



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

38

В.В. Анашин, П.Д. Воблый, Е.С. Глускин,
Н.И. Зубков, П.М. Иванов, П.П. Ильинский,
В.Н. Корчуганов, Г.Н. Кулипанов, Н.А. Мезенцев,
С.П. Петров, А.Н. Скринский, А.С. Соколов,
Э.М. Трахтенберг, В.А. Ушаков

СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ «ЗМЕЙКА»
ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
«СИБИРЬ—1»

ПРЕПРИНТ 85-128



НОВОСИБИРСК

В 1983 году в ИАЭ им. И.В.Курчатова начал работать накопитель электронов «Сибирь-1» специализированный источник синхротронного излучения, разработанный и изготовленный в ИЯФ СО АН СССР [1]. Накопитель имеет энергию 450 МэВ, обеспечивая генерацию пучков СИ из поворотных магнитов с критической длиной волны $\lambda_c = 61 \text{ \AA}$. Начиная с 1985 года, на накопителе ведутся систематические эксперименты с использованием СИ. В мае 1985 года были получены пучки синхротронного излучения с $\lambda_c = 21 \text{ \AA}$ из специального устройства для генерации синхротронного излучения — трехполюсной сверхпроводящей «змейки» с полем 4,3 Т.

В данной работе описана конструкция «змейки», схема постановки на накопитель, результаты стендовых испытаний. Приведены результаты исследований влияния «змейки» на движение частиц в накопителе.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ НАКОПИТЕЛЯ «СИБИРЬ-1», СХЕМА ПОСТАНОВКИ «ЗМЕЙКИ» НА НАКОПИТЕЛЬ «СИБИРЬ-1»

В накопителе «Сибирь-1» магнитная структура с периметром 868,32 см, состоит из двух периодов. Период включает в себя два С-образных 90° поворотных магнита и два прямолинейных промежутка. В центр одного из промежутков каждого периода вставлена квадрупольная линза. Радиус поворота в магните $R = 100 \text{ см}$, максимальное магнитное поле на равновесной орбите $B = 1,5 \text{ Т}$, показатель спада магнитного поля в магните $n = 0,5$. Длина прямолинейного промежутка $l = 60 \text{ см}$. Выбрана рабочая точка с бетатронными частотами $\nu_x = 0,793$, $\nu_z = 0,895$ (в отсутствие «змейки»). На рис. 1 показаны бетатронные функции $\beta_x(s)$, $\beta_z(s)$ и дисперсионная функция $\eta(s)$ в зависимости от азимута s .

В таблице I приведены параметры накопителя, на рис. 2 приведен вид кольца в плане.

Промежуток I отведен под впускной магнит, ВЧ-резонатор и датчик тока пучка. Внутри вакуумной камеры промежутков II и IV, занятых квадрупольными линзами, расположены пластины соответственно инфлектора и прединфлектора, корректоры орбиты по вертикали.

В промежутках II и III установлены секступольные линзы для компенсации хроматизма, в промежутке IV октупольная линза для компенсации кубической нелинейности. Промежуток III использу-

ется для постановки «змейки». Кроме «змейки», в промежутке находится квадрупольная линза с максимальным градиентом магнитного поля $G = \pm 20$ Т/м, азимутальной длиной 5 см, необходимая для компенсации сдвига бетатронной частоты $\Delta\nu_z$, возникающего при включении «змейки».

Для компенсации возможного искажения орбиты по вертикали, вызванного работой «змейки», в квадрупольной линзе заложены дипольные обмотки, при помощи которых можно создавать горизонтальное магнитное поле B_x .

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ НАКОПИТЕЛЯ НА 450 МэВ

Максимальная энергия	проект	450 МэВ
	достигнута	450 МэВ
Ток пучка	проект	100 мА ($N_e 1,8 \cdot 10^{10}$)
	достигнуто	130 мА
Потери энергии на оборот	ΔW	3,63 КэВ
Время затухания	τ_x, τ_z	7,15 мс
	τ_s	3,57 мс
Эмиттанс	ϵ_x	$8,8 \cdot 10^{-5}$ см·рад.
Акцептансы	A_z	$0,56 \cdot 10^{-2}$ см·рад.
	A_x	$1,4 \cdot 10^{-2}$ см·рад.
Длина сгустка	$2\sigma_s$	59,8 см
Время жизни по кв. флуктуациям	τ_q	$6,4 \cdot 10^7$ с
Время жизни (связь 0, 15, 100 мА, 15 кВ)	τ_T	$2 \cdot 10^4$ с
Среднеквадратичный энергетический разброс в пучке	σ_E/E	$0,39 \cdot 10^{-3}$
Частота обращения	f_0	34,525 МГц
Кратность ВЧ	q	1
Максимальное напряжение на зазоре	$V_{ВЧ}$	15 кВ
Максимально допустимый энергетический разброс	$(\Delta E/E)_{\max}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$
Среднее давление	P	10^{-9} Торр
Время жизни пучка (рассеяние на остаточном газе)	τ_g	$3,6 \cdot 10^4$ с

2. КОНСТРУКЦИЯ «ЗМЕЙКИ»

Конструктивно «змейка» состоит из четырех основных элементов: сверхпроводящей магнитной системы, гелиевого объема, азот-

ного объема с тепловым экраном и вакуумной камеры с наружным корпусом.

Магнитная система «змейки» состоит из трех дипольных магнитов (см. рис. 3). Каждый магнит имеет два независимых полюса со сверхпроводящими обмотками.

Конструкция полюса представляет собой kern овальной формы из стали «армко» с обмоткой, выполненной из сверхпроводящего провода на основе ниобий-титанового сплава аналогично сверхпроводящей «змейке», установленной на накопителе ВЭПП-2М [2].

Три полюса (по одному от каждого магнита) закрепляются на стальной плите («армко»), одновременно являющейся магнитопроводом. Центральный и боковые полюса сдвинуты на 5 мм в противоположные стороны относительно оси накопителя. Две плиты с набранными полюсами крепятся друг над другом к центральной пластине из нержавеющей стали, образуя систему из трех дипольных магнитов с межполюсным зазором 32 мм. Крепление осуществляется четырьмя шпильками, что обеспечивает механическую жесткость конструкции.

Магнитная система закрывается сверху и снизу колпаками, которые привариваются к центральной пластине, образуя гелиевый объем, рис. 4. Центральная пластина имеет продольный паз, благодаря которому при установке гелиевый объем надвигается на вакуумную камеру накопителя, что позволяет проводить сборку (разборку) «змейки» без нарушения вакуума в накопителе.

Гелиевый объем закрепляется на базовой плите азотного объема с помощью трех опор на шариках из стекла «пирекс» с малой теплопроводностью (в отличие от обычно используемых термокомпенсированных подвесок [2]).

Азотный объем устанавливается на четырех термокомпенсированных стойках на дно корпуса «змейки». С верхней стенкой корпуса «змейки» он связан через четыре азотных ввода.

Азотный объем прикрывает гелиевый объем с трех сторон, со всех остальных сторон гелиевый объем закрыт медными экранами с хорошей теплопроводностью, находящимися при азотной температуре.

Вакуумная камера «змейки» является составной частью всей вакуумной камеры накопителя «Сибирь-1». Вертикальная апертура в камере «змейки» равна 22 мм, также как и в камере поворотных магнитов. Камера «змейки» в процессе работы «змейки» находится при азотной температуре.

