

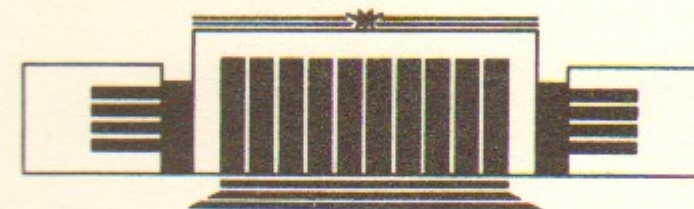


61
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

В.В.Анашин, В.С.Арбузов, Г.А.Блинов, В.Г.Вещеревич,
П.Д.Воблый, Э.И.Горникер, Н.И.Зиневич, Э.И.Зинин,
Н.И.Зубков, В.А.Киселев, Э.П.Коллеров, Г.Н.Кулипанов,
Ю.Г.Матвеев, А.С.Медведко, Н.А.Мезенцев, Л.Г.Моргунов,
В.М.Петров, С.П.Петров, В.В.Репков, В.А.Роевко,
А.Н.Скринский, С.В.Суханов, Ю.И.Токарев, Э.М.Трахтенберг

ПРОЕКТ НАКОПИТЕЛЯ «СИБИРЬ-СМ»

ПРЕПРИНТ 88-96



НОВОСИБИРСК

Содержание

1. Введение	5
2. Структура накопителя	7
3. Параметры пучков и спектральные свойства СИ	12
4. Элементы магнитной системы	18
5. Криогенная и вакуумная системы	21
6. Инжекция	24
7. Высокочастотная система	28
8. Система контроля и управления	30
9. Литература	33

1. ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десяти лет во многих странах ведутся работы по созданию технологии рентгенолитографии и соответствующего технологического оборудования. Основная цель этих работ — обеспечить массовое, дешевое производство приборов с субмикронными структурами (0,7—0,1 мкм).

Начальный этап работ по рентгенолитографии был этапом большого оптимизма. Во многом недооценивались проблемы собственно рентгенолитографии (создание бездефектных субмикронных рентгеношаблонов, разработка бездефектных рентгенорезистов, создание установок с точностью совмещения до 0,02 мкм и т. д.), недооценивались проблемы материаловедения для субмикронной технологии. Много оптимистических предложений было сделано по развитию различного типа простых и дешевых источников мягкого рентгеновского излучения (рентгеновская трубка, лазерная плазма, Z-пинч).

Основным критерием сравнения качества источников рентгеновского излучения является яркость, определяющая время экспонирования

$$\tau \sim \frac{1}{B_{\lambda} \delta^5}$$

Здесь B_{λ} — яркость источника, δ — минимальный размер структуры. Среди всех развиваемых источников мягкого рентгеновского излучения в реальных технологических процессах могут использоваться Z-пинч, и синхротронное излучение.

Практически на всех работающих накопителях электронов — ис-

точниках мягкого рентгеновского синхротронного излучения проводились и проводятся работы по отработке технологии рентгенолитографии и необходимого технологического оборудования: BESSY — Зап. Берлин; UVSOR, TERAS — Япония; SPEAR, NSLS-1, ALLADIN — США; ВЭПП-2М, Сибирь-1 — СССР.

Массовое внедрение технологии рентгенолитографии в электронной промышленности (а также в МРП, МПСС, МОП) требует разработки промышленного специализированного источника синхротронного излучения. Компактные малогабаритные источники синхротронного излучения создаются сейчас во многих странах мира: Коси-Микротек — Зап. Германия, Оксфорд-инструмент — Англия, Скандитроникс — Швеция, Сор-Тек — Япония. Как правило, эти накопители создаются в кооперации с исследовательскими центрами этих стран (БЕССИ — Зап. Германия, МАХ — Швеция, Фотонная Фабрика — Япония, Дарсбери — Англия). Предполагается, что к 1990 году промышленность западных стран и Японии получит полный комплект технологического оборудования для массовой рентгенолитографии.

Анализ ограничений, накладываемых на предельное разрешение дифракцией излучения и пробегом фотоэлектронов в резисте, желание иметь одновременно хороший контраст рентгеношаблонов, малое поглощение излучения в разделительных окнах и гелиевой атмосфере, большое поглощение в рентгенорезисте определяют область $\lambda = 10 \div 20 \text{ \AA}$ как оптимальный диапазон рентгеновского излучения для рентгенолитографии.

Для получения времени экспонирования 2 с пучки синхротронного излучения должны обеспечить мощность около 250 мВт/см^2 на площади $4 \times 4 \text{ см}$ на расстоянии $L = 3 \div 6 \text{ м}$, при зазоре шаблон-резиста 50 мкм . При экспонировании на расстоянии $L = 3 \div 6 \text{ м}$ допустимый размер электронного пучка $\sigma_x, \sigma_z \leq 1 \text{ мм}$.

Используя традиционные конструкции поворотных магнитов из теплого железа не удается добиться достаточной компактности накопителя для данного спектрального диапазона СИ. Переход на сверхпроводящие магниты с полем $40\text{—}70 \text{ кГс}$ позволяет сократить периметр накопителя в 2—5 раз, потребляемую мощность уменьшить в 2—3 раза, рабочую энергию в 1,5—2 раза, а энергию инжекции в 3—4 раза. При этом добавится криогенная система охлаждения магнитов, которая на первом этапе эксплуатации таких установок, пока не созданы промышленностью компактные криостанции, может затруднить обслуживание по сравнению с традиционными теплыми электронными накопителями.

Рассматриваемый здесь накопитель на сверхпроводящих магнитах как источник СИ для рентгенолитографии рассчитан на максимальную энергию 600 МэВ с полем в поворотных магнитах 60 кГс и периметром 10 м . При этом критическая длина волны СИ равна $8,6 \text{ \AA}$. Инжекция электронов в накопитель осуществляется на энергии $50\text{—}60 \text{ МэВ}$, максимальный накопленный ток предполагается $0,3 \text{ А}$.

2. СТРУКТУРА НАКОПИТЕЛЯ

При создании накопителя электронов — специализированного источника СИ — его магнитная структура, с одной стороны, должна обеспечить решение чисто ускорительных задач (условия устойчивости бетатронного и фазового движения, условия компенсации нелинейностей, условия инжекции электронов и т. д.), а с другой стороны, магнитная структура должна быть оптимизована с целью получения высокой спектральной яркости излучения.

Эти требования приводят к необходимости проектировать накопитель с малым фазовым объемом электронного пучка, т. е. малым горизонтальным эмиттансом ϵ_x .

Магнитная система накопителя состоит из 4 суперпериодов, каждый из которых содержит 2 сверхпроводящих 45-градусных поворотных магнита и 3 квадрупольные линзы, расположенные зеркально-симметрично (рис. 1). По краям суперпериодов находятся промежутки, предназначенные для установки элементов системы инжекции, резонатора ВЧ-питания, линз секступольной и октупольной коррекции, системы наблюдения за пучком.

Поворотные магниты прямоугольные, с параллельными краями. На максимальной энергии 600 МэВ магнитное поле равно 60 кГс .

Поворотные магниты создают дополнительную краевую фокусировку пучка электронов по вертикали, поэтому в данной структуре все квадрупольные линзы являются фокусирующими по радиусу. При этом обеспечивается устойчивость бетатронного движения электронов по вертикали и горизонтали. На рис. 2 показаны бетатронные функции $\beta_x(s)$, $\beta_z(s)$ и дисперсионная функция $\eta_x(s)$ в функции азимута s на длине суперпериода.

Квадрупольные линзы объединены в 2 группы по принадлежности к источникам питания: 1 группа — линзы F_2 , 2 группа — линзы F_1, F_3 . Управление питающим током в этих группах позволяет

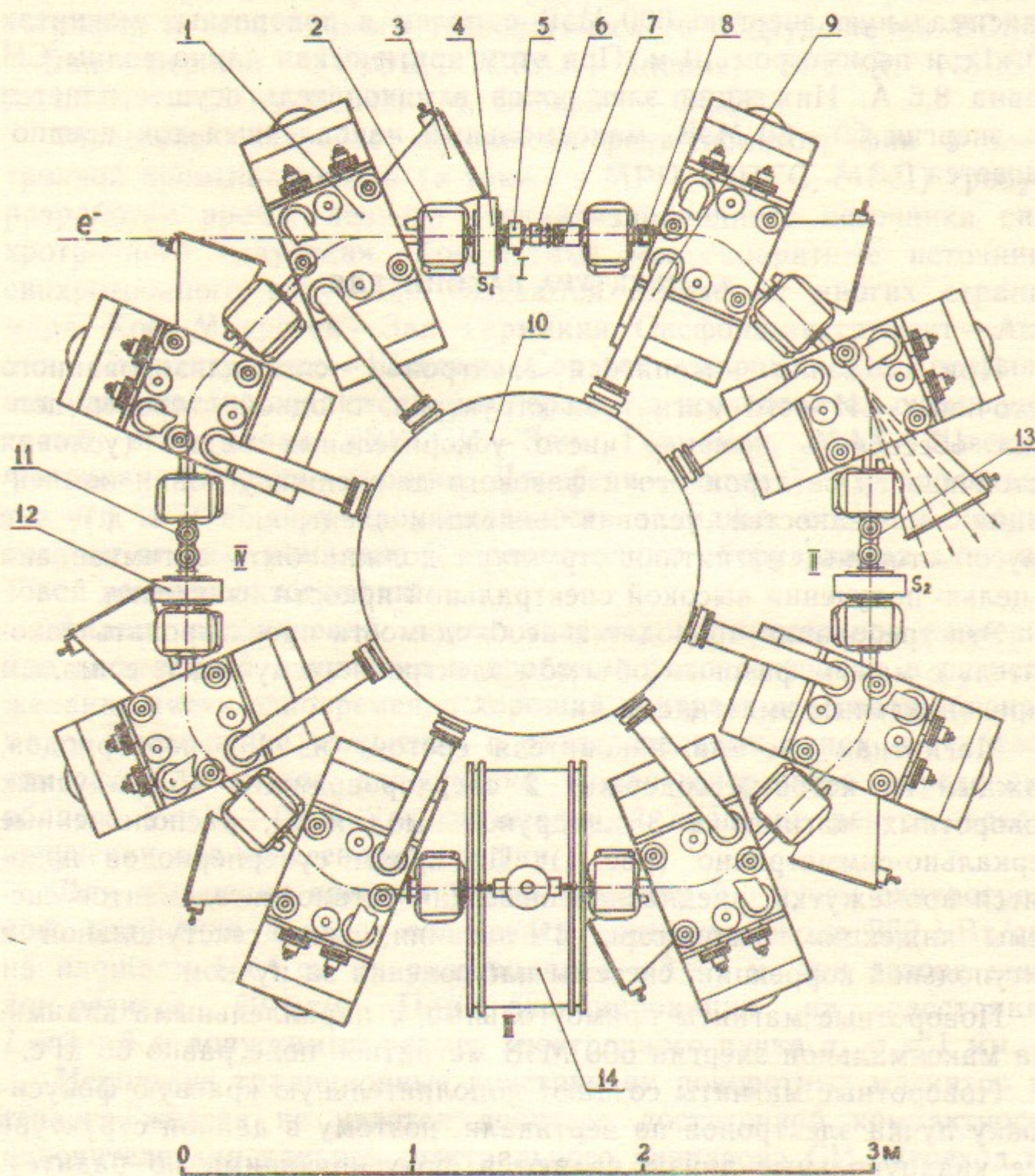


Рис. 1. Общий вид накопителя. Компонировка:

1—сверхпроводящий магнит; 2—квадрупольная линза; 3—камера вывода СИ; 4—секступольная линза; 5—датчик тока пучка; 6—измеритель частот бетатронных колебаний; 7—40-градусный впускной магнит; 8—4-градусный впускной магнит; 9—гелиевый трубопровод; 10—гелиевый питающий резервуар; 11—прединфлектор; 12—октупольная линза; 13—инфлектор; 14—ВЧ-резонатор.

