

УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ Г.И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

На правах рукописи

ШАТУНОВ ПЕТР ЮРЬЕВИЧ

**МАГНИТНАЯ СИСТЕМА НАКОПИТЕЛЯ С
ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫМИ ВСТРЕЧНЫМИ
ПУЧКАМИ ВЭПП-2000**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
Кооп Иван Александрович

Содержание

Введение	3
Глава 1. Магнитная структура коллайдера ВЭПП-2000	7
1.1. Выбор магнитной структуры и принцип круглых пучков	7
1.2. Описание коллайдера ВЭПП-2000	11
Глава 2. Расчет, изготовление и измерения магнитных элементов	19
2.1. Поворотные магниты	19
2.1.1. Проект и параметры магнита	19
2.1.2. Магнитные измерения поворотных магнитов ВЭПП-2000	23
2.1.3. Результаты магнитных измерений	25
2.2. Квадрупольные линзы	27
2.2.1. "Основные" квадрупольные линзы	27
2.2.2. "Расщепляющие" линзы	32
2.3. Элементы коррекций	33
2.3.1. Секступоли	33
2.3.2. Скью-квадрупольные коррекции	34
2.3.3. Дипольные коррекции в поворотных магнитах	35
2.3.4. Дипольные коррекции в квадрупольных линзах	35
2.4. Сверхпроводящие соленоиды	37
2.4.1. Параметры и конструкция	37
2.4.2. Коммутация и система блокировок	39
2.4.3. Магнитные измерения	41
Глава 3. Источники питания	42
3.1. Источник питания основных магнитов ВЭПП-2000	42
3.2. Источники питания для основных квадрупольных линз ВЭПП-2000	44
3.3. Источники питания для сверхпроводящих соленоидов.	46
3.4. Источники питания для элементов коррекций	47

Глава 4. Система управления магнитными элементами ВЭПП-2000 . . .	49
4.1. Структура системы управления	49
4.2. Высокоуровневые инструменты для управления магнитными элементами	51
Глава 5. Опыт работы с магнитной системой коллайдера	56
5.1. Пробный запуск коллайдера без сверхпроводящих соленоидов	56
5.2. Получение высокого вакуума	57
5.3. Калибровка средней энергии пучков	58
5.3.1. Калибровка энергии по массе ϕ -мезона	59
5.3.2. Калибровка энергии методом резонансной деполяризации	60
5.4. Экспериментальная проверка метода круглых пучков	63
5.5. Подъем энергии ВЭПП-2000 в режиме встречных пучков до 1ГэВ	65
Заключение	69
Приложение А. Детальная структура ВЭПП-2000	71
Литература	72

Введение

1 В Институте Ядерной Физики СО РАН более двадцати пяти лет успешно работал
 2 комплекс ВЭПП-2М с электрон-позитронными встречными пучками [1]. Для производ-
 3 ства пучков электронов и позитронов используется каскад ускорителей и накопительных
 4 колец: импульсный линейный ускоритель ИЛУ производит пучок электронов (1.5А) с
 5 энергией 2.5 МэВ, который инжектируется в синхротрон Б-3М. В зависимости от зада-
 6 чи электроны ускоряются до энергии 125 МэВ или 250 МэВ [2]. Ток выпускаемого пучка
 7 $200 \div 300$ мА для низкой энергии и $\simeq 1000$ мА для высокой. Пучок высокой энергии с помо-
 8 щью аксиально-симметричных литиевых линз фокусируется на вольфрамовую мишень
 9 и порождает электрон-позитронный ливень. После мишени позитроны фокусируются с
 10 помощью нескольких линз и дипольных магнитов и инжектируются в накопитель БЭП .

11 Накопитель БЭП [3] рассчитан на энергию пучков от 125 до 900 МэВ. В зависимо-
 12 сти от типа накапливаемых частиц магнитное поле меняет знак. Дублетная структура
 13 кольца с большой периодичностью обеспечивает большой акцептанс для накопления по-
 14 зитронов и малый фазовый объем затухшего пучка, что очень существенно для перепуска
 15 частиц в коллайдер. Время накопления необходимого количества частиц для перепуска в
 16 коллайдер (≈ 60 мА) порядка 50 секунд для электронов и порядка 30 минут для позитро-
 17 нов. После накопления БЭП ускоряет частицы и переводит их в накопитель ВЭПП-2М
 18 на энергии эксперимента (см. рисунок 1).