Корпус «змейки» обеспечивает охранный вакуум, стенки корпу-

са также служат магнитным экраном. На верхней горизонтальной стенке корпуса устанавливается криостат. На нижней стенке через переходник закрепляется вакуумный насос.

Вся «змейка» в сборе устанавливается на подставке, которая одновременно является монтажным столом, облегчающим сборку и разборку «змейки» на месте. Для облегчения разборки в корпусе имеются направляющие с перемещающейся по ним тележкой. На этой тележке гелиевый объем выдвигается из корпуса вместе с тепловыми экранами после того, как азотный объем снимается вместе с верхней крышкой корпуса.

В таблице II приведены основные технические параметры «змейки».

Таблица II.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ «ЗМЕЙКИ»:

1. Габаритные размеры (мм):			
а) длина (в направлении пролета пучка)		350	
б) ширина		700	
в) высота без криостата		682	
с криостатом		2350	
2. Расход жидкого гелия с криостатом (л/час) 5			
3. Емкость гелиевого объема с криостатом (л) 110			
4. Емкость азотного объема (л):			
змейки		28	
криостата		20	
5. Размеры (в мм) ядра и СП обмотки:			
	центральный магнит	боковой магнит	
а) малая полуось	25	12	
б) большая полуось	45	47	
в) высота СП обмотки	68	68	
г) толщина СП обмотки	22,0	20,5	
д) диаметр провода СП обмотки	0,85	0,85	
е) количество витков СП обмотки	1656	1518	

3. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ «ЗМЕЙКИ» НА ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ В НАКОПИТЕЛЕ

3.1. Магнитное поле «змейки»

При испытании в межполюсном зазоре центрального магнита достигнуто поле 5,8 Т при токе 264 А. На рис. 5. представлен гра-

фик зависимости величины магнитного поля в центре межполюсного зазора центрального магнита от тока в обмотке.

На рис. 6. показано измеренное распределение вертикальной компоненты магнитного поля $B_z(s)$ вдоль оси «змейки». Это распределение хорошо аппроксимируется функцией синуса с полупериодами $d_1=7$ см и $d_2=10$ см для полей боковых и центрального магнитов соответственно. Магнитные измерения проводились при условии $\int B_{x,z}(s)dx=0$ с высокой точностью для разных уровней полей.

Согласно расчету распределение магнитного поля «змейки» в горизонтальном направлении для боковых и центрального полюсов можно аппроксимировать функцией $\cos(\pi x/a_i)$, $i=1$ —для боковых и $i=2$ —для центрального полюсов. При этом $a_1 \approx a_2 \approx a = 14$ см.

При описании движения частиц в «змейке» можно воспользоваться разложением полей около невозмущенной орбиты до квадратичных по смещению членов включительно ($z=0$). В общем случае, при наличии смещения центров полюсов по горизонтали от оси «змейки» на величины x_{0i} , выражение для магнитного поля на i -ом участке равновесной орбиты $x_i(s)$ имеет вид

$$B_{zi} = B_{0i} \left[1 - \frac{\alpha_i^2 (x_i(s) - x_{0i})^2}{2} \right] \sin k_i s, \quad (1)$$

где $i=1$ соответствует полю в зазорах боковых магнитов, $i=2$ —в зазоре центрального магнита; x, z, s —горизонтальная, вертикальная и азимутальная координаты; $\alpha_i = \pi/a_i$, $k_i = \pi/d_i$. Секступольный член в разложении поля B_{zi} вызывает появление градиента поля (и, следовательно, фокусировки), зависящего от $x_i(s)$. Выражение для этого градиента имеет вид

$$G_i(x(s), s) = -B_{0i} \alpha_i^2 [x_i(s) - x_{0i}] \sin k_i s. \quad (2)$$

Равновесную траекторию $x_i(s)$ легко найти в приближении независимости поля «змейки» от горизонтальной координаты ($x_i(s) \ll a_i$). При номинальном магнитном поле в зазоре центрального магнита $B_{02} = 4$ Т ($E = 450$ МэВ) отклонение равновесной орбиты в «змейке» (вынос) и амплитуда угла поворота электронов в «змейке» соответственно равны

$$x_{\max} = 0,57 \text{ см}, \quad \Theta_{\max} = 0,085 \text{ рад.}$$

Отметим, что полярность включения «змейки» такова, что «вынос» осуществляется внутрь кольца накопителя.

3.2. Влияние «змейки»

Влияние «змейки» на движение частиц в накопителе сводится к появлению сдвигов бетатронных частот $\Delta\nu_x$, $\Delta\nu_z$, искажению равновесной орбиты, изменению декрементов затухания горизонтальных и продольных колебаний.

а) Сдвиги бетатронных частот обусловлены двумя причинами. Во первых — наличием краевой фокусировки, а во вторых — наличием фокусировки вследствие развала магнитного поля в горизонтальном направлении, связанного с конечными размерами полюсов в горизонтальном направлении. При условии постоянства β_x и β_z на длине «змейки» результирующие выражения для $\Delta\nu_x$ и $\Delta\nu_z$ можно представить в виде

$$\begin{aligned}\Delta\nu_x &= \kappa_1 \beta_x B_{02} - \kappa_2 \beta_x B_{02}^2, \\ \Delta\nu_z &= -\kappa_1 \beta_z B_{02} + \kappa_2 \beta_z B_{02}^2 + \xi \beta_z B_{02}^2,\end{aligned}\quad (3)$$

Весь сдвиг $\Delta\nu_x$ и первые два слагаемых для $\Delta\nu_z$ обусловлены раздвиганием полюсов ($\Delta x = x_{01} - x_{02} \neq 0$) и развалом поля ($a^{-1} \neq 0$). Третье слагаемое в $\Delta\nu_z$ обусловлено краевой фокусировкой магнитов «змейки» с плоскопараллельными краями [4].

Здесь

$$\begin{aligned}\kappa_1 &= \frac{1}{2} \frac{\Delta x \cdot d_2}{a^2} \frac{1}{B_0}, \\ \kappa_2 &= \frac{1}{2\pi} \frac{d_2^2 (3d_1/8 + d^2/4)}{a^2 (B_0)^2}, \\ \xi &= \frac{1}{16\pi} \frac{d_2 (2 + d_2/d_1)}{(B_0)^2},\end{aligned}$$

B_{02} — амплитуда магнитного поля в центральном магните «змейки», B_0 — магнитная жесткость.