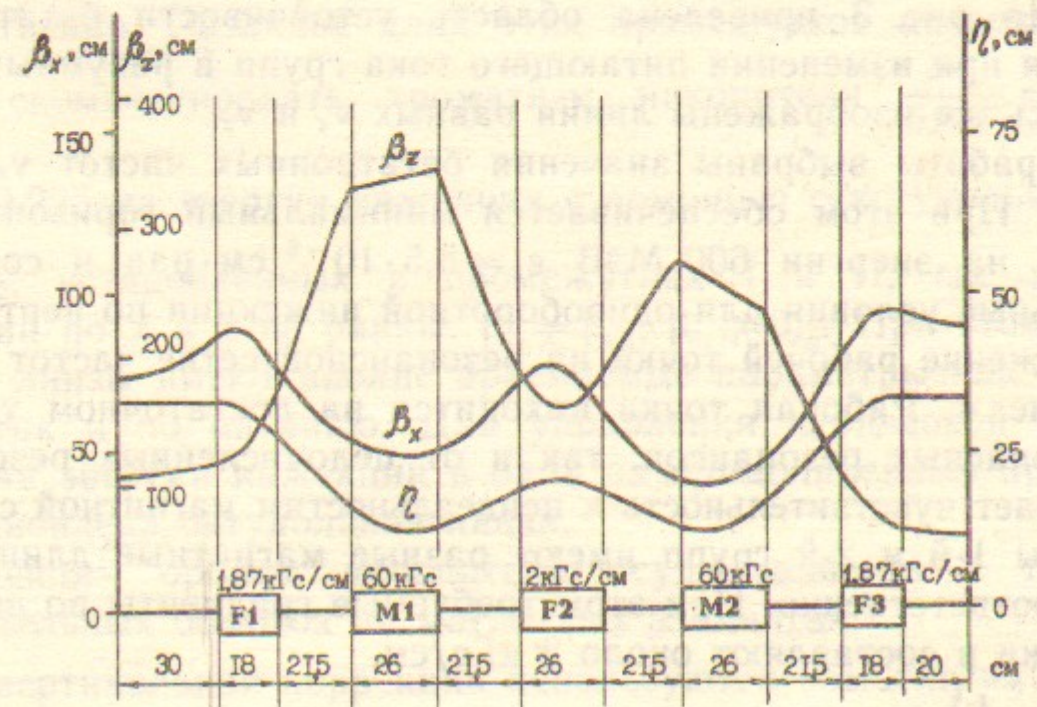


Рис. 2. Бетатронные функции β_x , β_z и дисперсионная функция η на длине одного суперпериода.

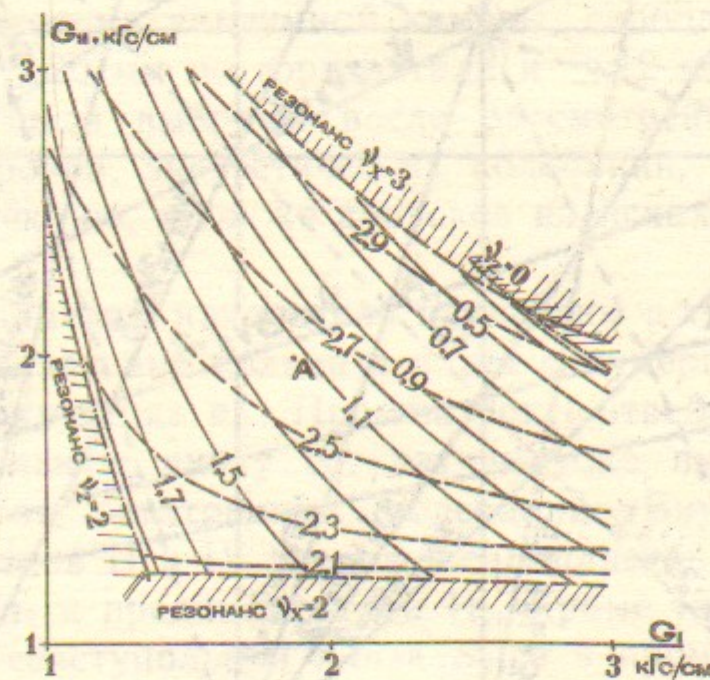


Рис. 3. Область устойчивости бетатронного движения при изменении градиентов 1-й и 2-й групп линз.

A—положение рабочей точки накопителя.

изменять бетатронные частоты ν_x и ν_z в достаточно широких пределах. На рис. 3 приведена область устойчивости бетатронного движения при изменении питающего тока групп в разумных пределах. Здесь же изображены линии равных ν_x и ν_z .

Для работы выбраны значения бетатронных частот $\nu_x=2,6$ и $\nu_z=1,12$. При этом обеспечивается минимальный горизонтальный эмиттанс на энергии 600 МэВ $\epsilon_x=8,5 \cdot 10^{-6}$ см·рад и создаются оптимальные условия для однооборотной инжекции по вертикали.

Положение рабочей точки на резонансной сетке частот показано на рис. 4. Рабочая точка находится на достаточном удалении как от опасных резонансов, так и от целочисленных резонансов, что снижает чувствительность к неидеальностям магнитной системы.

Линзы 1-й и 2-й групп имеют разные магнитные длины: 26 и 18 см, соответственно. При этом требуемые градиенты во всех линзах близки и составляют около 2 кГс/см.

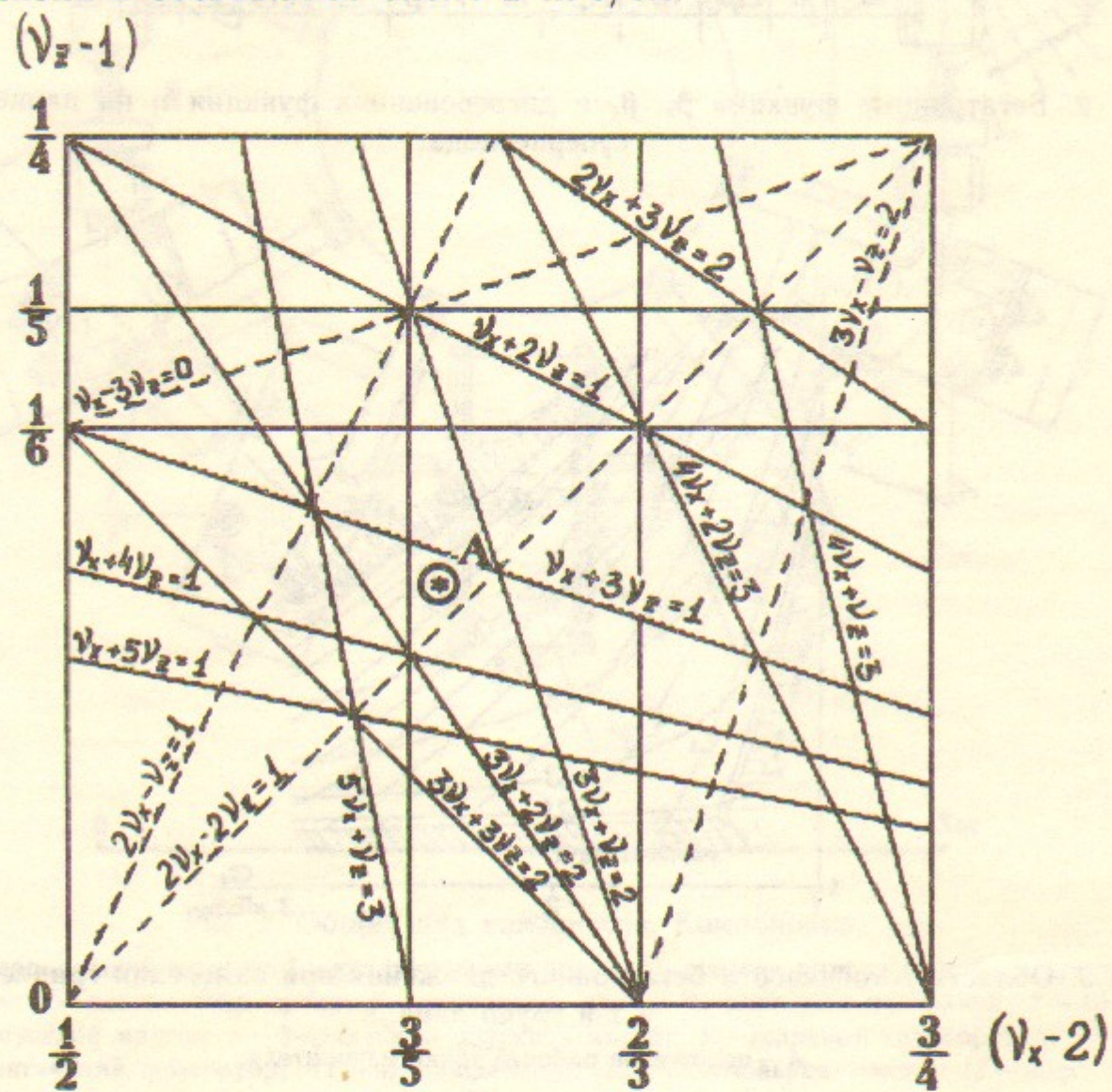


Рис. 4. Диаграмма резонансов частот бетатронных колебаний вблизи рабочей точки накопителя (точка А). Максимальный порядок суммовых резонансов $|k_x| + |k_z| = 6$, резонансов связи $|k_x| + |k_z| = 4$.

Промежутки I, III и II, IV (рис. 1) имеют длины 60 и 40 см, соответственно. Различие длин этих промежутков позволяет полностью скомпенсировать хроматизм накопителя $\frac{\partial \nu_x}{\partial P/P} = -1,54$,

$\frac{\partial \nu_z}{\partial P/P} = 0,225$ на энергии инжекции с помощью секступольных линз S_1 и S_2 , установленных в промежутках I и II, где значения β -функций по x и z не равны: $\beta_{xI} \neq \beta_{xII}$, $\beta_{zI} \neq \beta_{zII}$. При этом секступольные линзы имеют вполне приемлемые параметры как по габаритам, так и по питанию. Для управления кубической нелинейностью на энергии инжекции в один из прямолинейных промежутков установлена октупольная линза.

Коррекция орбиты накопителя осуществляется с помощью дополнительных обмоток на магнитных элементах:

- для вертикальной коррекции используются обмотки на полюсах квадрупольных линз;
- для коррекции по горизонтали — дополнительные обмотки в поворотных магнитах.

Таким образом, имеются 8 корректирующих обмоток по x и 12 по z , достаточно равномерно распределенные по кольцу накопителя.

Требуемая апертура вакуумной камеры, свободная для пучка, принята равной ± 20 мм по горизонтали и ± 12 мм по вертикали. Эти параметры были выбраны после рассмотрения бетатронных колебаний электронов, энергетических колебаний, требований под апертуру на инжекцию, а также допусков на искажение замкнутой орбиты.

Основные параметры накопителя приведены в табл. 1.

На рис. 1 показан вид кольца в плане с нумерацией элементов накопителя по ходу пучка e^- . Промежуток I отведен под впускной магнит, секступольную линзу S_1 , датчик тока пучка и катушку измерителя частот бетатронных колебаний. Внутри вакуумной камеры промежутков II и IV расположены пластины, соответственно, инфлектора I_2 и прединфлектора I_1 . Кроме того, в промежутке II находится секступольная линза S_2 , а в промежутке IV — октупольная линза. Промежуток III занят ВЧ-резонатором, который работает на первой гармонике частоты обращения электронов $f_0 = 30$ МГц. В центре накопителя расположен питающий резервуар с жидким гелием. Подача гелия в сверхпроводящие магниты осуществляется по трубам, в которых также сделана разводка электропитания сверхпроводящих обмоток.

