две или три расположенные рядом линзы объединяются в единый блок, который называется дублетом или триплетом. Каждый блок разделяется при монтаже по медианной плоскости на верхнюю и нижнюю части. Каждая часть состоит из базовой плиты, на которой осуществляется сборка двух или трех пар полюсов. Плита является одновременно магнитопроводом и несущим элементом, обеспечивающим жесткость конструкции. Таким образом, обеспечивается возможность сборки квадрупольных линз с гарантированно высокой точностью взаимного расположения полюсов. Монтаж блока сводится к точной взаимной установке нижней и верхней его частей при помощи шпоночного соединения. Части скрепляются между собой при помощи шпилек. Для контроля качества изготовления полюсов был разработан шаблон специального профиля. Точная относительная выставка полюсов производилась при помощи стальной скалки. Вес каждой линзы составляет около 1 т.

Геодезическая выставка блоков производится по двум реперным знакам, которые являются неотъемлемой частью каждого блока. Кроме этого на верхней половине блока имеется шлифованная площадка, строго параллельная медианной плоскости.

Поперечное сечение линз дублета и триплета показаны на рис. 12.

В отличие от линз дублета и триплета одиночные линзы F_2 , расположенные между магнитами, выполнены из двух (верхних и нижних) С-образных в сечении частей, что необходимо для вывода излучения из магнитов и сверхпроводящих «змеек». По этой же причине обмотки питания данной линзы размещены не вблизи медианной плоскости, а надвинуты на полюсы (рис. 13). Верхняя и нижняя половины соединяются между собой при помощи кронштейна, выполненного из немагнитного материала.

На каждом полюсе квадрупольной линзы размещены 3 обмотки: основная, обмотка коррекции градиента и обмотка дипольной коррекции.

Основная обмотка возбуждения выполнена из медной шины прямоугольного сечения 13.5×13.5 мм с центральным отверстием диаметром 8 мм для охлаждения водой. Обмотка состоит из 15 витков на каждом полюсе (14 для разрезной линзы). Особое внимание при конструировании уделялось симметричному расположению основных витков на торцах полюсов, что позволяет уменьшить нелинейные компоненты магнитного поля. Изоляция обмотки выполнена из стеклоткани, пропитанной под давлением эпоксидной смолой ЭД-6. Подключение основной обмотки по току и воде осуществляется с внутреннего радиуса накопительного кольца. Коммутация обмоток на разных полюсах осуществляется при помощи ошиновки из неохлаждаемой медной шины 80×8 мм. Основные параметры обмотки приведены в табл. 4.

Обмотки дипольной коррекции предназначены для коррекции искажений равновесной орбиты, обусловленных неправильной выставкой элементов магнитной системы накопителя. При ошибках в положении квадрупольных линз, равномерно распределенных в интервале

$$-0.01 \text{ см} < \delta_x, \delta_z < 0.01 \text{ см},$$

максимальное искажение орбиты не превышает 1 см по x и 1.2 см по z . Этот результат получен с помощью моделирования на ЭВМ для разных случайных наборов ошибок выставки. Приняв максимальную ошибку выставки $\delta_{\text{max}} = 0.04$ см получаем, что максимальное поле, которое нужно скомпенсировать в линзе, не будет превышать $H_{\text{max}} = G_{\text{max}} \cdot \delta_{\text{max}} = 140$ Гс при $G_{\text{max}} = 3.5$ кГс/см. Напряженность поля, создаваемого обмотками коррекции, можно оценить из