На рис. 7. показано изменение положения рабочей точки на диаграмме ν_x, ν_z в процессе включения «змейки». Сложная траектория рабочей точки объясняется совместным действием магнитного поля «змейки» и изменяемых при этом градиентов квадрупольных линз. Начальной рабочей точке (до включения «змейки») на энергии 450 МэВ соответствуют бетатронные частоты $\nu_z = 0,8492$, $\nu_x = 0,8113$, в конечной рабочей точке, при $B_{02\max} = 4,3$ Т, $\nu_z = 0,9086$, $\nu_x = 0,8482$. Если вычесть фокусировку, связанную с изменением градиентов в квадрупольных линзах (воздействие которых на бе-

татронные частоты калибровались), то получим сдвиги бетатронных частот $\Delta\nu_x$ и $\Delta\nu_z$, определяемые только полями в «змейке». На рис. 8 точками представлены $\Delta\nu_x$, $\Delta\nu_z$ как функции магнитного поля в зазоре центрального полюса «змейки». Возможные ошибки, допущенные при измерении бетатронных частот, указаны вертикальными черточками. Они объясняются наличием синхробетатронных резонансов $\Delta\nu_{x,z} = \pm \nu_s = 2,5 \cdot 10^{-3}$. Из графика видно, что при $B_{02} = 3,85$ Т $\Delta\nu_z = 0$, т.е. происходит полная компенсация сдвига вертикальной бетатронной частоты, вызванного фокусировкой на краях магнитов «змейки», противоположным по знаку сдвигом, появившемся вследствие раздвигания полюсов в горизонтальном направлении и наличием развала поля. Выражения (3) для $\Delta\nu_x$ и $\Delta\nu_z$ хорошо аппроксимируют экспериментальные точки при $a = 13$ см, $\beta_z = 111$ см и $\beta_x = 169$ см.

б) В накопителе «Сибирь-1» для наблюдения параметров пучка используется система оптического наблюдения [5]. Координаты x, z орбиты наблюдаются одновременно в каждом из четырех поворотных магнитов накопителя.

Работа накопителя со «змейкой» имеет особенность, заключающуюся в том, что она включается только на энергии 450 МэВ, а на энергии инжекции $E = 60$ МэВ и в процессе подъема энергии до максимальной «змейка» выключена. В связи с этим необходимо контролировать поля остаточного намагничивания выключенной «змейки» на энергии инжекции. Измеренное остаточное намагничивание составило $\int B_{\text{ост}} ds = 1,1 \cdot 10^{-4}$ Т·м, что обеспечивает при $E = 60$ МэВ искажение орбиты $\delta_x \leq 1$ мм.

При включении «змейки» искажения орбиты вследствие некомпенсированности полного угла поворота в «змейке» по обеим координатам не превышали 0,5 мм. На рис. 9 показана экспериментальная зависимость $\Delta I(I_1)$ разности токов в обмотках центрального полюса I_2 и боковых полюсов I_1 «змейки» от тока в обмотках боковых полюсов, при этом $\int B_z ds \leq 7,5 \cdot 10^{-4}$ Т·м ($\delta x < 0,5$ м). Отметим линейность этой зависимости в диапазоне тока $I_1 = 20 \div 158$ (А), что соответствует диапазону по магнитному полю в зазоре центрального магнита $B_{02} = 0,65 \div 4,3$ (Т) (см. рис. 5). В диапазоне $I_1 = 0 \div 25$ (А) разность токов $\Delta I < 0$ — отрицательна, а зависимость $\Delta I(I_1)$ — нелинейна. Такое поведение может объясняться начальным положением равновесной орбиты по горизонтали в момент включения «змейки», когда $|x_{02}| < |x_{01}|$ — т.е. орбита проходила ближе к центру центрального полюса, и наличием квадратичной зависимости магнитного поля по x — координате.

в). При включении «змейки» декремент затухания горизонтальных бетатронных колебаний $J_x = 1 - D$ сильно уменьшается, а декремент затухания синхротронных колебаний $J_s = 2 + D$ увеличивается. Здесь

$$D = \frac{\int \eta (|B/B_0|^3 + 2GB/(B_0)^2) ds}{\int (B/B_0)^2 ds} \quad (4)$$

Изменение декрементов определяется, главным образом, ростом (с увеличением поля в «змейке») слагаемого в выражении (4), содержащем интеграл $2 \int_{\text{«змейка»}} \eta \frac{GB}{(B_0)^2} ds$, и связано с развалом магнитного поля «змейки» в горизонтальном направлении. Раздвижение полюсов ($\Delta x \neq 0$) только увеличивает этот эффект.

Произведение GB является функцией x_{01}, x_{02} — сдвигов полюсов относительно невозмущенной равновесной орбиты. При изменении равновесного импульса — положения равновесной орбиты — величина GB также изменяется. Измеренный диапазон по частоте обращения f_0 , в котором есть затухание $34,47 < f_0 < 34,57$ с центральной частотой $f_0 = 34,5$ МГц.

4. ПИТАНИЕ «ЗМЕЙКИ»

Питание центрального и последовательно соединенных боковых соленоидов осуществляется от двух отдельных стабилизированных источников, управляемых через цифроаналоговый преобразователь от ЭВМ. Для достижения величины поля в «змейке» 4 Т, значения токов в центральном и боковых соленоидах составляют ~ 160 и ~ 180 А, соответственно. Предельная скорость нарастания тока в обмотках, не приводящая к срыву сверхпроводимости, не должна превышать $1 \div 1,5$ А/сек. Выходное напряжение источников питания, обеспечивающее $dl/dt \approx 1,5$ А/сек не превышает $1,5 \div 2$ В. Ошибка в токе центрального или боковых соленоидов на $\Delta I = 0,1$ А на энергии инжекции и 1 А на энергии 450 МэВ приводит к срыву пучка в накопителе. Меньшие значения ошибки ΔI приводят к смещению рабочей точки накопителя, искажениям орбиты. Поэтому ошибка регулирования токов в отдельных источниках и их нестабильность не превышают 0,1 А на энергии 450 МэВ, т. е. максимальная относительная нестабильность тока составляет $\delta_{\max} \leq 5 \cdot 10^{-4}$.

Блок-схема стойки питания соленоидов «змейки» представлена на рис. 10. Силовой регулятор представляет собой шестифазный

тиристорный выпрямитель, собранный по схеме параллельного соединения трех однофазных выпрямителей. Каждый однофазный выпрямитель имеет в своем составе трансформатор, два тиристора, обратный диод и дроссель фильтра. Обратные диоды позволяют уменьшить уровень пульсаций напряжения выпрямителя на малых значениях выходного напряжения, а также разгружают выпрямители от реактивной составляющей тока нагрузки. Конструктивно силовой регулятор оформлен в блоке стандарта «Вишня» размерами 480×238 мм. Выходные тиристоры и обратные диоды охлаждаются водой, причем все они расположены на одном радиаторе.

В качестве прецизионного измерителя тока нагрузки применен бесконтактный измеритель тока (БИТ), обеспечивающий измерение тока в диапазоне до 500 А с погрешностью, не превышающей 0,01% [6]. Блок электроники БИТ содержит также усилитель сигнала ошибки (УСО). Напряжение рассогласования сигналов с цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и БИТ после усиления в УСО и частотной коррекции в блоке коррекции (БК) подается на блок управления тиристорами (БУТ), преобразующий входное напряжение в величину сдвига фазы импульсов включения тиристоров выпрямителя.

Ввиду наличия в конструкции «змейки» насыщающихся железных полюсов, индуктивности соленоидов имеют нелинейную зависимость от тока, характер которой представлен на рис. 11. Активное сопротивление в цепи нагрузки мало, и даже в области минимальных индуктивностей постоянные времени нагрузок составляют $50 \div 100$ с. Это позволяет получить достаточно большой петлевой коэффициент усиления в цепи обратной связи ($K \geq 1000$) без специальных коррекций в области низких частот. Коррекция в области частот $10 \div 30$ Гц необходима для сглаживания процессов при изменении выходного тока, а также для ослабления влияния наводок сетевой частоты, появляющихся в измерительных цепях.