Таблица 1

Энергия, E , МэВ	600
Периметр, P , м	10
Количество суперпериодов, N	4
Количество диполей, N_d	8
Ведущее магнитное поле, B , кГс	60
Радиус поворота, ρ , см	33
Количество квадруполей, N_q	12
Количество секступолей, N_s	2
Бетатронные числа, ν_x, ν_z	2,6; 1,12
Коэффициент пространственного уплотнения орбит, α	0,0822
Хроматизм, $\frac{\partial \nu_x}{\partial P/P}; \frac{\partial \nu_z}{\partial P/P}$	-1,54; 0,225
Горизонтальный эмиттанс, ϵ_x , см·рад	$8,5 \cdot 10^{-6}$
Времена затухания, τ_z, τ_x, τ_s , мс	1,25; 1,25; 0,625
Среднеквадратичный разброс энергии в пучке, σ_E/E	$8,7 \cdot 10^{-4}$
Энергетические потери на обороте, ΔW , кэВ	31,6
Частота обращения, f_0 , МГц	30
Кратность ВЧ, q	1
Амплитуда напряжения ВЧ, $U_{ВЧ}$, кВ	100
Ток пучка, I , мА	300
Энергетическая апертура, $\Delta E/E$	0,026
Время жизни при токе пучка 300 мА, τ , час	4,4
Длина сгустка, σ_s , см	8
Критическая длина волны СИ λ_c , Å	8,6
Энергия инжекции $E_{инж}$, МэВ	60

Синхротронное излучение выводится из семи поворотных магнитов через каналы вывода СИ.

3. ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СИ

3.1. Время жизни

Согласно проведенным расчетам (см. табл. 2) для рабочих токов в накопителе, основным процессом (при среднем давлении остаточного газа не хуже $2 \cdot 10^{-9}$ Торр), определяющим время

жизни пучка электронов, является эффект внутрисгусткового рассеяния электронов друг на друге, так называемый эффект Тушека, который тем сильнее, чем больше плотность частиц в сгустке. На рис. 5 приведены зависимости времени жизни от тока пучка при различных значениях амплитуды ускоряющего напряжения для энергий 60 и 600 МэВ.

Таблица 2

Эффект Тушека на накопителе

E , МэВ	I , мА	$\left(\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x}\right)^{1/2}$	$U_{ВЧ}$, кВ	$(\Delta E/E)_{ВЧ}$	$\epsilon_x \cdot 10^6$, см·рад	$\tau_{Туш.}$, с (час)	σ_E кв. фл., кэВ	$\sigma_{E\Sigma}$, кэВ	σ_s , см
60	5	0,1	1,0	1,13%	20	4723 (1,3)	5,28	60,6	28,3
	20	0,1	1,0	1,13%	32,3	2494 (0,69)	5,28	76,8	35,9
	100	0,1	1,0	1,13%	56,2	1227 (0,34)	5,28	101,3	47,3
	300	0,1	1,0	1,13%	82	765 (0,21)	5,28	122,3	57,12
	300	0,3	1,0	1,13%	58,2	1298 (0,36)	5,28	103	48,1
	300	0,1	4,85	4,85	2,5%	108	4689 (1,3)	5,28	140
250	300	0,1	21,8	2,5%	6,3	1255 (0,35)	91,6	154	7,55
400	300	0,1	51,6	2,5%	5,0	3542 (0,98)	296	300	7,2
600	20	0,1	100	2,64%	8,6	242064 (67,3)	528	528	8,0
	100	0,1	100	2,64%	8,6	48444 (13,5)	528	528	8,0
	300	0,1	100	2,64%	8,6	16175 (4,5)	528	528	8,0
	300	0,3	100	2,64%	8,6	48448 (13,5)	528	528	8,0
	300	0,5	100	2,64%	8,6	80720 (22,4)	528	528	8,0
	300	1,0	100	2,64%	8,6	161398 (44,8)	528	528	8,0

Зависимость времени жизни от энергии для тока пучка $I=300$ мА показана на рис. 6. Для обеспечения времени жизни 4 часа при токе 300 мА на рабочей энергии, при связи между вертикальными и горизонтальными бетатронными колебаниями $(\epsilon_z/\epsilon_x)^{1/2} \approx 0,1$ требуется напряжение на ВЧ-резонаторе не менее 95 кВ.

Одной из реальных возможностей увеличения времени жизни является повышение связи $(\epsilon_z/\epsilon_x)^{1/2}$ (см. табл. 2). Для этого достаточно приблизить рабочую точку накопителя к резонансу связи $2\nu_x - 2\nu_z = 3$. При работе на резонансе связи, где $(\epsilon_z/\epsilon_x)^{1/2} \sim 1$, расчетное время жизни по Тушеку 44 часа.

3.2. Эмиттанс и размеры пучка

На рис. 7, 8 приведены зависимости горизонтального эмиттанса от тока пучка для энергий 60 и 600 МэВ и от энергии, для тока $I=300$ мА, которые получены с учетом совместного действия эффекта Тушека и квантовых флуктуаций излучения. На энергии инжекции размеры пучка определяются как квантовыми флуктуациями излучения, так и «многократным Тушеком». На высокой энергии размеры пучка в основном определяются квантовыми флуктуациями СИ и практически не зависят от тока пучка.

При напряжении на ВЧ-резонаторе $U_{ВЧ}=100$ кВ на энергии 600 МэВ, величина ВЧ-сепаратрисы составляет $(\Delta E/E)_{ВЧ} = \pm 2,64 \cdot 10^{-2}$, а необходимая горизонтальная апертура на азимуте с максимальной дисперсионной функцией ($\eta_{\max}=32$ см) равна $\pm 0,85$ см. С учетом допуска на возможное искажение орбиты принято $a_x = \pm 2$ см.

3.3. Характеристики пучков СИ

Выведенное из поворотных магнитов излучение имеет критическую длину волны $\lambda_c = 8,6 \text{ \AA}$ и угол расходимости излучения по вертикали $\Delta\psi = 1/\gamma = 8,33 \cdot 10^{-4}$ рад.

Мощность пучка СИ, просуммированная по вертикальному углу, в угловом интервале 1 миллирадиан горизонтального угла находится согласно выражению

$$P \left(\frac{\text{Вт}}{\text{мрад}} \right) = 14 \frac{E^4 (\text{ГэВ}) \cdot I (\text{А})}{\rho (\text{м})}$$

При $E=600$ МэВ, $I=0,3$ А, $\rho=0,33$ м имеем $P=1,65$ Вт/мрад.

Спектральный поток фотонов в относительном интервале длин волн $\Delta\lambda/\lambda$, в 1 миллирадиан горизонтального угла определяется как

$$\dot{N}(\lambda) \left(\frac{\text{фот}}{\text{с} \cdot \text{мрад}} \right) = 2,46 \cdot 10^{16} I (\text{А}) E (\text{ГэВ}) \eta \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right) \frac{\Delta\lambda}{\lambda},$$

где $\eta(\lambda/\lambda_c)$ — универсальная спектральная функция [1]. Зависимость $\dot{N}(\lambda)$ для $I=300$ мА, $E=600$ МэВ, $\Delta\lambda/\lambda=10^{-3}$ приведена на рис. 9.

Полная излучаемая мощность при токе 300 мА составляет 10,3 кВт. Около 50% этой мощности может быть выведена через

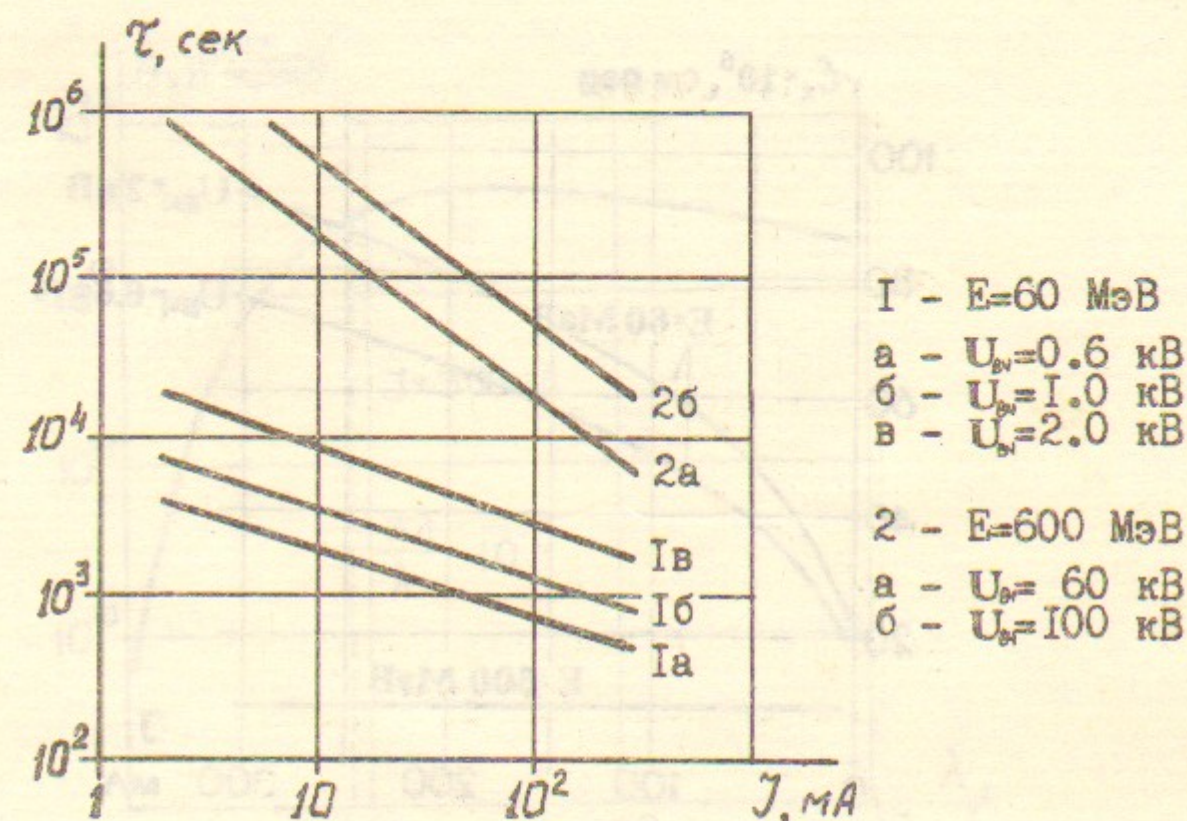


Рис. 5. Расчетное время жизни как функция тока пучка.

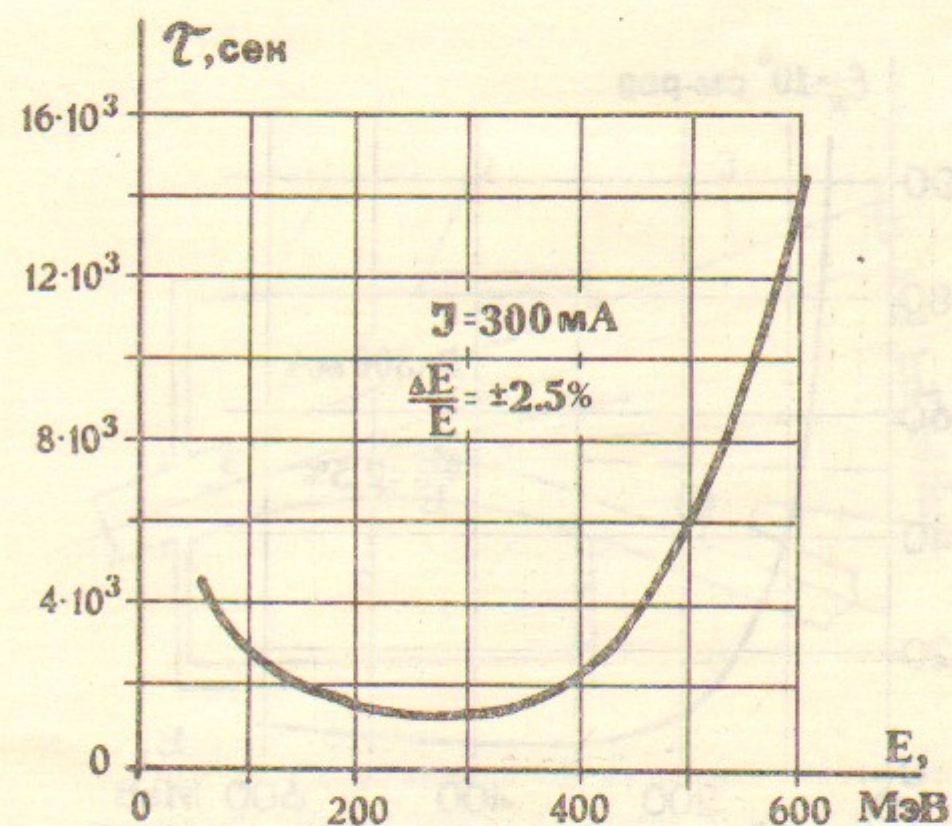


Рис. 6. Расчетное время жизни как функция энергии.