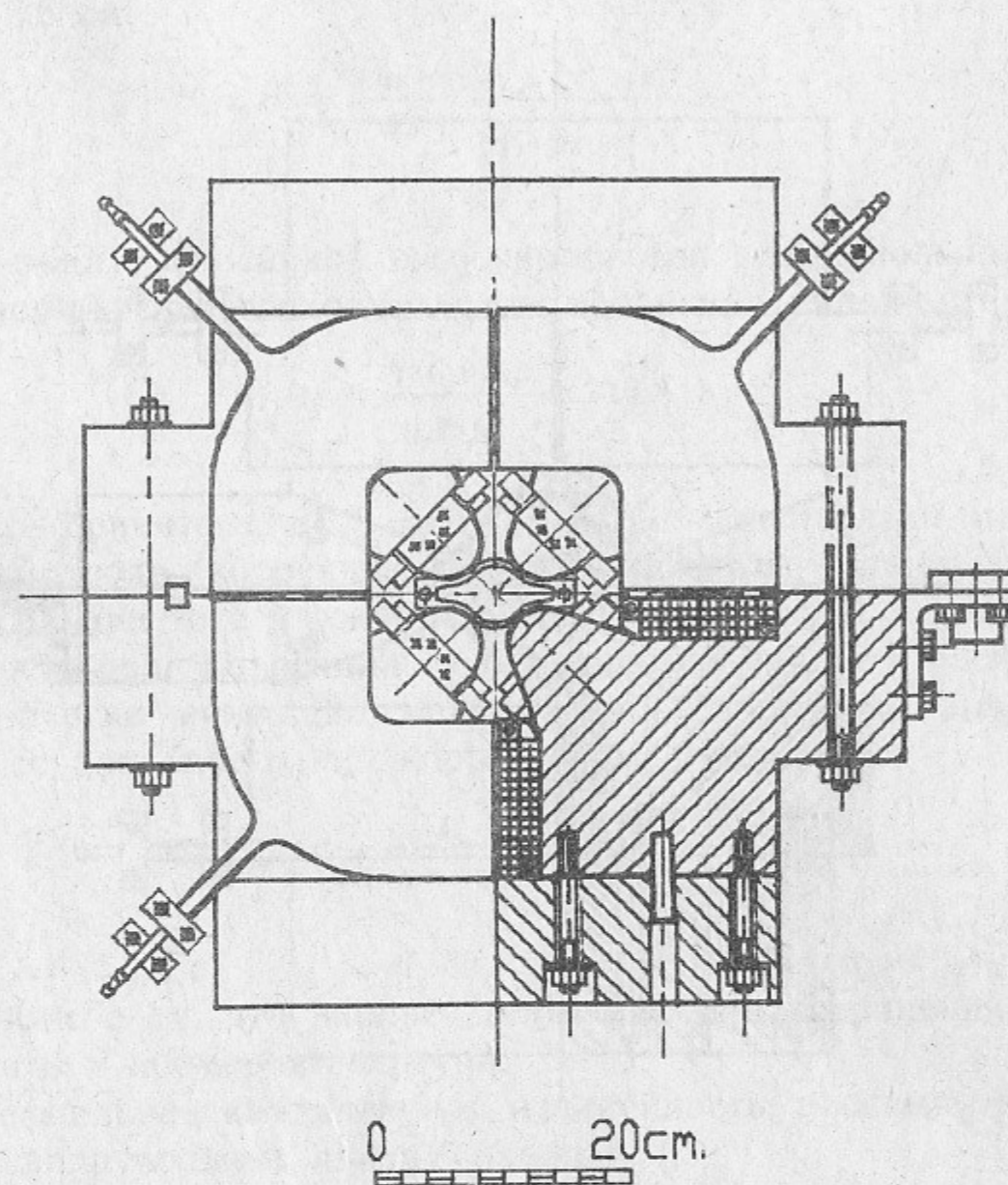


Рис. 12. Квадрупольная линза дублета или триплета.