Защита нагрузок в режиме срыва сверхпроводимости осуществляется путем отключения силового питания обоих каналов при появлении сигнала в датчике срыва сверхпроводимости любого канала. При этом энергия, накопленная в соленоидах, рассеивается на обратных диодах выпрямителя, сопротивлениях дросселей фильтра, подводящих проводов и на участках обмоток соленоидов, вышедших из состояния сверхпроводимости. Последняя составляющая энергии в данной конструкции «змейки» относительно невелика, что позволило осуществить защиту без применения принудительной коммутации тока нагрузки.

Таблица III

ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВ СИ ПРИ $I=100$ мА, $E=450$ МэВ.

Параметр	Магнит	Змейка
Рабочее поле	1,5 Т	4,3 Т
Критическая длина волны	61,3Å	21Å
Эффективная длина $K=0,93\lambda_{3M}(\text{см}) \cdot B_{02}(T)$		24 см ~80
Угол расходимости по вертикали $\Delta\psi_{1/2}=1/2\gamma$	0,6 мрад	0,6 мрад
Эффективный горизонтальный угол $\Delta\theta_{1/2}=0,6 K/\gamma$		55 мрад
Поток фотонов $N \left[\frac{\text{фот}}{(c \cdot \text{мрад} \cdot 0,1\%) \Delta\lambda/\lambda} \right]_{\lambda_c}$	$0,7 \cdot 10^{12}$	$0,7 \cdot 10^{12}$
Число каналов вывода СИ	6	1
Излучаемая мощность	363 Вт	40 Вт
Размеры электронного пучка при связи 0,1		
$\sigma_x \times \sigma_z$	$1,62 \cdot 0,13 \text{ мм}^2$	$1,9 \cdot 0,1 \text{ мм}^2$
$\sigma_x' \times \sigma_z'$	$0,65 \cdot 0,08 \text{ мрад}^2$	$0,7 \cdot 0,08 \text{ мрад}^2$
	(на азимуте с $\beta_{x\text{max}}$)	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс включения поля «змейки» автоматизирован. Экспериментально найденное соотношение между токами обмоток полюсов I_1 и I_2 выдерживаются программным образом. Начальная скорость включения тока $(dI/dt)_{\text{min}}=0,15$ А/с, а максимальная скорость $(dI/dt)_{\text{max}}=1,5$ А/с. При этом система стабилизации источников питания «змейки» обеспечивает максимальное относительное динамическое рассогласование токов $\delta(I_2-I_1)/I_1 \leq 5 \cdot 10^{-4}$. Время включения змейки 160 сек. Подъем поля осуществляется практически без потерь тока электронов до значения магнитного поля в змейке 4,3 Т. Пучок СИ из «змейки» с характеристической длиной волны $\lambda_c=21$ Å выведен в канал для использования на станции рентгеновской литографии. В последующем планируется постанов-

ка эксперимента по EXAFS—спектроскопии в области мягкого рентгеновского излучения. Параметры пучков СИ из поворотных магнитов и «змейки» накопителя «Сибирь-1» приведены в таблице III.

В заключение авторы выражают благодарность за помощь в проведении работ по запуску «змейки» сотрудникам ИАЭ им. И.В.Курчатова Бузулукову Ю.П. Подогову Ю.Л., Юпинову Ю.Л., и сотруднику ИЯФ СО АН СССР Левичеву Е.Б.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.В.Анашин и др. Проект накопителя электронов на энергию 450 МэВ специализированного источника СИ. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1980 г., том I, стр. 306.
2. V.V.Anashin, I.B.Vasserman et al. Препринт ИЯФ 84-123 «75 kG superconducting wiggler magnet for the electron-positron storage ring VEPP-2M»
3. M.Sands. SLAC-121 (1970) The Physics of Electron Storage Ring. An Introduction
4. Л.М.Барков, В.Б.Барышев и др. «Проект использования «змейки» из сверхпроводящих магнитов для генерирования синхротронного излучения на накопителе ВЭПП-3». Препринт ИЯФ 78-13. Новосибирск, 1978.
5. Зинин Э.И. «Методы измерения параметров пучков в накопителях с использованием синхротронного излучения». Диссертация. Новосибирск, 1984 г.
6. Б.А.Баклаков, В.Ф.Веремеенко, М.М.Карлинер, А.А.Литвинов, С.П.Петров. Прецизионный широкополосный измеритель постоянного тока до 10 кА. ПТЭ, №6, 1981 г.