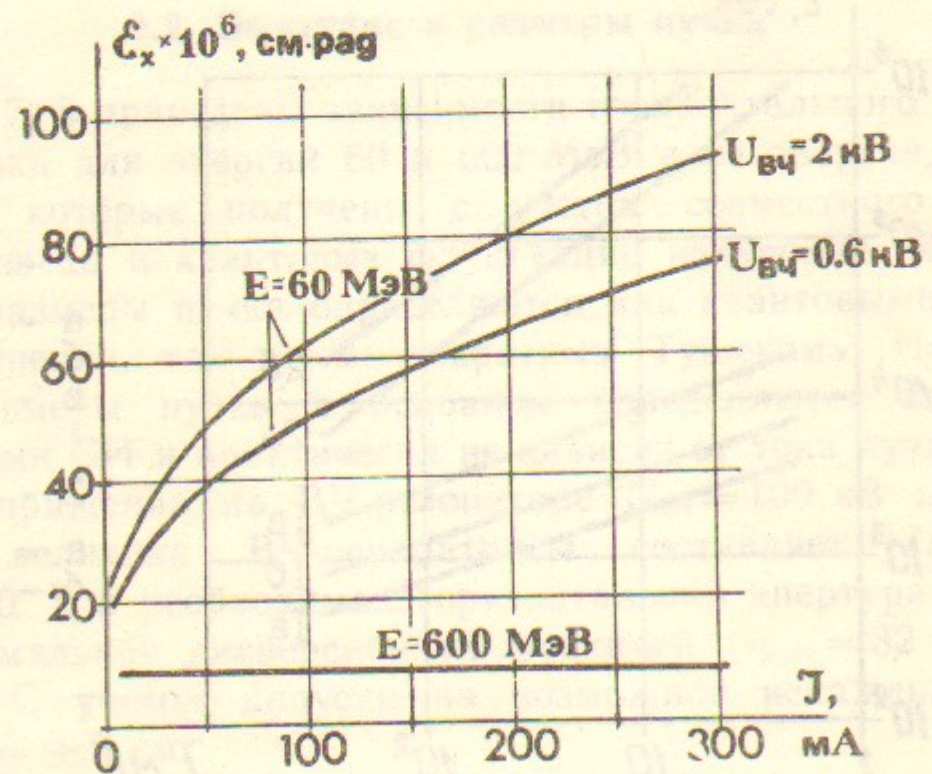


Рис. 7. Зависимость горизонтального эмиттанса от тока пучка.

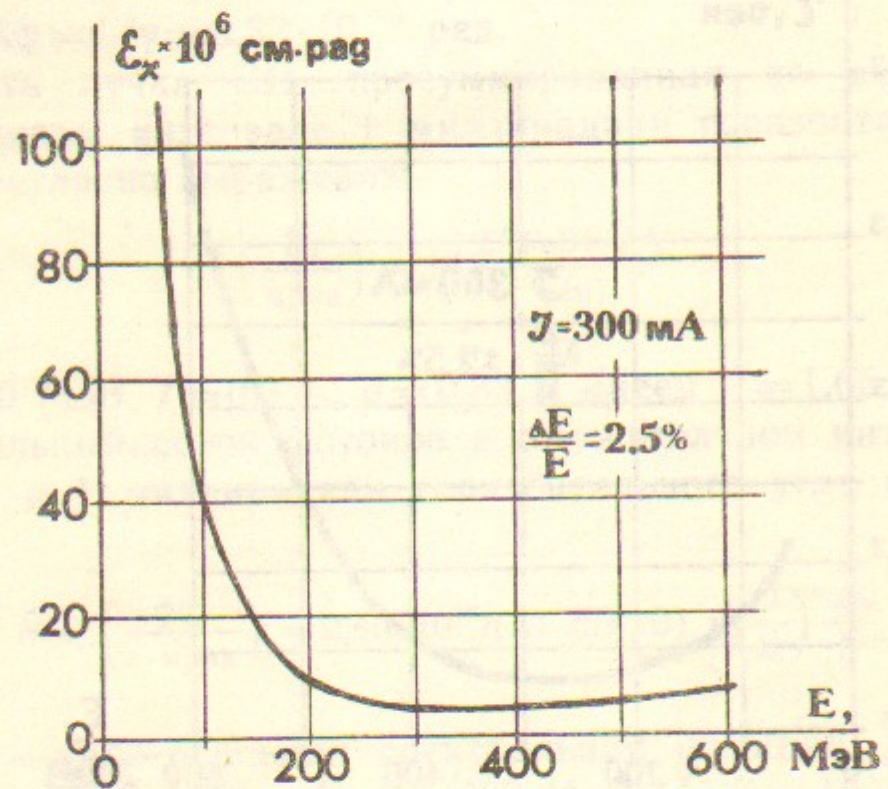


Рис. 8. Зависимость горизонтального эмиттанса от энергии.

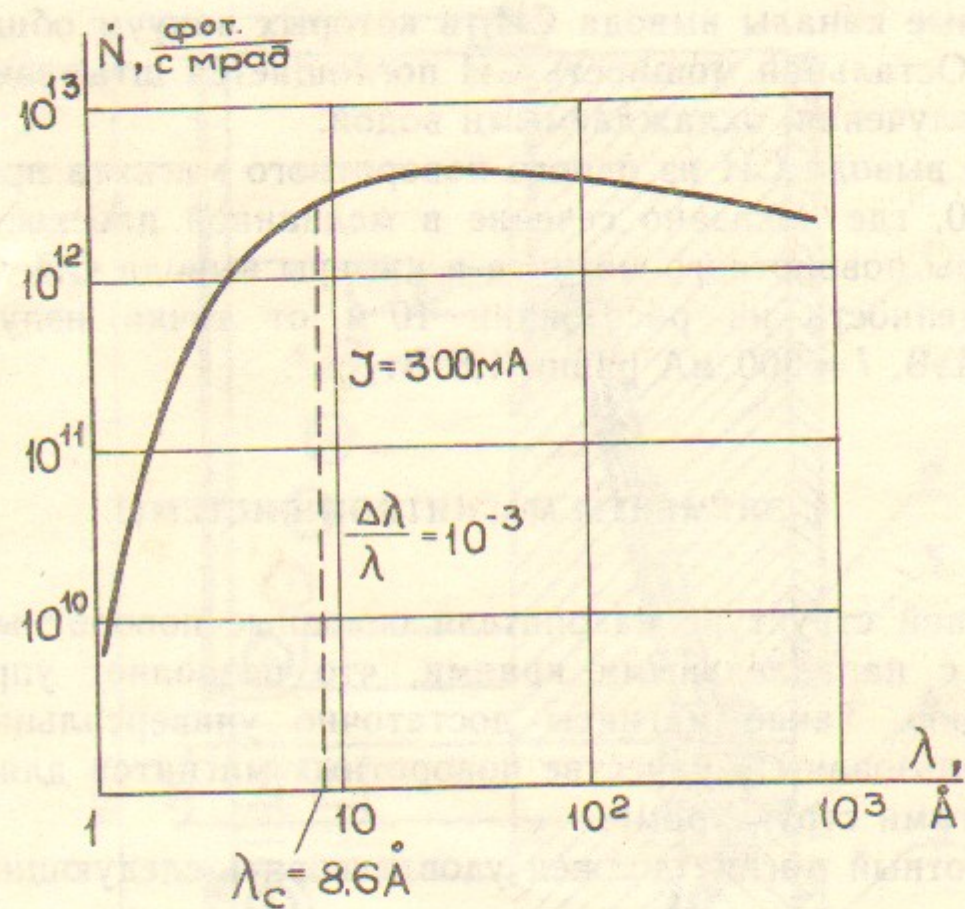


Рис. 9. Спектральный поток фотонов СИ из накопителя.

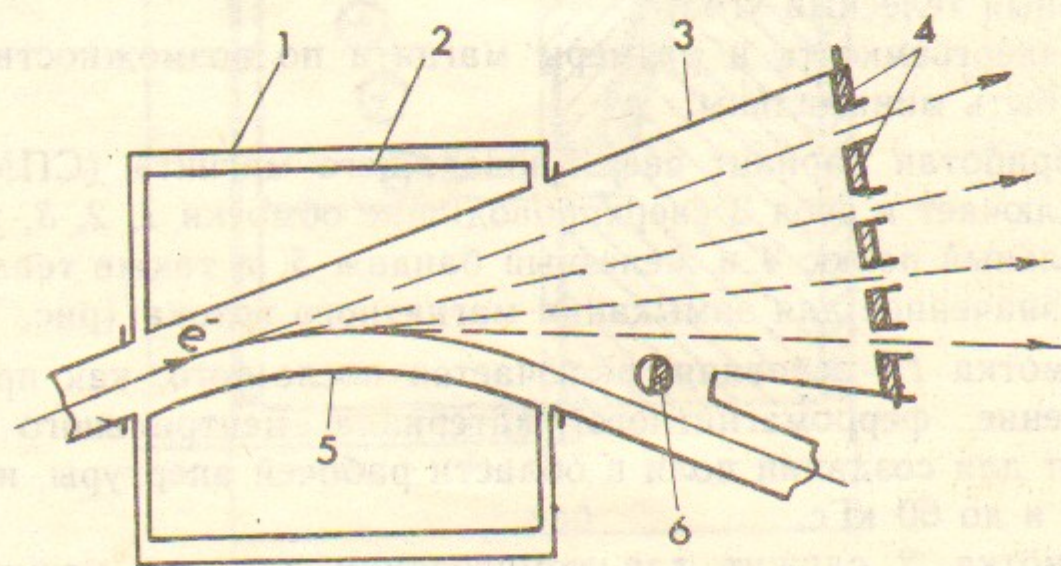


Рис. 10. Схема вывода СИ из поворотных магнитов:
1—корпус криостата; 2—азотный экран; 3—камера вывода СИ; 4—приемник излучения;
5—вакуумная камера в поворотном магните; 6—штыревой приемник излучения.

специальные каналы вывода СИ, в которых вакуум общий с накопителем. Остальная мощность СИ поглощается штыревыми приемниками излучения, охлаждаемыми водой.

Схема вывода СИ из одного поворотного магнита представлена на рис. 10, где показано сечение в медианной плоскости вакуумной камеры поворотного магнита и камеры вывода СИ.

Освещенность на расстоянии 10 м от точки излучения при $E=600$ МэВ, $I=300$ мА равна $1,6$ Вт/см².

4. ЭЛЕМЕНТЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

В данной структуре накопителя основные поворотные магниты выбраны с параллельными краями, что позволяет упростить их конструкцию. Такие магниты достаточно универсальны и могут быть использованы в качестве поворотных магнитов для накопителей с другими структурами.

Поворотный магнит должен удовлетворять следующим требованиям:

- иметь большую рабочую апертуру;
- малый уровень нелинейности магнитного поля;
- выпуск СИ должен осуществляться в максимально возможный телесный угол;
- энергоемкость и размеры магнита по возможности должны быть минимальны.

Разработан вариант сверхпроводящего магнита (СПМ), который включает в себя 3 сверхпроводящие обмотки 1, 2, 3, холодный центральный полюс 4 и железный бандаж 5, а также теплое ярмо, предназначенное для замыкания магнитного потока (рис. 11).

Обмотка 1 — основная, включается после того, как произойдет насыщение ферромагнитного материала центрального полюса. Служит для создания поля в области рабочей апертуры, начиная с 20 кГс и до 60 кГс.

Обмотка 2 служит для компенсации влияния межполюсного зазора на однородность поля в магните и создания магнитного поля от 0 до 20 кГс.

Обмотка 3 служит для компенсации влияния боковых зазоров между холодным и теплым участками замыкающего магнитопровода.