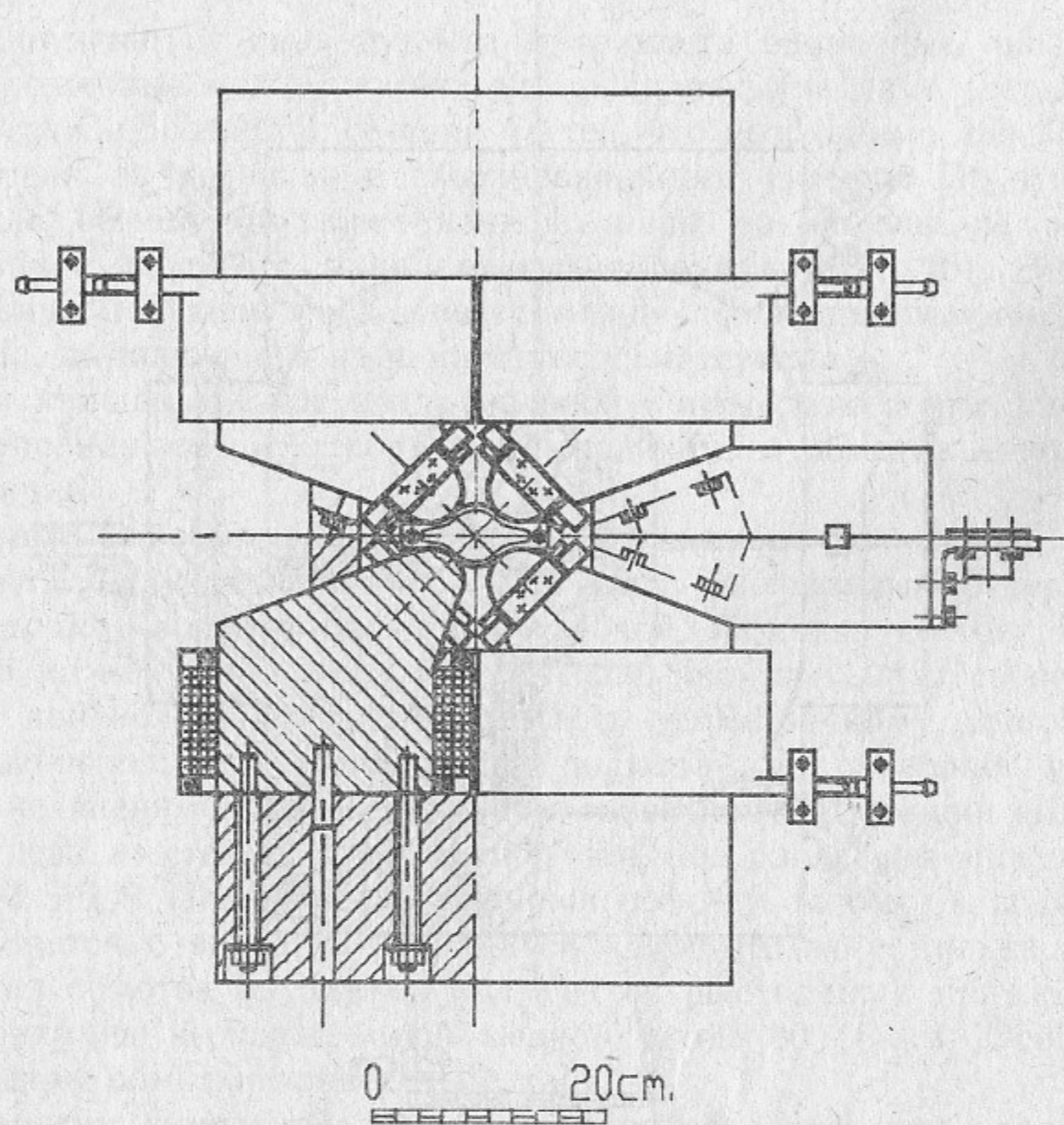


Рис. 13. Разрезная квадрупольная линза.

выражения для вертикальной компоненты поля H_z на оси x при $x < R_0 = 2.8$ см:

$$H_z(x, 0) = \frac{0.8\pi I\omega}{R_0^2} \frac{|x|}{\left(1 - \exp\left\{-\frac{\pi x^2}{R_0^2}\right\}\right)^{1/2}},$$

где R_0 — радиус вписанной окружности для квадрупольной линзы, $I\omega$ — ампер-витки. Необходимые для коррекции ампер-витки

$$I\omega = \frac{H_z(0, 0) R_0}{0.8\sqrt{\pi}} \approx 280 \text{ А} \cdot \text{в}.$$

В проекте принято $(I\omega)_{\max} = 310 \text{ А} \cdot \text{в}$. По результатам магнитных измерений поле коррекции в центре линзы равно $H_k(\text{Гс}) = 30 \cdot I_k(\text{А})$ при токе в основной обмотке менее 500 А. Измеренная зависимость поля коррекции от x хорошо совпадает с расчетной.