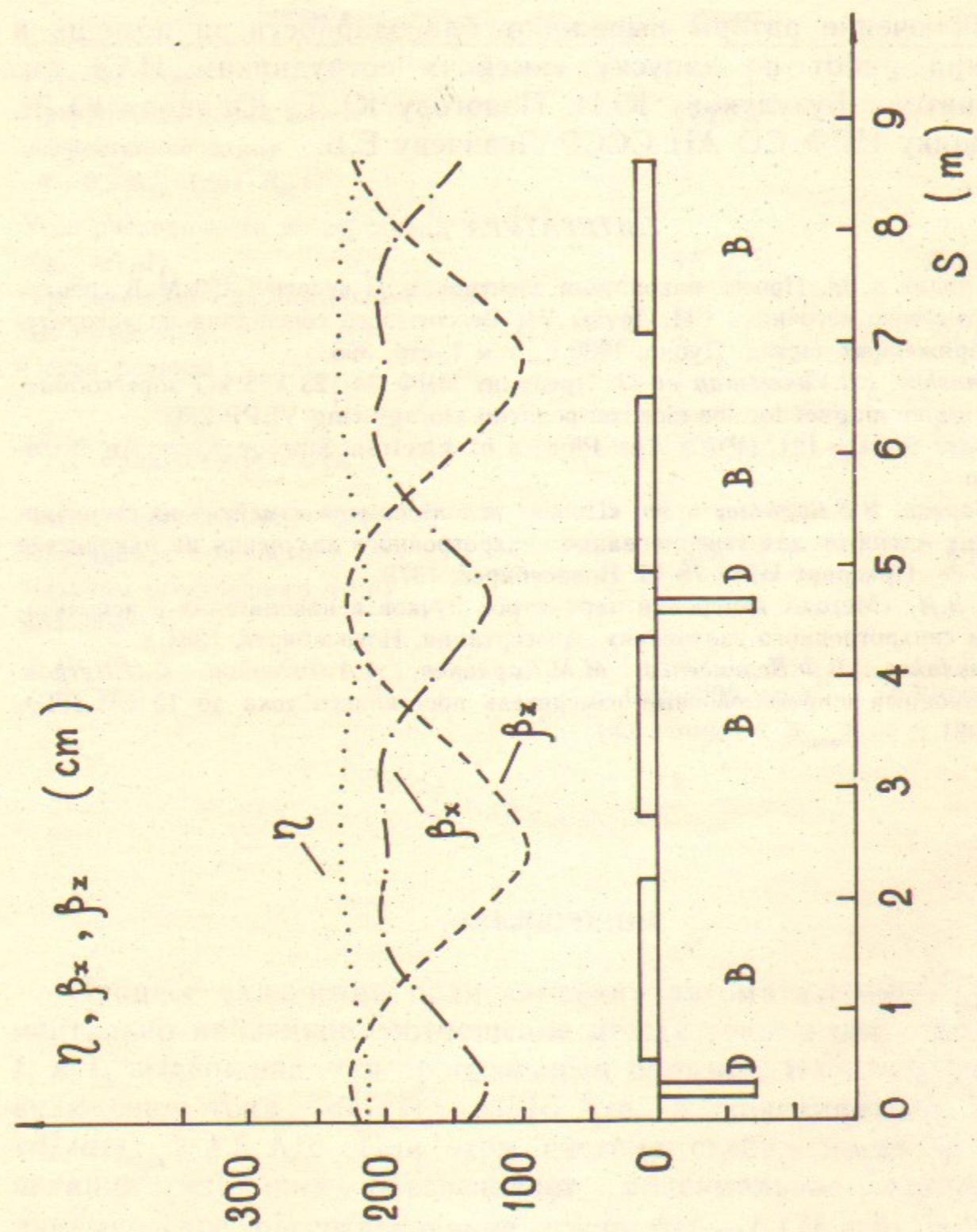


Рис. 1. Дисперсионная $\eta(s)$ и бетатронные $\beta_x(s)$, $\beta_z(s)$ функции накопителя «Сибирь-1».

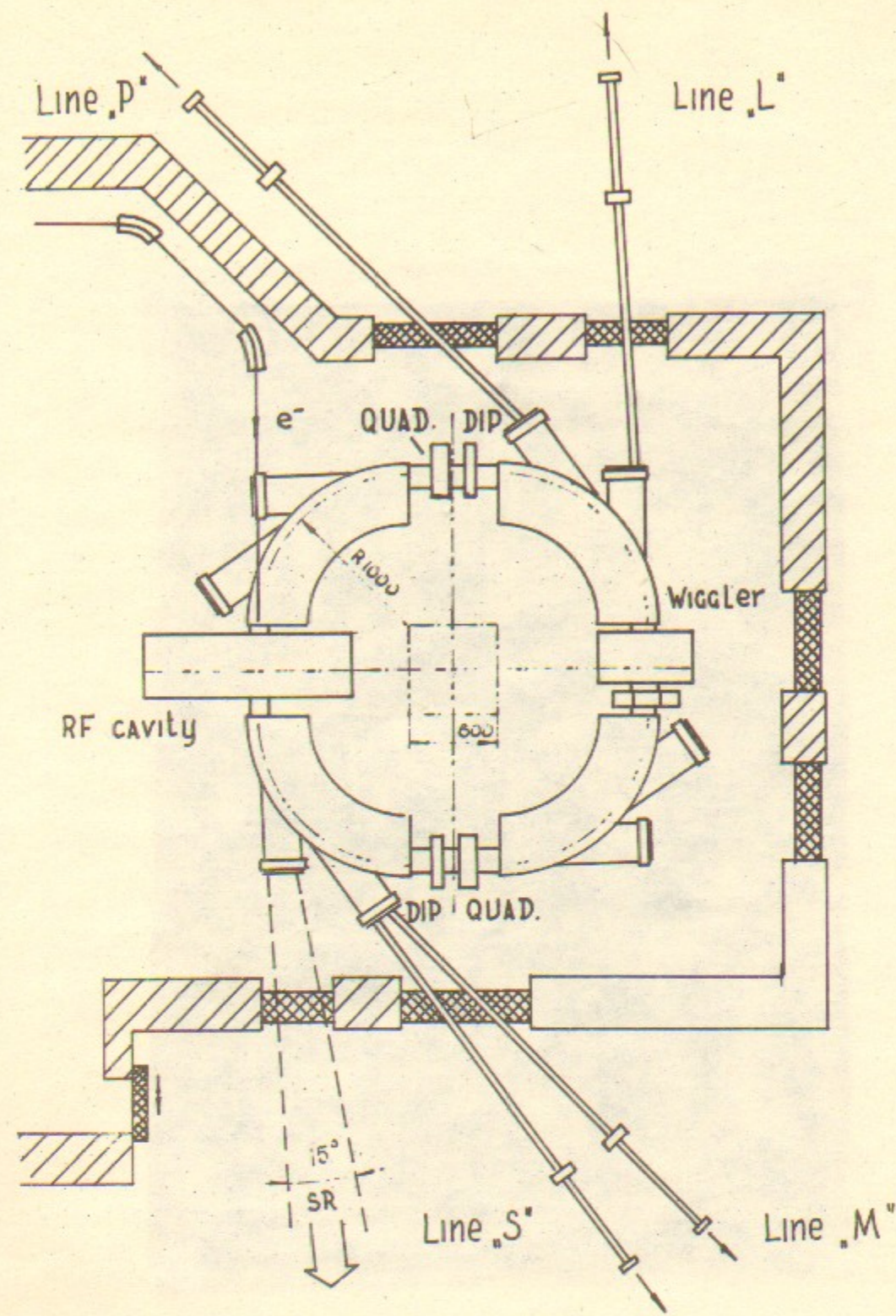


Рис. 2. Компонировка магнитной системы и каналов СИ накопителя «Сибирь-1».