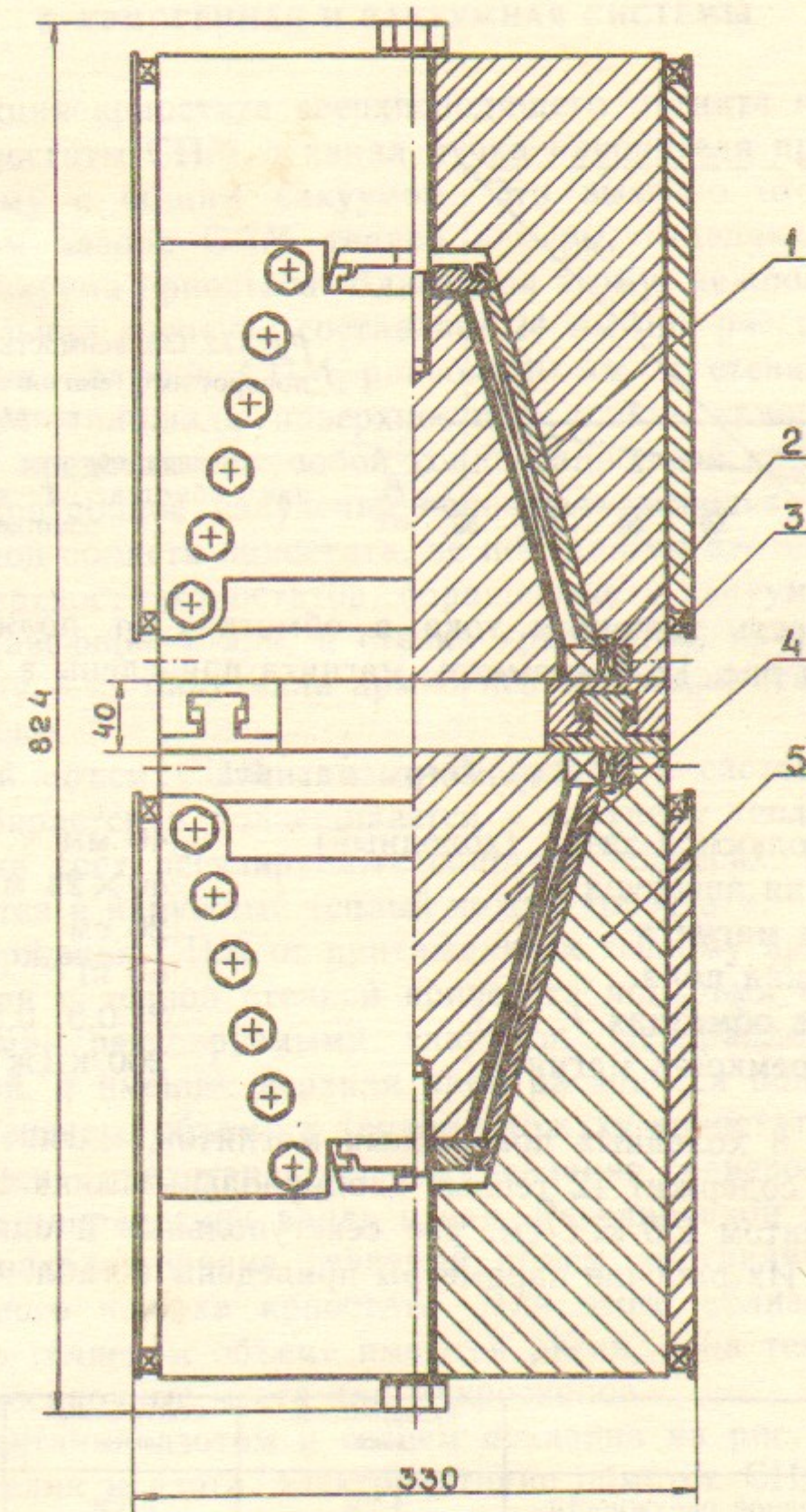


Рис. 11. Общий вид сверхпроводящего магнита (без ярма, замыкающего обратный магнитный поток):

1 — основная обмотка; 2 — дополнительная обмотка; 3 — компенсирующая обмотка; 4, 5 — железо.

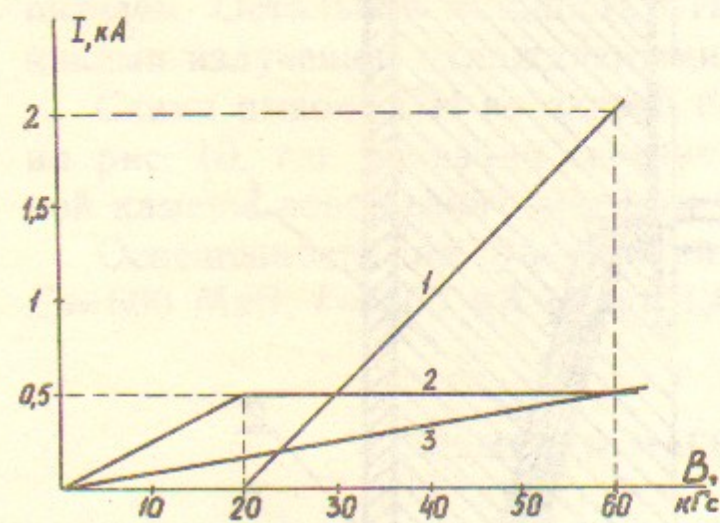


Рис. 12. Зависимость токов обмоток поворотного магнита от величины поля:
1 — основная обмотка; 2 — дополнительная обмотка; 3 — компенсирующая обмотка.

Зависимость величины тока в обмотках от поля в магните показана на рис. 12. Параметры магнита приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры магнита

Межполюсной зазор (холодный)	40 мм
Рабочая апертура	40 × 24 мм
Длина магнита	26 см
Величина поля	60 кГс
Токи в обмотках 1, 2, 3	2; 0,5; 0,5 кА
Энергоемкость магнита	200 кДж

Помимо 8 холодных поворотных магнитов, магнитная система накопителя содержит 12 теплых квадрупольных линз с максимальным градиентом 2,5 кГс/см, две секступольные и одну октупольную линзы. Их рабочие параметры приведены в табл. 4.

Таблица 4

	Квадрупольные линзы	Секступольная линза	Октупольная линза
Диаметр вписанной окружности	4 см	5 см	5 см
Длина линз	18 см; 26 см	10 см	10 см
Максимальный градиент	2,5 кГс/см	0,5 кГс/см ²	0,51 кГс/см ³
Ток питания	500 А	20 А	20 А
Потребляемая мощность	640 Вт; 790 Вт	80 Вт	70 Вт

Конструкция криостата сверхпроводящего магнита показана на рис. 13. Криостаты СПМ и канал пучка накопителя представляют собой систему с общим вакуумом. Это вызвано отсутствием в межполюсном зазоре СПМ теплой камеры, отделяющей вакуум канала от вакуума криостата. Благодаря этому, межполюсная чистая вертикальная апертура составляет 24 мм при расстоянии между обмотками полюсов СПМ равном 40 мм, а стенки гелиевого объема СПМ (площадь поверхности в одном криостате равна $1,5 \cdot 10^4$ см²) представляют собой конденсационный криовакуумный насос. Синхротронное излучение полностью выводится из низкотемпературной области криостата, не попадая на азотные экраны.

Все поверхности криостатов, обращенные в вакуум, изготовлены из нержавеющей стали, а стенки криостатов, примыкающие к теплому ядру, — из биметалла армко/нержавеющая сталь. Азотные экраны медные.

Гелиевый объем СПМ с азотной ванной и системой азотных экранов собирается и подвешивается к верхнему теплому фланцу криостата на трех регулируемых снаружи подвесах. После этого все опускается в наружный теплый кожух криостата.

Для удержания СПМ от притяжения к теплому ядру гелиевый объем связан с теплой стенкой криостата четырьмя горизонтальными тягами, регулируемые снаружи. Непараллельность тяг между собой, а именно: верхняя пара расходится под небольшим углом от гелиевого объема к теплому кожуху криостата, а нижняя пара сходится — предотвращает раскачивание гелиевого объема в криостате в направлении вдоль пучка. Регулировкой тяг и подвесов после захолаживания гелиевый объем выставляется относительно теплового кожуха криостата. Для этого вблизи крепления подвесов на гелиевом объеме имеются риски, а на теплом кожухе криостата посадочные места для микроскопов.

Схема питания азотом и гелием показана на рис. 14. Залив и газосброс гелия и азота, электропитание обмоток СПМ осуществляются через верхние фланцы криостатов. Залив и газотопод гелия во всех криостатах происходит самотеком из питающего гелиевого резервуара, расположенного в центре накопителя. Соответствующие обмотки СПМ запитываются последовательно, причем все токоподводящие сверхпроводящие шины уложены в трубах, подающих жидкий гелий из питающего резервуара. Электрическая схема питания магнитов изображена на рис. 15.

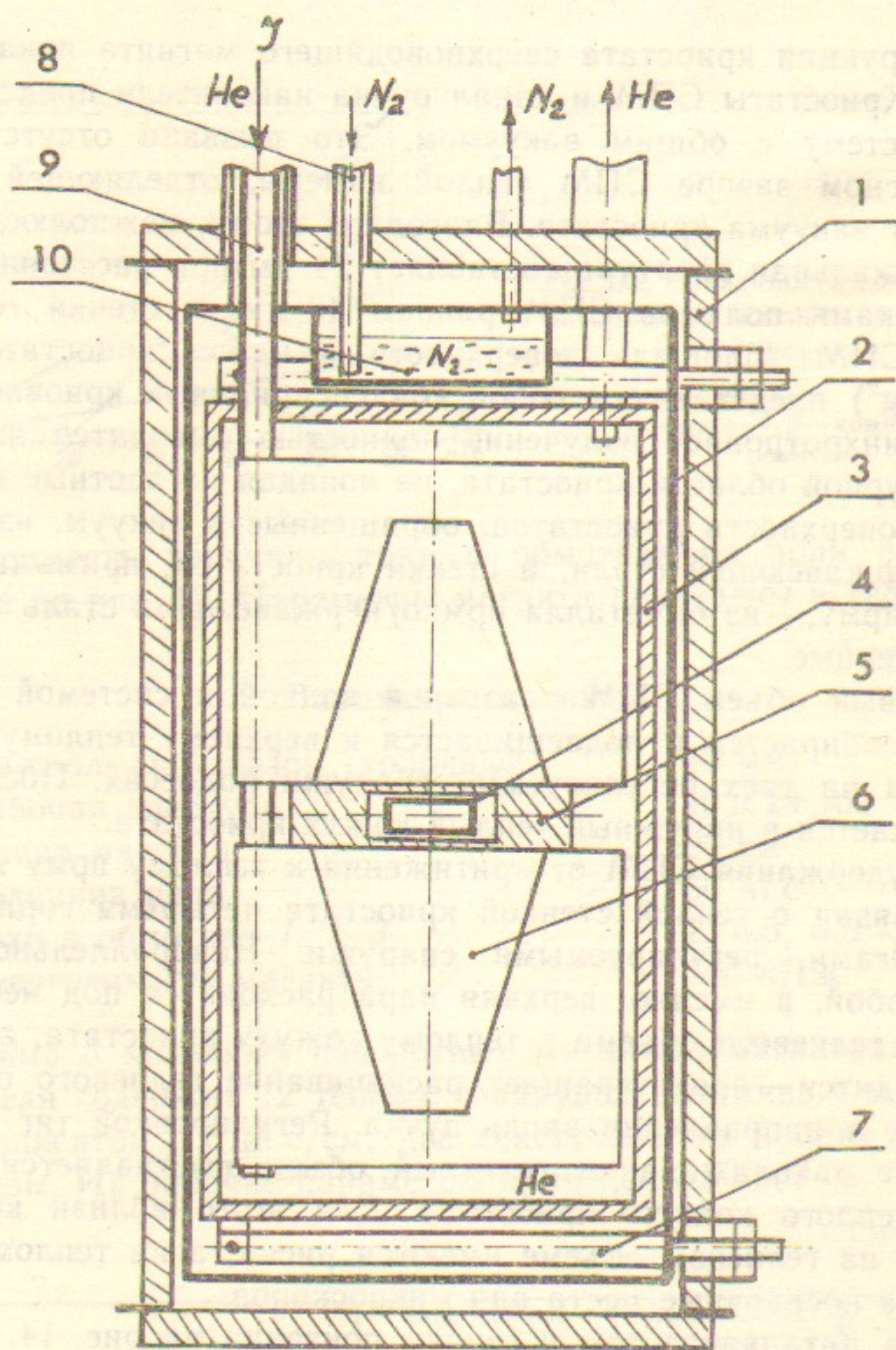


Рис. 13. Конструкция криостата поворотного магнита:

1 — корпус криостата; 2 — азотный экран; 3 — гелиевый объем; 4 — азотная камера; 5 — гелиевая камера; 6 — сверхпроводящий магнит; 7 — горизонтальная тяга; 8 — азотный заливной узел; 9 — гелиевый трубопровод с токоподводящими шинами; 10 — азотная ванна.