На энергии инжекции максимальное искажение равновесной орбиты, создаваемое одним корректором, будет равно

$$(x, z)_{\max} = \frac{H_k l_L}{2H\rho \sin \pi \nu_{x,z}} \sqrt{(\beta_1 \beta_2)_{x,z}} \approx 1.5 \text{ см}$$

при $H_k = 150 \text{ Гс}$, $\nu_{x,z} = 7.75$, $l_L = 40 \text{ см}$, $(\beta_1 = \beta_2)_{x,z} = 10 \text{ м}$, $H\rho = 1500 \text{ кГс} \cdot \text{см}$, что вполне достаточно для устранения искажений орбиты и промеров апертуры.

Максимальная квадратичная нелинейность, вносимая корректорами в квадрупольных линзах, равна

$$H''_{\max} = \frac{\pi}{2} \frac{H_z}{R_0^2} = 6.4 \left(\frac{\text{Гс}}{\text{см}^2 \cdot \text{А}}\right) I_k(\text{А}).$$

Это на порядок меньше самой слабой секступоли для компенсации хроматизма.

Обмотки дипольной коррекции скоммутированы так, что в F -линзах имеется x -корректор, а в D -линзах — z -корректор.

Обмотки коррекции градиента предназначены, во-первых, для компенсации ошибок, допущенных при изготовлении полюсов линз. При отклонении в размере полюса $\delta R_0 \leq 0.02 \text{ мм}$ отклонение градиента будет равно

$$\frac{\Delta G}{G} = 2 \frac{\delta R_0}{R_0} = 1.4 \cdot 10^{-3}.$$

Таблица 4

Обмотки квадрупольных линз

	Основная обмотка	Обмотка коррекции градиента	Обмотка дипольной коррекции
Сечение по меди, мм ²	132	2.06 (Ø 1.62) ПЭЛБО	2.06 (Ø 1.62) ПЭЛБО
Максимальный ток, А	1000	5	5
Количество витков	15 (14)	28	62
Плотность тока, А/мм ²	7.58	2.43	2.43
Падение напряжения на концах обмотки, В	2.4 (1.95)	1.15	2.65
на всей линзе, В	9.6 (7.8)	4.6	10.6
Тип охлаждения	водяное	воздушное	воздушное
Расход воды, м ³ /час	1.6 (1.1)	—	—
Падение давления воды, атм	4	—	—
Источник тока	ИСТ-1000/115	УМ-4	УМ-4
Максимальное напряжение/ток	115 В/1000 А	20 В/5 А	20 В/5 А

Следовательно, требуются корректирующие обмотки с

$$(I\omega)_k = 1.4 \cdot 10^{-3} (I\omega)_0 = 1.4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4 = 14 \text{ (А} \cdot \text{В)}.$$

Во-вторых, эти обмотки необходимы для локальной компенсации возмущений магнитной структуры, вносимых сильнополевыми «змейками». Сдвиг бетатронных частот, связанный с постановкой 3-полюсной змейки с максимальным полем $H = 120$ кГс и длиной полюса $d \approx 20$ см, равен $\Delta v_w \approx 7 \cdot 10^{-3}$. При этом для двух симметричных относительно змейки линз

$$\Delta G_L = 2\pi \Delta v_w \frac{H\rho}{(l \cdot \beta z)_L} = 0.01 \text{ кГс/см}.$$

Это соответствует $\Delta G/G = 3.5 \cdot 10^{-3}$, следовательно, необходимое число ампер-витков для коррекции равно

$$(I\omega)_k = 3.5 \cdot 10^{-3} (I\omega)_0 = 35 \text{ (А} \cdot \text{В)}.$$

С учетом этих двух требований и с запасом ~ 2 для коррекции градиента достаточно $(I\omega)_k = 100$ А·в на энергии 2.5 ГэВ. В проекте принято $I\omega = 140$ А·в. По результатам измерений G_k (Гс/см) = $8.5 \cdot I_k$ (А) при токе в основной обмотке менее 500 А.