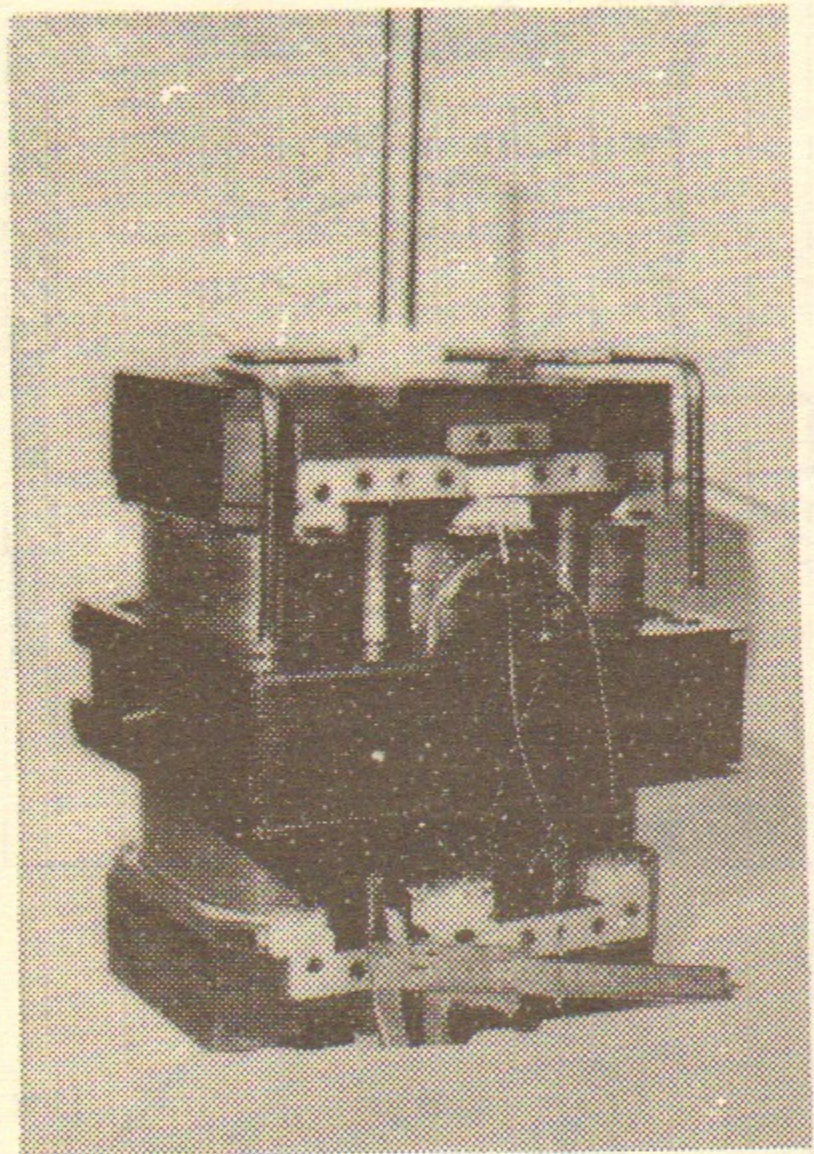


Рис. 3. Магнитная система сверхпроводящей «змейки», 1—плита магнитопровода, 2—полюса магнитов с СП обмотками, 3—центральная пластина, 4—стягивающие шпильки.

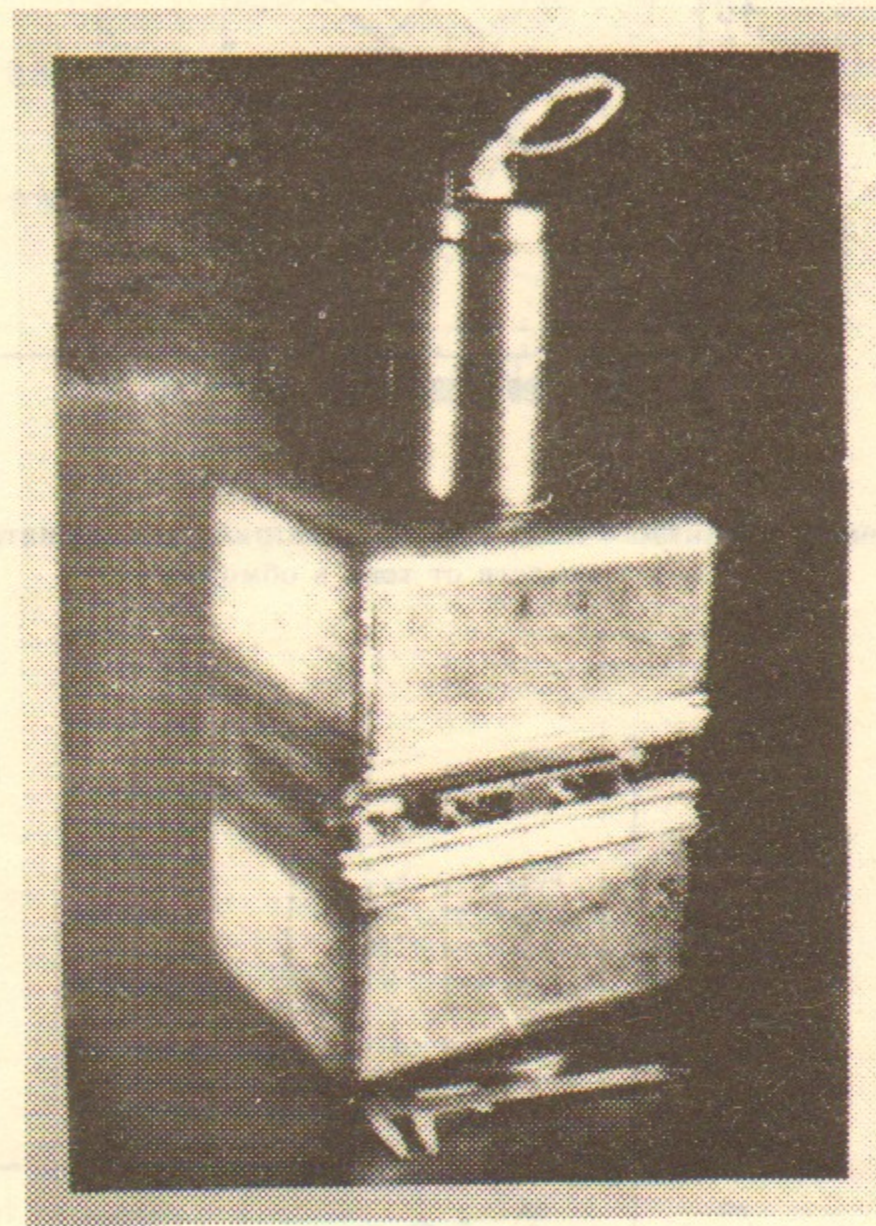


Рис. 4. Гелиевый объем СП «змейки».

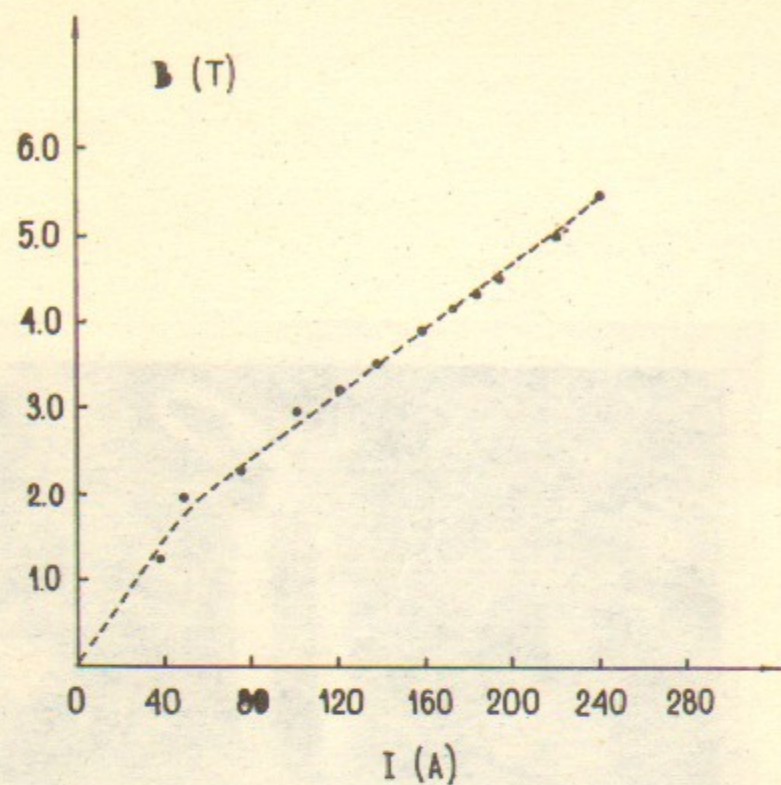


Рис. 5. Величина магнитного поля в зазоре центрального магнита «змейки» в зависимости от тока в обмотке.