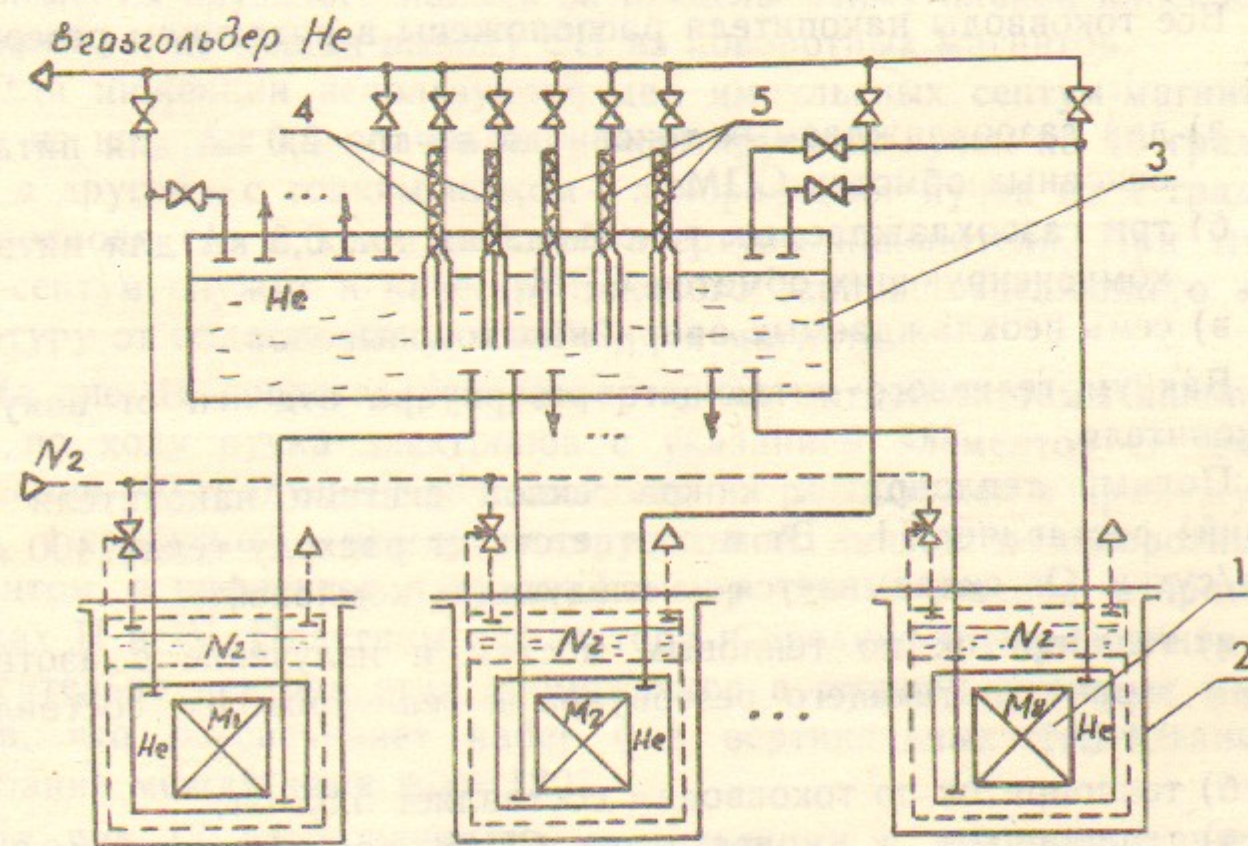


Рис. 14. Схема питания азотом и гелием:

1 — холодная часть поворотного магнита со сверхпроводящими обмотками; 2 — криостат поворотного магнита; 3 — гелиевый питающий резервуар с тоководами; 4 — газоохлаждаемые 2 кА тоководы; 5 — газоохлаждаемые 0,5 кА тоководы.

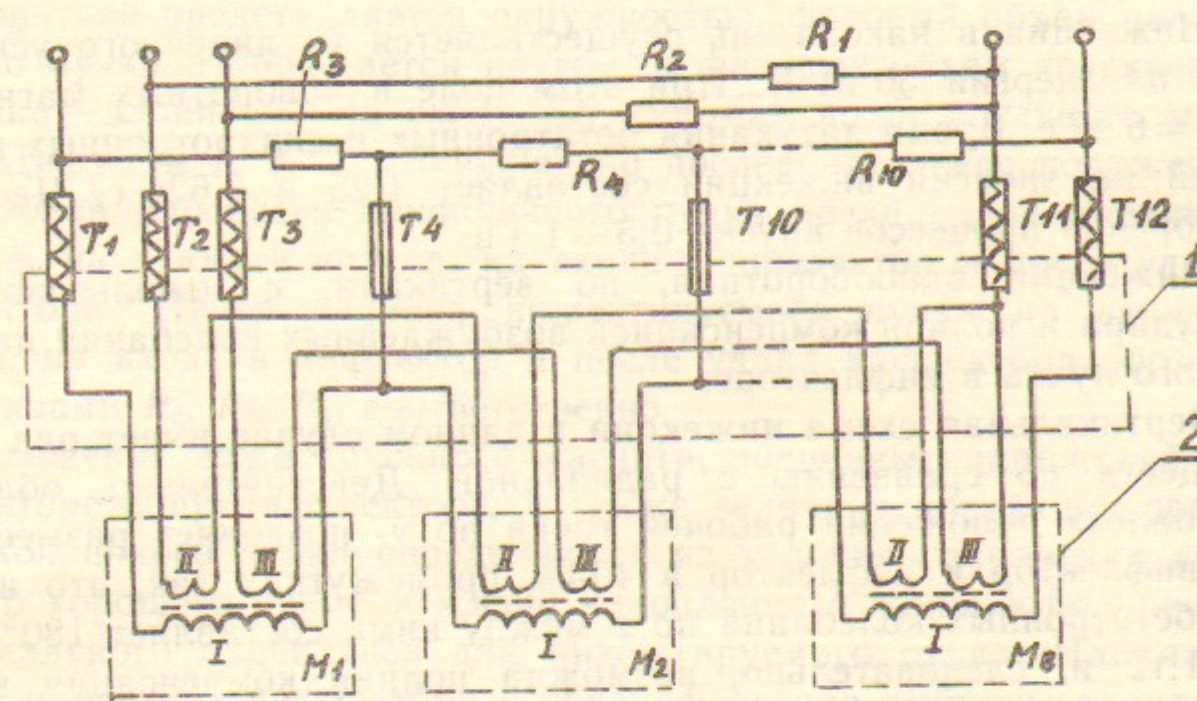


Рис. 15. Электрическая схема питания поворотных магнитов:

1 — гелиевый питающий резервуар; 2 — криостат поворотного магнита; T1, T12 — охлаждаемые 2 кА тоководы; T2, T3, T11 — охлаждаемые 0,5 кА тоководы; T4 — T10 — неохлаждаемые аварийные тоководы; R1 — R10 — внешние разрядные сопротивления защиты.

Все токовводы накопителя расположены в питающем резервуаре:

- а) два газоохлаждаемых токоввода на ток 2,0 кА для питания основных обмоток СПМ;
- б) три газоохлаждаемых токоввода на ток 0,5 кА для питания компенсирующих обмоток СПМ;
- в) семь неохлаждаемых аварийных токовыводов.

Вакуум гелиевого питающего резервуара отделен от вакуума накопителя.

Полный теплоприток к криогенной системе накопителя (на гелий) составляет 11,4 Вт и соответствует расходу гелия 400 литров/сутки. Он складывается из следующих компонент:

- а) теплоприток по тепловым мостам и излучение с азотного экрана, питающего резервуара и гелиепроводов составляет 0,4 Вт;
- б) теплоприток по токовводам составляет 5,55 Вт;
- в) теплоприток к криостатам СПМ составляет $8 \times 0,72 = 5,76$ Вт.

6. ИНЖЕКЦИЯ

Инжекция в накопитель осуществляется из линейного ускорителя на энергии 60 МэВ. При этом поле в поворотных магнитах $V_{инж} = 6$ кГс. Время затухания бетатронных и синхротронных колебаний на энергии инжекции составляет 1,25 и 0,625 с. Частота повторения процессов впуска 0,5—1 Гц.

Инжекция однооборотная, по вертикали, с использованием предудара и полной компенсации возбужденных колебаний накопленного пучка в инфлекторе.

Вертикальная схема инжекции в данном случае имеет ряд преимуществ по сравнению с радиальной. Действительно, область возможных положений рабочей точки по ν_z позволяет разместить прединфлектор и инфлектор в 40-см промежутках так, что набег фаз бетатронных колебаний по z между ними составляет 180° при $\nu_z = 1,12$ и, следовательно, возможна полная компенсация когерентных колебаний накопленного пучка. Значение ν_z достаточно далеко от целочисленного резонанса, а также позволяет оптимизировать горизонтальный эмиттанс накопителя, который минимален при $\nu_x = 2,6$. Кроме того, вертикальная инжекция позволяет вынес-

ти элементы впускного канала за пределы азимутальной плоскости накопителя, не мешая выводу СИ из поворотных магнитов.

Для инжекции используются два импульсных септум-магнита, один из которых поворачивает инжектируемый пучок на 40 градусов, а другой — с тонким ножом — доворачивает пучок на 4 градуса, подводя его к краю рабочей апертуры накопителя. При этом нож-септум служит в качестве токового экрана, отделяющего эту апертуру от области импульсного поля магнита.

На рис. 16 представлена развертка магнитной системы накопителя по ходу пучка электронов с указанием элементов системы инжекции. 40-градусный впускной магнит расположен в промежутке I, 4-градусный — между квадрупольной линзой и поворотным магнитом, а инфлектор и прединфлектор, соответственно, в промежутках II и IV. Пластины инфлектора и прединфлектора сдвинуты относительно центров этих промежутков в сторону впускных магнитов, что обеспечивает набег фаз вертикальных бетатронных колебаний между ними $\psi_{13} = 180^\circ$.

На рис. 17 изображена схема инжекции в нормализованном фазовом пространстве вертикального бетатронного движения с координатами $z\sqrt{\beta_{z0}\beta_z}$; $(\alpha_z z + \beta_z z')\sqrt{\beta_{z0}/\beta_z}$, где $\alpha_z \equiv -\beta'_z/2$. Положение неискаженной и искаженной равновесной орбиты накопленного пучка показано точками Ω и O . Фазовая траектория в накопителе представляется окружностью, фазовый объем накопленного пучка изображается кругом, а фазовый объем впускаемого пучка — эллипсом. На схеме SS — кромка ножа впускного магнита. Цифрами 1, 2, 3, 4 обозначено последовательное положение на фазовой плоскости накопленного пучка после удара прединфлектора, на азимуте впуска, на входе в инфлектор и после удара инфлектора. Центр эллипса инжектируемого пучка на азимуте впуска, на входе в инфлектор и после удара инфлектора обозначен буквами P_2 , P_3 , P_4 , соответственно.