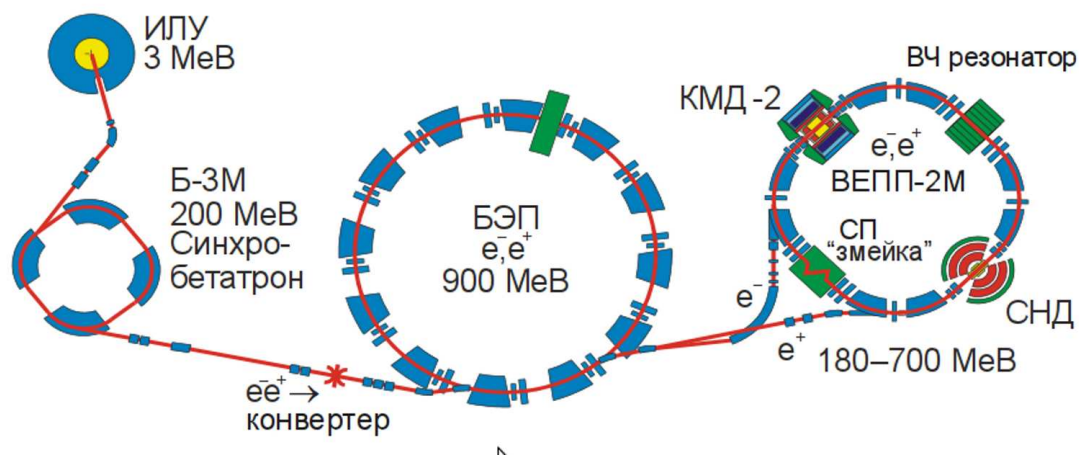


Рис. 1. Общий вид комплекса ВЭПП-2М.

1 За годы работы ВЭПП-2М целым рядом детекторов была набрана интегральная
 2 светимость около 100 пб^{-1} , что позволило с рекордной точностью измерить сечения рож-
 3 дения адронов при аннигиляции электрон-позитронных пар в области с энергией от 0.4
 4 до 1.4 ГэВ в системе центра масс. Обработка данных ВЭПП-2М позволила определить
 5 параметры (ρ , ω и Φ) векторных мезонов, вероятности их распадов в различных каналах
 6 и измерить с абсолютной точностью порядка 1 процента сечения рождения адронов при
 7 электрон-позитронной аннигиляции. Эти результаты экспериментов на ВЭПП-2М внес-
 8 ли существенный вклад в вычисления величин аномального магнитного момента мюона
 9 $(g - 2)_\mu$ и постоянной тонкой структуры $\alpha(M_Z)$ при энергии Z -мезона, так как весовые
 10 функции реакций рождения адронов в рамках Стандартной Модели подчеркивают роль
 11 низких энергий.

12 Однако к 2000 году, ввиду физического старения ВЭПП-2М и ввода в строй Φ -
 13 фабрики в Италии (Фраскати), встал вопрос о дальнейшей судьбе комплекса ВЭПП-2М.
 14 Надо сказать, что в области энергий выше ВЭПП-2М (до 2 ГэВ в системе центра масс)
 15 суммарный интеграл светимости, набранный к тому времени во всех лабораториях мира,
 16 примерно в 10 раз уступал результату ВЭПП-2М, хотя указанные выше физические зада-
 17 чи требовали проведения более точных измерений сечений рождения адронов. В области
 18 энергий до 2 ГэВ в системе центра масс ожидается проявление возбужденных состояний
 19 ρ , ω и Φ -мезонов. Кроме того, в этом энергетическом интервале появляется уникальная
 20 возможность изучения рождения протон-антипротонных и нейтрон-антинейтронных пар.

21 В результате обсуждений в ИЯФ было решено заменить ВЭПП-2М на новый нако-
 22 питель с большей энергией (до 1 ГэВ на пучок) и в 20-30 раз большей светимостью, ис-
 23 пользуя во многом инфраструктуру комплекса – с сохранением системы воспроизводства
 24 пучков электронов и позитронов, системы импульсных и силовых источников питания и
 25 т.д. Кроме того, для выполнения поставленной задачи требовалось провести модерниза-
 26 цию и усовершенствование существующих детекторов КМД-2 [29] и СНД [28].