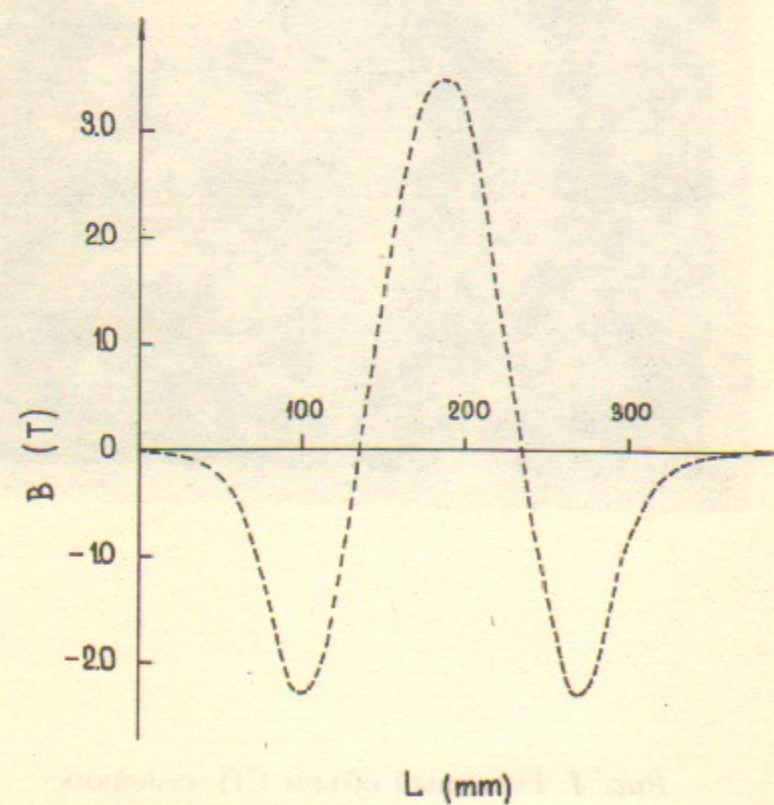


Рис. 6. Распределение вертикальной компоненты магнитного поля $B_z(s)$ вдоль оси «змейки».

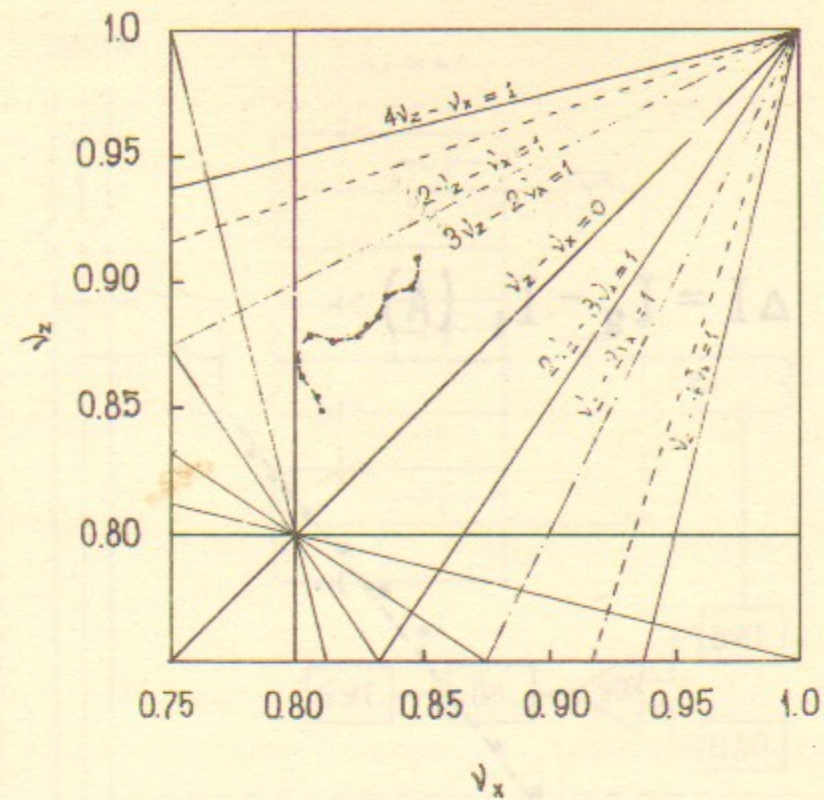


Рис. 7. Положение рабочей точки на диаграмме ν_x, ν_z в процессе включения «змейки».

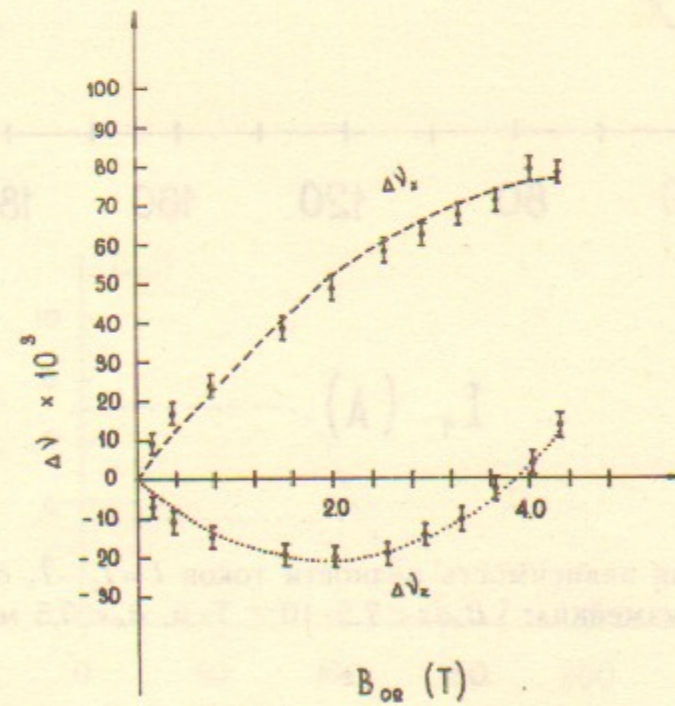


Рис. 8. Экспериментальные сдвиги бетатронных частот $\Delta\nu_x, \Delta\nu_z$, в зависимости от величины магнитного поля в зазоре центрального магнита «змейки».