Положение ножа впускного магнита, величины напряжений на инфлекторе и прединфлекторе, а также величина коррекции орбиты накопленного пучка определяются из условия сохранения достаточно хорошего времени жизни накопленного пучка и получения максимального акцептанса для инжектируемого пучка. Напряжения на пластинах инфлектора и прединфлектора выбраны одинаковыми, т. е. «удар» равен «предудару» и ранее накопленный пучок движется без остаточных колебаний. Это облегчает условия для накопления максимально возможного тока и позволяет использо-

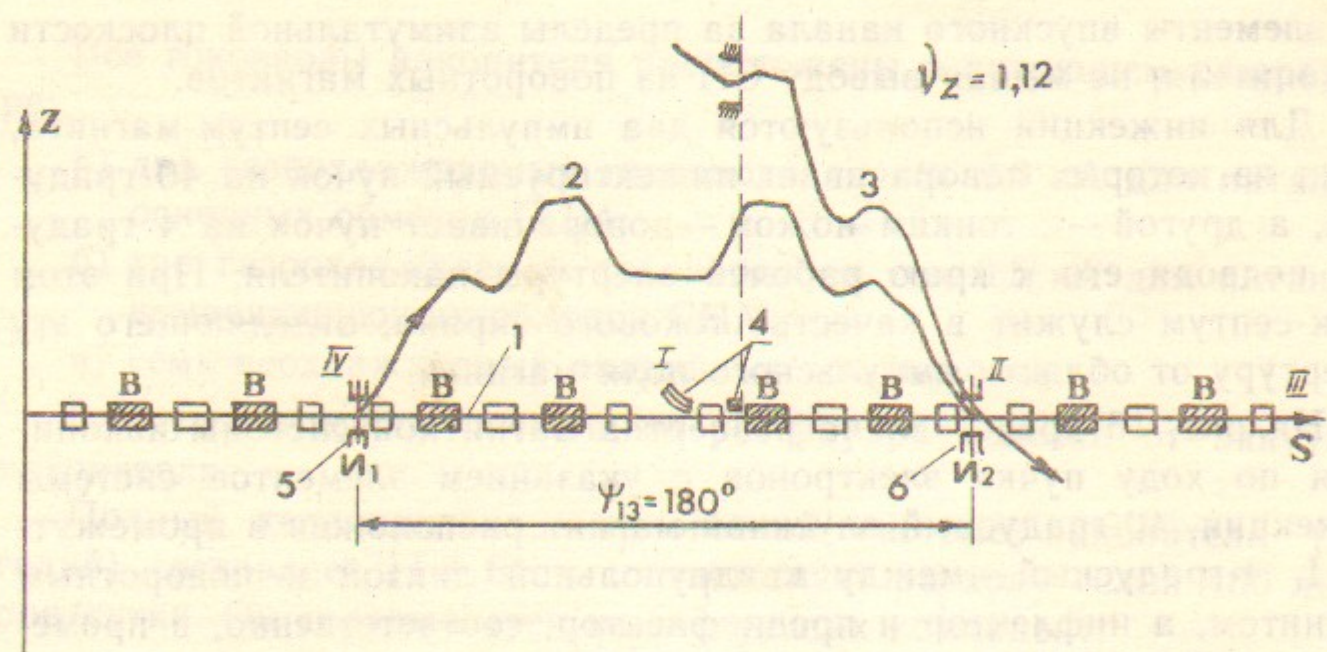


Рис. 16. Схема инжекции:

1 — орбита накопленного пучка; 2 — траектория накопленного пучка между прединфлектором и инфлектором при инжекции; 3 — траектория инжектируемого пучка; 4 — впускные магниты; 5 — пластины прединфлектора; 6 — пластины инфлектора.

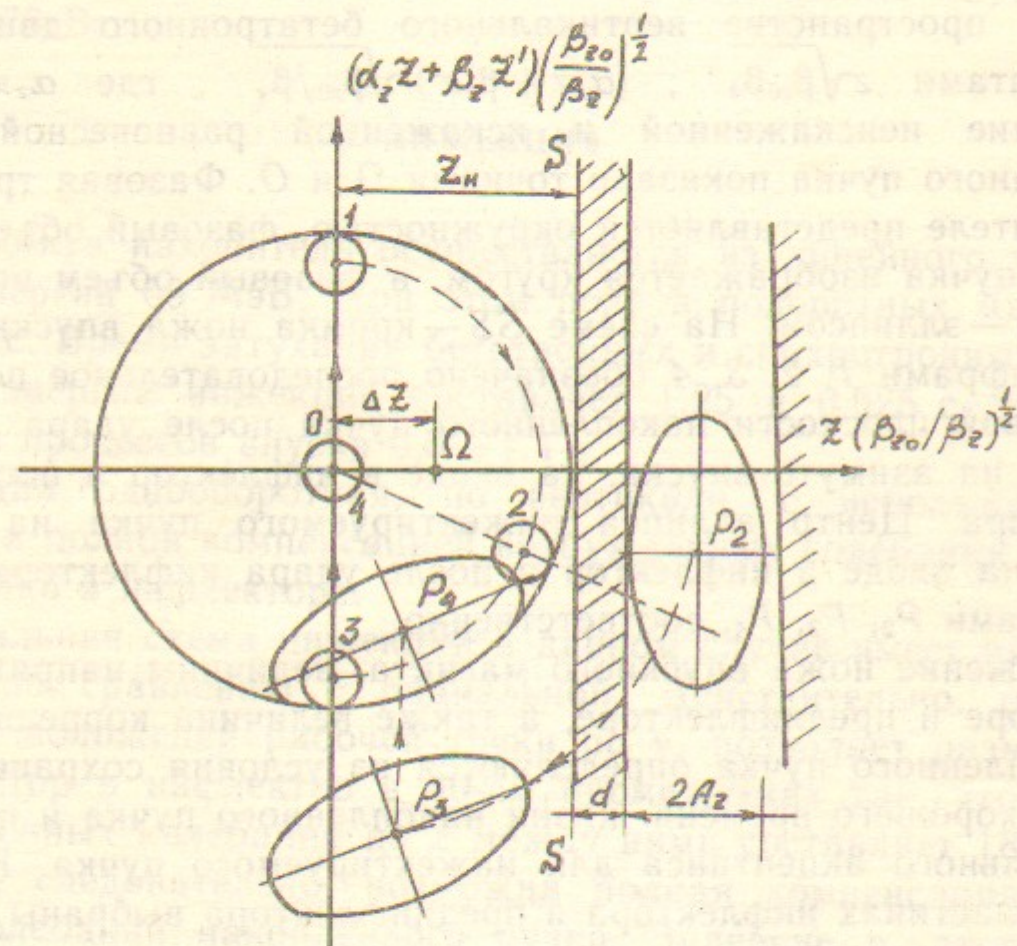


Рис. 17. Фазовая диаграмма процесса инжекции.

вать одинаковые по конструкции инфлектор и прединфлектор, запитав их последовательно от одного генератора.

Расстояние от ножа впускного магнита до неискаженной орбиты 4 мм, а величина коррекции орбиты по z в месте впуска 3 мм. Максимальный вертикальный эмиттанс инжектируемого пучка составляет $\epsilon_{z \max} = 3,4 \cdot 10^{-4}$ см·рад, вертикальная апертура впускного магнита должна быть не менее 4 мм. Величина заброса пучка прединфлектором на азимуте впуска равна 6 мм, при этом угол отклонения пучка в прединфлекторе (инфлекторе) должен быть $z'_n = 5,2$ мрад.

Пластины инфлектора и прединфлектора работают на согласованную нагрузку. Волновое сопротивление пластин 50 Ом. Расстояние между пластинами $d = 2$ см, а их длина $l = 12$ см. Амплитуда напряжения на пластинах при парафазном питании должна составлять ± 14 кВ. Конструкция инфлектора (прединфлектора) показана на рис. 18.

Впускные магниты выполнены невакуумными, что позволило избежать использования вакуумных тоководов.

4-градусный магнит — безжелезный, на поле 5 кГс квазикоаксиального типа с уравновешенной центральной шиной, выполнен из меди. Длительность питающего импульса $\tau_n = 30$ мкс выбрана такой, чтобы толщина скин-слоя $\delta = 0,6$ мм была меньше толщины септума $t = 0,8$ мм. При этом проникающее через септум поле затухает до величины

$$B_{\text{наружное}} = \frac{\delta^2}{yt} B_{0x} = 1,5 \cdot 10^{-2} B_{0x},$$

где $y = 30$ мм — размер центральной шины. Дополнительный экран из Ст.3 снижает эту величину до $(2 \div 3) \cdot 10^{-3} B_{0x}$. Полная толщина ножа этого магнита, с учетом вакуумных камер и тонкого магнитного экрана составляет 1,8 мм.

40-градусный впускной магнит — с железным магнитопроводом,

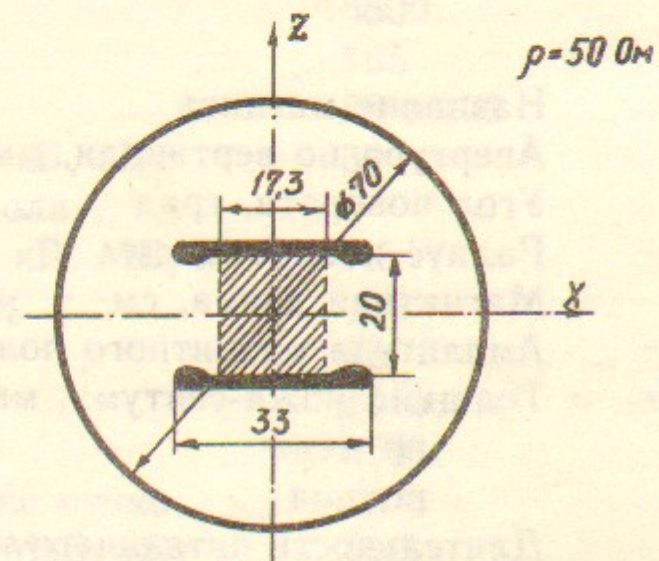


Рис. 18. Сечение инфлектора. Заштрихована область, где неоднородность электрического поля не превышает $\pm 1\%$.

на поле 10 кГс. Длительность питающего импульса составляет 300 мкс.

Основные параметры впускных магнитов переведены в табл. 5.

Таблица 5

Название магнита	M4	M40
Апертура по вертикали, мм	5	10
Угол поворота, град	4	40
Радиус поворота, см	40	20
Магнитная длина, см	4	14
Амплитуда магнитного поля, кГс	5	10
Толщина ножа-септума, мм		
по меди	0,8	5
полная	1,8	7
Длительность питающего импульса, мкс	30	300
Амплитуда тока, кА	2,2	1,4
Энергоемкость, Дж	11	30

7. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА

ВЧ-система накопителя работает на первой гармонике частоты обращения ($q=1$). Конструкция ускоряющего резонатора аналогична конструкции резонатора накопителя БЭП [4], с некоторыми упрощениями. Схематический чертеж резонатора показан на рис. 19. Резонатор — коаксиального типа, четвертьволновый, сильно укороченный емкостью, вакуумный. Корпус резонатора 1, 3, 4 — медный, помещен в бак 2 из нержавеющей стали. Настройка резонансной частоты осуществляется путем прогиба торцевой стенки 3 с помощью рычага 8 и механизма подстройки. Возбуждение резонатора производится через петлю связи 5, к которой подсоединяется коаксиальный фидер, связывающий резонатор с ВЧ-генератором, обеспечивающим выходную мощность до 50 кВт. Для индикации ВЧ-напряжения служит измерительная петля 6. Предусмотрен специальный механизм 7 для коррекции частот высших мод резонатора.

Параметры резонатора приведены в табл. 6. Следует отметить, что резонатор весьма напряжен по электрической прочности из-за малого ускоряющего зазора. Поэтому окончательное значение максимального ускоряющего напряжения будет определено после электрических испытаний резонатора.