27 Такой подход позволял значительно сэкономить время и требуемые ресурсы. Одна-
 28 ко строительство установки на большую энергию в рамках существующего эксперимен-
 29 тального зала с учетом размещения двух детекторов строго ограничивало максимально
 30 достижимую энергию, выбор схемы инжекции пучков и, конечно, выбор подхода к полу-
 31 чению высокой светимости.

32 В итоге, после многоступенчатого согласования часто противоречивых требований

1 со стороны накопительного кольца и детекторов был выбран вариант нового накопителя,
2 который получил название ВЭПП-2000.

3 Данная работа посвящена выбору электронно-оптической схемы ВЭПП-2000, разра-
4 ботке элементов магнитно-фокусирующей системы, проведению калибровок и магнитных
5 измерений, созданию системы автоматизированного управления, запуску коллайдера и
6 опыту его работы в течении первых лет.

- 7 ● В главе 1 обосновывается подход к получению высокой светимости коллайдера на
8 основе концепции "круглых" встречных пучков и рассматриваются требования, ко-
9 торые она накладывает на оптическую структуру ускорителя. Показаны возможные
10 варианты реализации "круглых" пучков на ВЭПП-2000 и соответствующая структу-
11 ра кольца. Приведены результаты компьютерных расчетов параметров встречных
12 пучков.
- 13 ● Глава 2 посвящена разработке магнитных элементов ВЭПП-2000. Рассматриваются
14 основные поворотные магниты с ведущим полем до 24 кГс, квадрупольные линзы
15 кольца с градиентом магнитного поля до 5 кГс/см и апертурой 4 см, сверхпро-
16 водящие соленоиды с полем до 130 кГс. Приводится также информация о систе-
17 ме коррекций, применяемых на ВЭПП-2000: дипольные коррекции в поворотных
18 магнитах и квадрупольных линзах, три типа секступолей и совмещенные с ними
19 скью-квадрупольи. Представлены двумерные и трехмерные компьютерные симуля-
20 ции магнитного поля и данные о магнитных измерениях. Проведен анализ влияния
21 на динамику пучка.
- 22 ● В главе 3 рассмотрены источники питания магнитных элементов ВЭПП-2000: ис-
23 точник для основных поворотных магнитов со стабилизированным током до 10 кА,
24 источник для основных квадрупольных линз с током до 300 А, двух-полярный ис-
25 точник для сверхпроводящих соленоидов с током до 300 А, источник для разнооб-
26 разных коррекций с током до 6 А.
- 27 ● В главе 4 описана система автоматизированного управления и контроля магнитных
28 элементов кольца ВЭПП-2000. Система позволяет оператору управлять элементами
29 как по отдельности, так и группами, сохранять и восстанавливать рабочие массивы
30 параметров элементов, визуализировать текущее состояние и просматривать исто-

1 рию событий.

- 2 • В главе 5 рассказывается про запуск коллайдера в рабочий режим и ускорительные
3 эксперименты в первые два сезона работы. Показан вариант структуры кольца без
4 сверхпроводящих соленоидов, который используется для получения высокого ваку-
5 ума с помощью тренировки вакуумной камеры синхротронным излучением пучков.
6 Приведены результаты экспериментальной проверки принципа "круглых" пучков
7 и первые результаты калибровки энергии пучков методом резонансной деполяриза-
8 ции. Описан метод подъема энергии ВЭПП-2000 с двумя пучками до $E=1$ ГэВ.

Магнитная структура коллайдера ВЭПП-2000

1.1. Выбор магнитной структуры и принцип круглых пучков

Ключевым вопросом для выбора электронно-оптической схемы коллайдера является достижимая светимость. Обычный прием – увеличение числа встречных сгустков – для условий ВЭПП-2000 не годится, ввиду невозможности организовать на ограниченном пространстве накопителя систему разведения пучков в "паразитных" местах встречи.