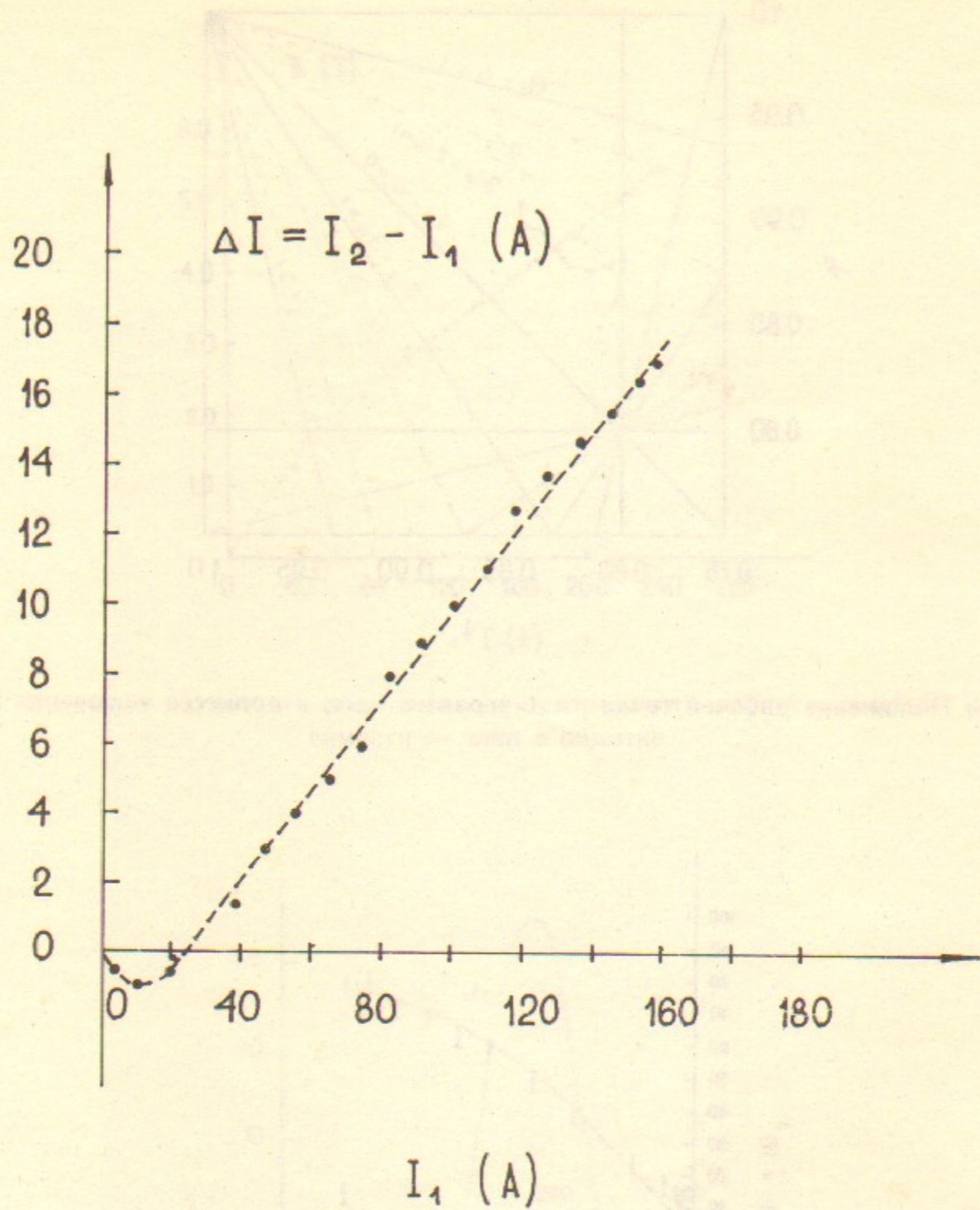


Рис. 9. Экспериментальная зависимость разности токов $I = I_2 - I_1$ от тока в боковых магнитах «змейки»: $\int B_2 ds < 7,5 \cdot 10^{-4}$ Т·м, $\sigma_x < 0,5$ мм.

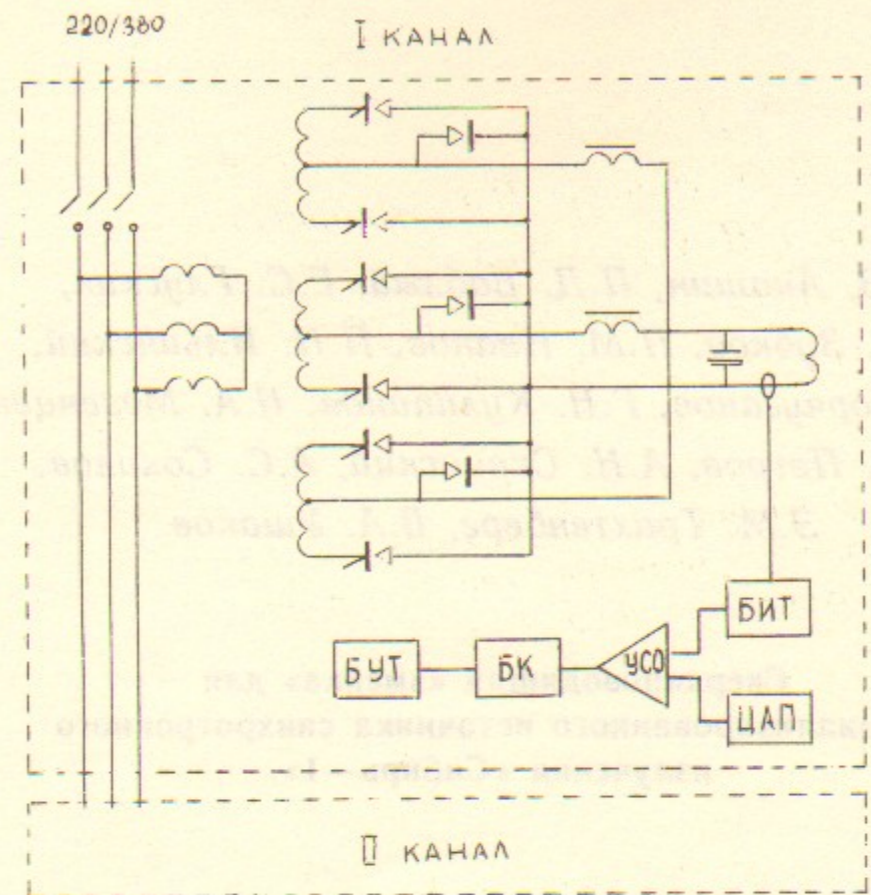


Рис.10. Блок-схема стойки питания «змейки» «Сибирь-1»

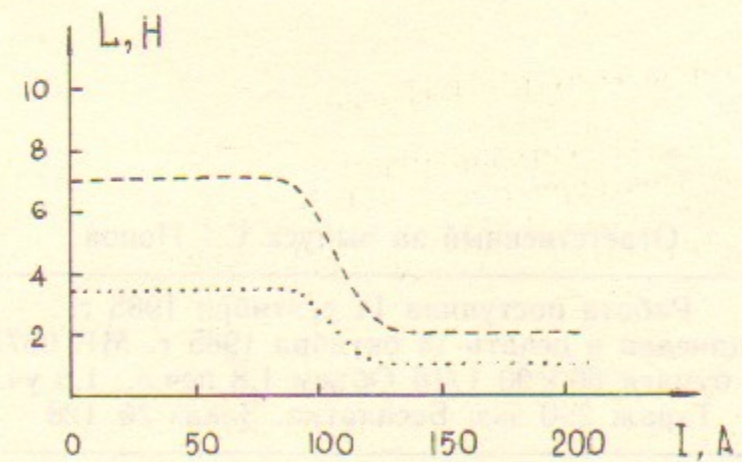


Рис.11. Качественная зависимость индуктивности соленоидов «змейки» от тока в СП обмотках.

*В.В. Анашин, П.Д. Воблый, Е.С. Глушкин,
Н.И. Зубков, П.М. Иванов, П.П. Ильинский,
В.Н. Корчуганов, Г.Н. Кулипанов, Н.А. Мезенцев,
С.П. Петров, А.Н. Скринский, А.С. Соколов,
Э.М. Трахтенберг, В.А. Ушаков*

**Сверхпроводящая «змейка» для
специализированного источника синхротронного
излучения «Сибирь—1»**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 11 сентября 1985 г.
Подписано в печать 14 октября 1985 г. МН 06775
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,8 печ.л., 1,5 уч.-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 128

*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.*