Таблица 6

Рабочая частота, МГц	30,0
Характеристическое сопротивление, Ом	25
Добротность	6600
Шунтовое сопротивление, кОм	165
Ускоряющее напряжение, кВ	80 ÷ 100
Мощность потерь при $U_{ВЧ} = 100$ кВ, кВт	30
Максимальная напряженность поля на поверхности при $U_{ВЧ} = 100$ кВ, МВ/м	7,5
Пределы перестройки частоты, %	±1
Ускоряющий зазор, мм	18
Внешний диаметр, мм	1010
Длина по фланцам, мм	550
Мощность потерь на СИ при токе пучка $I = 300$ мА и энергии $E = 600$ МэВ, кВт	10,3
Максимальная мощность, потребляемая от ВЧ-генератора, кВт	40

Управление ВЧ-системой осуществляется с помощью комплекта радиоэлектронной аппаратуры. В функции управления входит регулирование амплитуды и частоты высокочастотного напряжения на ускоряющем зазоре резонатора, автоподстройка собственной

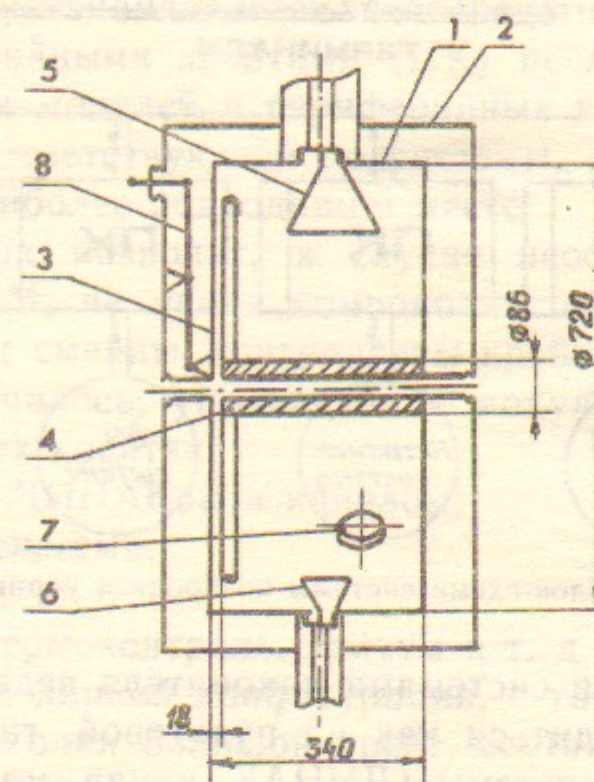


Рис. 19. Осевое сечение резонатора.

частоты этого резонатора, синхронизация впуска частиц из инжектора в накопитель, а также блокировка и защита элементов ВЧ-системы при возникновении аварийных режимов. Управление ВЧ-системой может производиться автоматически от ЭВМ. Комплект аппаратуры управления размещается в радиостойке «Вишня» (600×600×2100).

8. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Управление накопителем предполагается осуществить посредством микроЭВМ «Одренок». На рис. 20 представлена блок-схема автоматизированной системы управления.

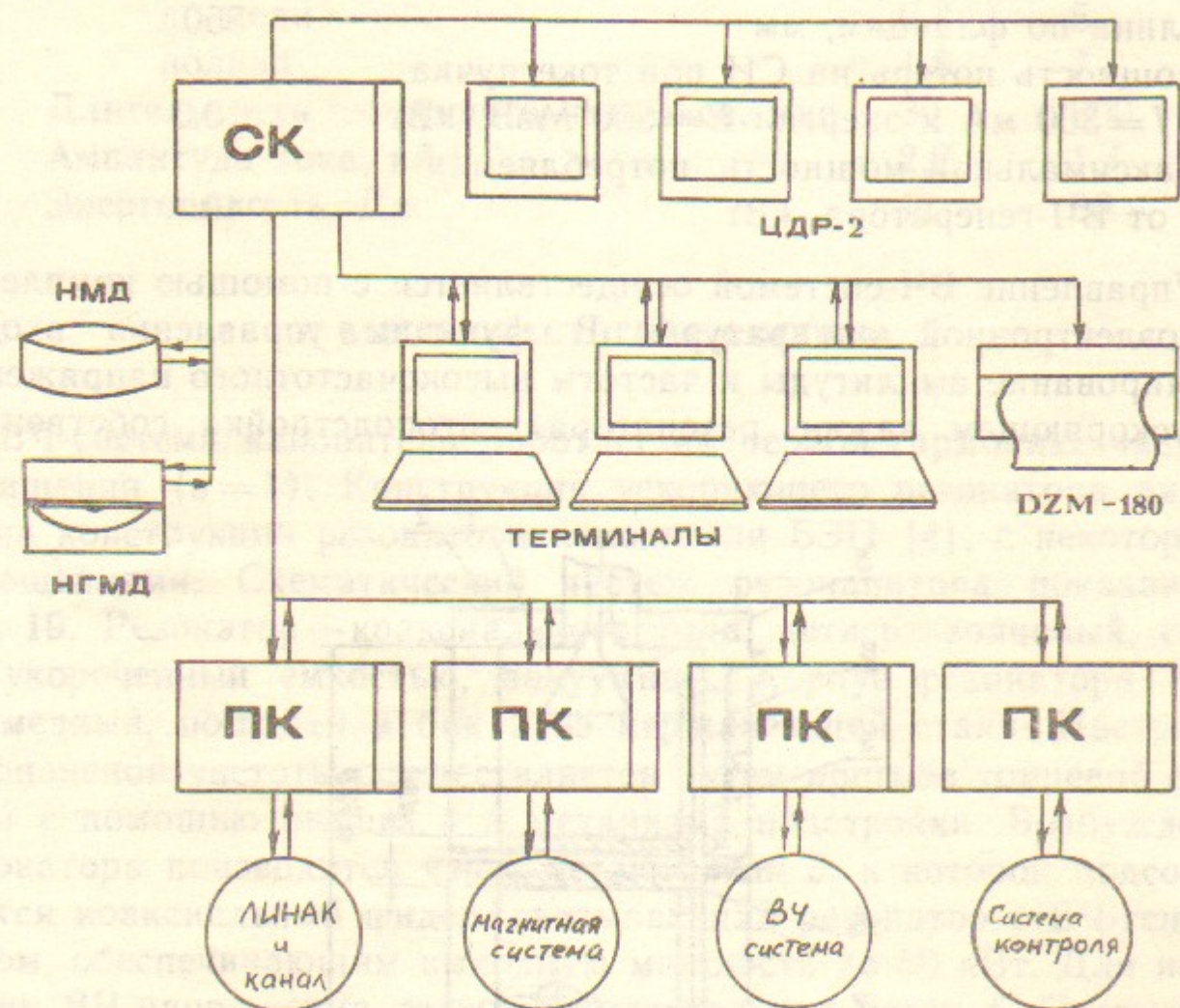


Рис. 20. Блок-схема системы контроля и управления.

Управление всеми системами накопителя ведется с терминалов, которые могут находиться как на пультовой, так и в непосредственной близости от системы (ЛИНАК, канал, магнитная система и т. д.). Связь терминалов с ЭВМ — по линии V-24. Информация о работе выводится на цветные графические дисплеи (ЦДР-2), кото-

рые находятся в пультовой или могут быть выведены в любое удобное место.

Для ведения документации используется растровое печатающее устройство, на которое можно выводить текстовую и графическую информацию (DZM-180, ROBOTRON).

В качестве основного накопителя информации используется «Винчестер» емкостью 10—20 Мбайт, а для обмена информацией с внешними организациями и для архивного хранения — «флоппи-диск». Для оперативной дисковой памяти используется ЗУ емкостью 0,35 Мбайт.

Контроль и управление накопителем требует одновременной работы нескольких программ, обслуживающих разные части установки и работающих в синхронном режиме. Система программирования, существующая на ЭВМ «Одренок», хорошо приспособлена для этих целей. Языком программирования является «TRAN», который представляет собой фортраноподобный язык, ориентированный на задачи управления и контроля. Кроме того, «Одренок» имеет аппаратные и программные средства для эффективной работы с КАМАКом.

Система управления состоит из КАМАК крейтов. Один из крейтов является системным (СК), в нем располагается собственно микроЭВМ «Одренок» с необходимым набором системных модулей. Этот крейт устанавливается непосредственно в пультовой и связан с периферийными крейтами (ПК) последовательной системой связи. Состав модулей в периферийных крейтах определяется потребностями соответствующей подсистемы, а сами крейты устанавливаются в наиболее подходящем месте.

Данный подход позволит, в случае необходимости, сменить управляющую ЭВМ, не меняя компоновки периферийных крейтов (необходимо будет сменить контроллеры крейтов).

Как уже отмечалось, управляющие модули сгруппированы по системам в четырех крейтах:

- 1) управление ЛИНАКом и каналом;
- 2) магнитная система;
- 3) ВЧ-система;
- 4) контроль (термоконтроль, вакуум и т. д.).

Отметим, что в данной конфигурации, с точки зрения программиста, существует один большой крейт, состоящий из $23 \times 5 = 115$ позиций (система связи почти не ограничивает быстродействия) и, таким образом, разбивка аппаратуры по крейтам обуславливается только соображениями удобства.

Комплектация крейтов приведена в табл. 8.

Таблица 8

Название блока	Распределение по крейтам					Итого
	СК	1	2	3	4	
К0611 «Одренок», ЭВМ с системой команд ISL-1900	1					1
П0611 ЗУ-128К (диск)	1					1
Б1102 V-24, счетверенный интерфейс КАМАК—V-24	1					1
Р0606 РП-8М, регистр прерываний	1					1
Р0607 загрузчик «Одренка»	1					1
И0621 ЦДР-2, цветной дисплей растровый	3					3
И0633 индикатор магистрали	1	1	1	1	1	5
Б0614 DS-24S, диспетчер	1					1
К0614 СС-24S, контроллер-расширитель «Одренка»		1	1	1	1	4
К0608 Контроллер мини-флоппи дисков	1					1
Контроллер «Винчестера»	1					1
Т0607 Энергонезависимые часы	1					1
А0601 КАС-128, коммутатор на 128 или 64 канала						2
А0604 КАС-16Г, коммутатор герконный						1
Ц0601 АЦПТ-16, измеритель температуры						2
Ц0609 АЦПИ-20, интегрирующий АЦП						2
Ц0602 ИВА-16, измеритель тока магниторазрядных насосов						1
Ц0640 БИИП-4, интегрирующий измеритель импульсных сигналов						1
Б0641 БР, буфер-транслятор импульсов (для БИИП)						1
Ц0642 ЦАП 16-16						1
Т0601 ИВИ «Спектр», измеритель временных интервалов						3
Г0601 ГТИ, генератор тактовых импульсов						1
Г0603 ПКС-8, преобразователь код-скважность						1
Г0604 ГВИ-8, генератор временных интервалов						1
В0611 УР-16, управляющий регистр						1
Р0601 СДС, сборщик двоичных состояний						1
Б0601 УШ-2, управление шаговым двигателем						1
Б0642 ИШАК, импульсно-шаговый коммутатор на 4 шаговых двигателя						1

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н. Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы. — УФН, 1977, т.122, вып.3, с.369—418.
2. Коломенский А.А., Лебедев А.Н. Теория циклических ускорителей. — ФМ, М., 1962.
3. Барков Л.М., Барышев В.Б., Кулипанов Г.Н., Мезенцев Н.А., Пиндюрин В.Ф., Скринский А.Н., Хорев В.М. Проект использования «змейки» из сверхпроводящих магнитов для генерации синхротронного излучения на накопителе ВЭПП-3. — Препринт ИЯФ СО АН СССР 78-13. Новосибирск, 1978, 25 с.
4. Анашин В.В., Вассерман И.Б., Вещеревич В.Г., Гришанов Б.И., Евстигнеев А.В., Кооп И.А., Купчик В.И., Меджидзадзе В.М., Михайличенко А.А., Переведенцев Е.А., Петров В.М., Седяров И.К., Скринский А.Н., Трахтенберг Э.М., Шатунов Ю.М. Электрон-позитронный накопитель БЭП. — Препринт ИЯФ СО АН СССР 84-114. Новосибирск, 1984, 27 с.
5. Нифонтов В.И. Организация управления ускорительно-накопительными комплексами в ИЯФ СО АН СССР при помощи ЭВМ. — В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Материалы конференции. Новосибирск, 1977, с.154—156.

*В.В.Анашин, В.С.Арбузов, Г.А.Блинов, В.Г.Вещеревич,
П.Д.Воблый, Э.И.Горникер, Н.И.Зиневич, Э.И.Зинин,
Н.И.Зубков, В.А.Киселев, Э.П.Коллеров, Г.Н.Кулипанов,
Ю.Г.Матвеев, А.С.Медведко, Н.А.Мезенцев, Л.Г.Моргунов,
В.М.Петров, С.П.Петров, В.В.Репков, В.А.Роевко,
А.Н.Скринский, С.В.Суханов, Ю.И.Токарев, Э.М.Трахтенберг*

Проект накопителя «Сибирь-СМ»

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 10.06.88 г.
Подписано в печать 13.07.88 г. МН 00461
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2,5 печ.л., 2,0 уч.-изд.л.
Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 96

*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.*