Обмотки дипольной коррекции и коррекции градиента выполнены из медного провода типа ПЭЛБО с покрытием эмалью и в нитяной изоляции. Намотка корректирующих обмоток, размещенных на каждом полюсе, производится отдельно, после чего обмотки склеиваются. Обмотки монолитятся в эпоксидном композите и размещаются на полюсах линз вблизи апертуры. Основные параметры обмоток коррекции приведены в табл. 4.

Секступольные линзы

В магнитной структуре Сибири-2 имеется 36 секступольных линз, разделенных на 4 семейства, в каждом из которых линзы запитаны последовательно. Два семейства по 12 линз в каждом размещены в промежутках с ненулевой η -функцией и предназначены для компенсации натурального хроматизма накопителя. Расположение линз этих семейств S_x и S_z показано на рис. 2. Линзы крепятся винтами к нижней базовой плите дублета. Необходимость применения этих линз приводит к ограничению динамической апертуры Сибири-2. Остальные 2 семейства по 6 секступолей в каждом расположены в промежутке с зануленной η -функцией и предназначены для увеличения динамической апертуры. Линзы крепятся винтами к нижней базовой плите триплета в промежутках между квадрупольями. Расположение секступолей в каждом суперпериоде одинаковое.

Все секступольные линзы имеют одинаковую конструкцию (рис. 14).

Полюсы линз и ярмо изготавливаются из нешихтованного железа типа АРМКО. Диаметр вписанной в полюсы окружности равен 59 мм. Ярмо секступоли состоит из четырех частей для удобства сборки вокруг вакуумной камеры. Части ярма соединяются между собой при помощи болтов, их взаимное расположение задается штифтами. Места для крепления полюсов на ярме обработаны по радиусу, так же, как и соответствующая поверхность полюса (см. рис. 14). Нужное угловое положение полюса фиксируется при помощи специального бокового винта. Такая конструкция обеспечивает точную выставку полюсов относительно центра секступоли без применения штифтов. Полюсы крепятся к ярму двумя винтами.

Геодезическая выставка секступольной линзы производится с помощью геознака, расположенного с внутренней стороны накопительного кольца на уровне медианной плоскости. Вертикальное

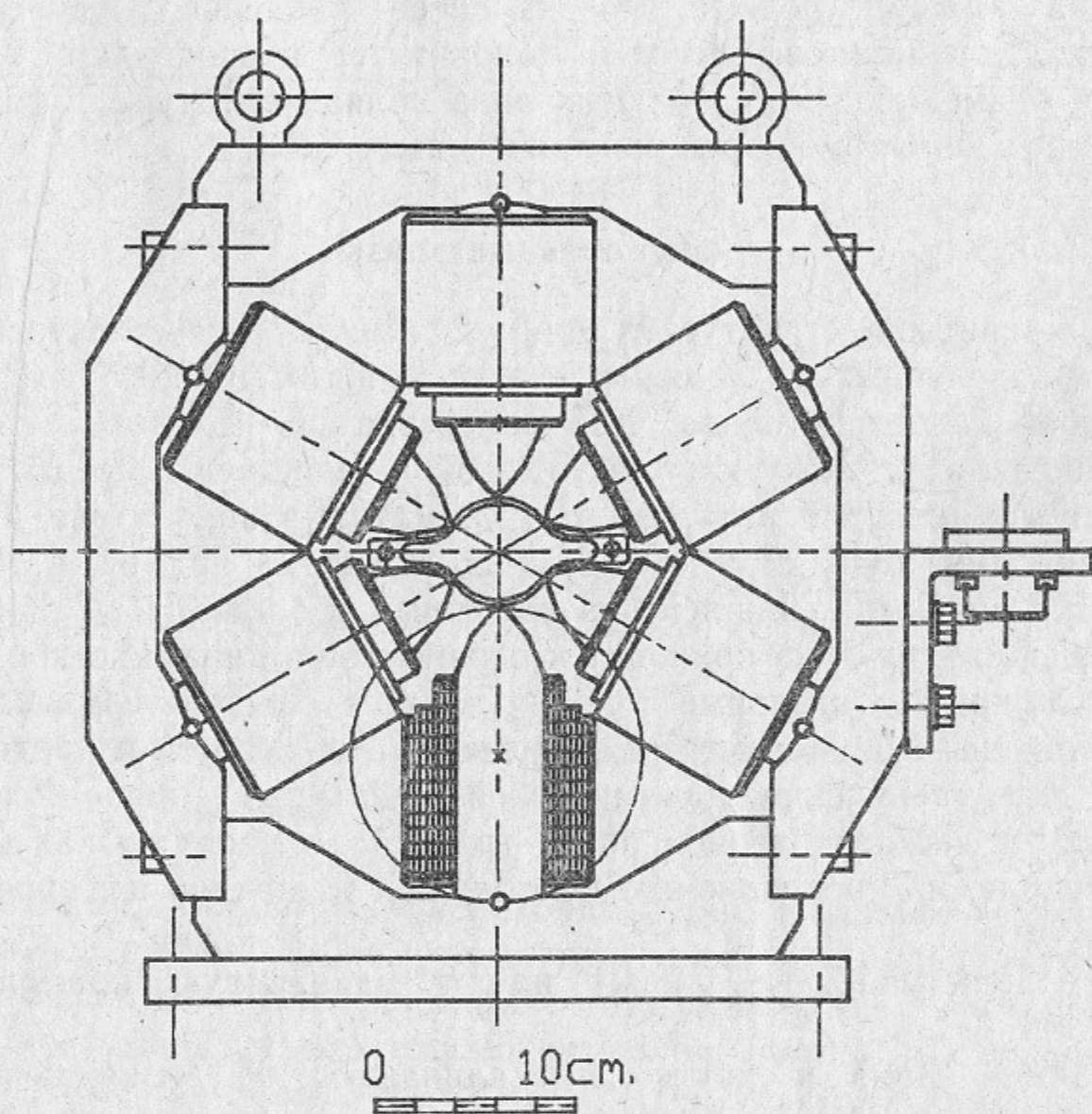


Рис. 14. Секступольная линза.

положение секступоли задается самой ее конструкцией, горизонтальная выставка осуществляется с помощью точных подвижек, закрепленных на нижней базовой плите дублета или триплета. Для удобства транспортировки на верхней части ярма имеется рым-болт.

Все обмотки секступольной линзы сделаны одинаковыми, что позволяет легко заменять их запасными в случае неисправности. Размещение обмотки на полюсе и межполюсные зазоры позволяют использовать в секступоли такую же вакуумную камеру, как и в квадрупольных линзах. Каждая обмотка состоит из 154 витков медной шины ПСДК прямоугольного сечения в изоляции из стеклоткани. Наличие такой изоляции позволило отказаться от специальной межслойной изоляции, а также от изоляции между обмоткой и полюсом. Это сделало обмотку более компактной и улучшило отвод выделяемой мощности. Кроме того, шина прямоугольного сечения обеспечивает большой коэффициент заполнения катушки по сравнению с круглым проводом. После намотки катушка монолитится в эпоксидном компаунде. Питание подводится к клеммнику, закрепленному на ярме секступоля.

Основные параметры секступольной линзы приведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры секступольной линзы

Количество	36
Диаметр вписанной окружности, мм	59
Длина полюса, см	10
Длина линзы по обмоткам, см	13,8
Эффективная длина по магн. изм., см	11,4
Однородность $\Delta H''/H''_0$ при $R < 1.5$ см	10%
Сечение шины ПСДК по меди	$1.6 \times 6.3 = 10.08 \text{ мм}^2$
Число витков в одной обмотке	154
Максимальный ток, А	25
Максимальная плотность тока, А/мм ²	2.5
Сопротивление обмотки, Ом	0.092
Максимальная выделяемая мощность в линзе, Вт	$57.5 \times 6 = 345$
Охлаждение обмотки	воздушное
Максимальный градиент (магн. изм.) кГс/см ²	0.86
Вес секступоли, кг	~120
Источник тока	ТИР-25 (25 А, 200 В)

Таблица 6

Параметры октупольной линзы

Параметры	Октуполь	Skew-квадруполь
Количество	12	12
Диаметр вписанной окружности, мм	66	66
Длина полюса, см	16	16
Длина линзы по обмоткам, см	18.4	18.4
Сечение провода ПСДК по меди	10.08 мм ²	10.08 мм ²
Число витков на одной обмотке	164	32
Сопротивление одной обм., Ом	0.13	0.019
Максимальный ток I , А	25	25
Максимальная мощность, выделяемая в линзе, Вт	650	95
Охлаждение обмотки	воздушное	воздушное
Эффективная длина, см	16.4	18.0
$\frac{H'''}{I} \left(\frac{\text{Гс}}{\text{см}^3 \cdot \text{А}} \right); \frac{H'}{I} \left(\frac{\text{Гс}}{\text{см} \cdot \text{А}} \right)$ на линейном участке	33	7.4
$H'''_{\text{max}} \left(\frac{\text{Гс}}{\text{см}^3} \right); H'_{\text{max skew}} \left(\frac{\text{Гс}}{\text{см}} \right)$	525	185
Источник тока	ТИР-25	ТИР-25
Вес октуполи, кг	~180	—

Октупольные линзы

Магнитная система Сибири-2 содержит два семейства по 6 октупольных линз, предназначенных для компенсации кубической нелинейности. В каждом из семейств линзы запитаны последовательно. Линзы размещены в промежутках между квадрупольными линзами триплета, свободных от секступолей. Кроме основных октупольных обмоток, на полюсах этих линз размещены skew-квадрупольные обмотки, предназначенные для контроля вертикального размера пучка (связи горизонтальных и вертикальных бетатронных колебаний).

Конструкция ярма и мест крепления полюсов на октуполях аналогичны конструкции секступольных линз за исключением большего числа полюсов (рис. 15). К особенностям этих линз можно отнести то, что их полюсы дополнительно вытянуты вдоль пучка для увеличения эффективной длины линзы.

Магнитные измерения показали, что включение только

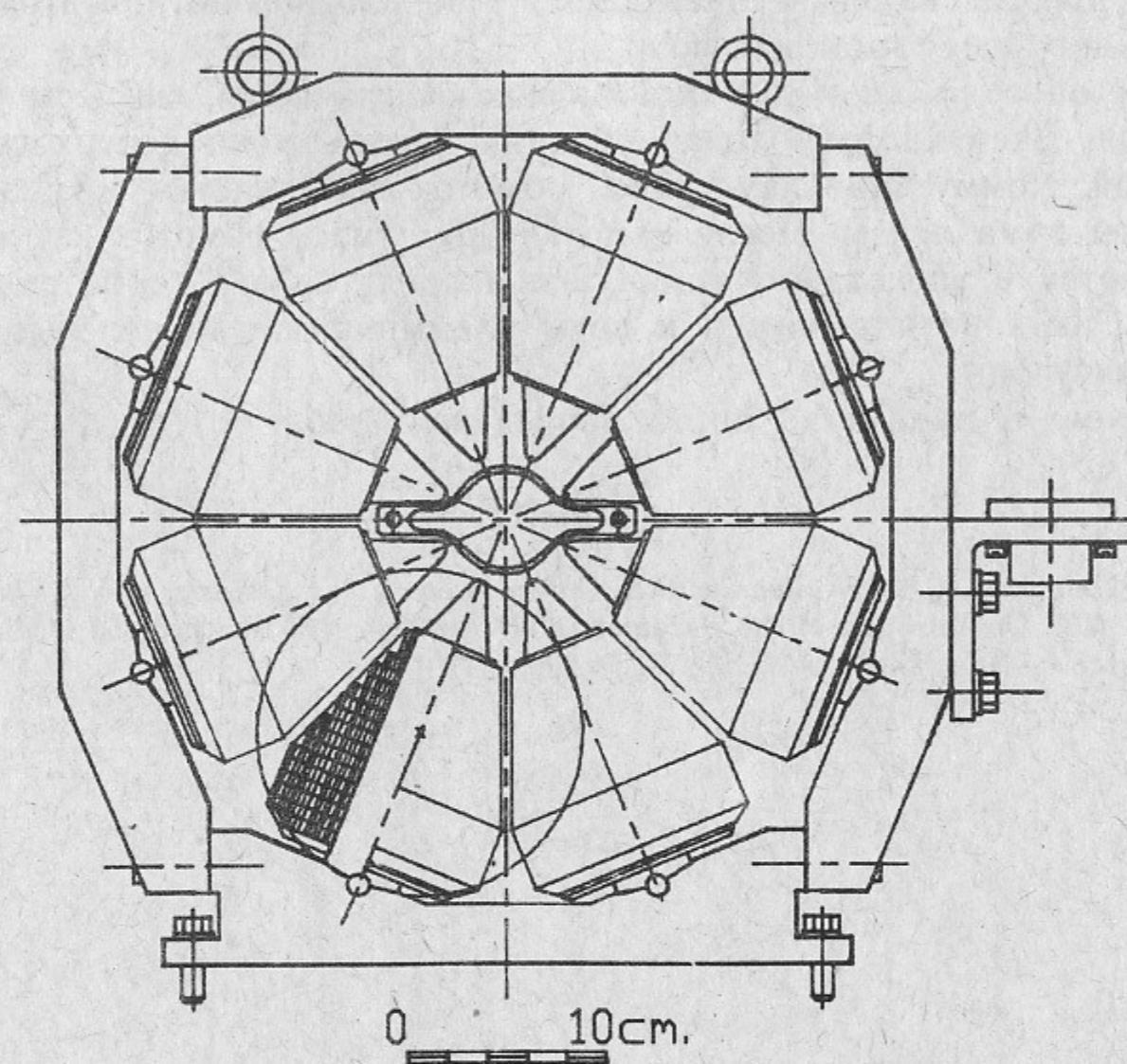


Рис. 15. Октупольная линза.

skew-квадрупольных обмоток не приводит к насыщению железа линзы вплоть до максимального тока $I_{\max} = 25$ А. Влияние насыщения при включении только октупольных обмоток начинается при уровне $I \approx 10$ А. При одновременной запитке двух типов обмоток часть полюсов начинает насыщаться еще раньше, но при этом не возникает новых гармоник поля.

Все обмотки октупольных линз взаимозаменяемы, как и на секступоли. Skew-квадрупольная обмотка расположена поверх октупольной. Коммутация двух типов обмоток выполняется по разные стороны ярма линзы. После намотки двух типов обмоток катушка запекается в эпоксидном компаунде и представляет собой единое целое. Питание подводится к двум клеммникам, закрепленным на ярме октуполи.

Основные параметры линзы приведены в табл. 6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Korchuganov V.N., Kulipanov G.N., Mezentsev N.A., Skrinsky A.N., Vinokurov N.A. Optimization of the Parameters of the Dedicated Synchrotron Radiation Source for Technology.—NIM, 1983, v.208, p.11—18.

Магнитная структура Сибири-2, использовавшаяся при расчетах (1/2 суперпериода)

Элемент	Длина, см	H_z , кГс	$\frac{\partial H_z}{\partial x}$, кГс/см	$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2}$, кГс/см ²
L	144			
S _x	10			0.20
L	5			
F ₁	30		2.22	
L	30			
D ₁	30		-2.752	
L	5			
S _z	10			-0.561
L	28			
B	23	4.25		
B	122.7	17		
L	36.5			
F ₂	30		3.05	
L	36.5			
B	122.7	17		
B	23	4.25		
L	31			
D _z	30			-3.013
L	28			
F ₃	40		3.367	
L	39			
D ₃	30			-3.079
L	150			

L—промежутки между элементами; F, D—квадрупольные линзы; B—поворотные магниты; S—секступольные линзы.

*А.Г. Валентинов, П.Д. Воблый, С.Ф. Михайлов,
Н.Г. Гаврилов, Н.И. Зубков, В.Н. Корчуганов,
В.С. Кузминых, Г.Н. Кулипанов, Е.Б. Левичев,
Э.М. Трахтенберг, Г.И. Эрг*

**Магнитная система
накопителя Сибирь-2—
специализированного источника СИ**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 13 декабря 1989 г.
Подписано в печать 28.12. 1989 г. МН 10614
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2,5 печ.л., 2,0 уч.-изд.л.
Тираж 220 экз. Бесплатно. Заказ № 174

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*