В начале 90-х годов в ИЯФ для проекта ϕ -фабрики [4] был разработан принцип круглых встречных пучков, позволяющий повысить параметр пространственного заряда, максимальное значение которого ограничено эффектами встречи. Известно, что для плоских пучков светимость определяется следующим выражением:

$$L = \frac{\pi\gamma^2\xi_x\xi_z\varepsilon_x f}{r_e^2\beta_z}(1 + \sigma_z/\sigma_x)^2, \quad (1.1)$$

где f - частота обращения, r_e - классический радиус электрона, γ - релятивистский фактор, ε_x - горизонтальный эмиттанс, σ_z, σ_x - среднеквадратичные размеры в месте встречи, β_z - вертикальная бета-функция в месте встречи, а $\xi_{x,z}$ - параметры пространственного заряда:

$$\xi_{x,z} = \frac{Nr_e\beta_{x,z}}{2\pi\sigma_{x,z}(\sigma_x + \sigma_z)}, \quad (1.2)$$

характеризующие величину эффектов встречи. В частности, на ВЭПП-2М были достигнуты величины $\xi_x = 0.02, \xi_z = 0.05$ [17]. Причины этих ограничений связаны с нелинейностью полей встречных сгустков, которые приводят к появлению нелинейных перекрывающихся резонансов. Движение частиц в этих условиях становится в значительной мере стохастическим, что приводит к раздуванию размеров пучков и тем самым ограничивает достижимую светимость.

В случае x - z симметрии (равные вертикальные и горизонтальные бета-функции в месте встречи и эмиттансы) параметры пространственного заряда одинаковы по обоим направлениям:

$$\xi_x = \xi_z = \xi = \frac{Nr_e\beta}{4\pi\sigma^2} = \frac{Nr_e}{4\pi\epsilon}, \quad (1.3)$$

1 а формула светимости упрощается к виду:

$$L = \frac{4\pi\gamma^2\xi^2\epsilon f}{r_e^2\beta}. \quad (1.4)$$

2 Отсюда следует, что при фиксированной плотности частиц ($\sigma_x\sigma_z = \sigma^2$) горизонтальный
3 параметр ξ_x значительно увеличивается в сравнении с вариантом плоских пучков. Верти-
4 кальный параметр при таких условиях уменьшается в два раза, и соответственно умень-
5 шается сдвиг вертикальной бетатронной частоты от встречного сгустка, что позволяет
6 увеличивать плотность частиц. Таким образом получается очевидное увеличение свети-
7 мости за счет перераспределения размеров пучка в месте встречи.

8 Далее, хорошо известно, что двумерное движение в поле центральной силы $f =$
9 $f(r)$ имеет дополнительный интеграл движения – продольную компоненту момента им-
10 пульса:

$$M = M_y = z \cdot p_x - x \cdot p_z. \quad (1.5)$$

11 В этом случае движение сводится в полярных координатах к одномерному, гамильтониан
12 которого выражается через $r = \sqrt{x^2 + z^2}$ и $p_r = \dot{r}$ с дополнительным центробежным
13 потенциалом:

$$H = \frac{P_r^2}{2} + U(r, t) + \frac{M^2}{2r^2}. \quad (1.6)$$

14 Известно также, что движение в центральном поле полностью интегрируемо только в
15 двух случаях [5]: при $U(r) \sim k/r$ и $U(r) \sim k \cdot r^2$. Последний вариант центрального поля
16 реализуется при встрече круглых пучков с постоянной плотностью в месте встречи.

17 Теперь преобразуем момент M центральной частицы $s = 0$ через оборот. Уравне-
18 ния, описывающие координаты частицы относительно равновесной орбиты, могут быть
19 записаны при отсутствии связи колебаний в виде:

$$\begin{aligned} x(s) &= A\sqrt{\beta_x(s)} \cos(\nu_x s + \phi_x) \\ z(s) &= B\sqrt{\beta_z(s)} \cos(\nu_z s + \phi_z) \end{aligned} \quad (1.7)$$

20 Тогда мы можем записать выражения для импульсов:

$$\begin{aligned} p_x(s) &= \frac{A\beta_x(s)' \cos(\nu_x s + \phi_x)}{2\sqrt{\beta_x(s)}} - A\nu_x \sqrt{\beta_x(s)} \sin(\nu_x s + \phi_x) \\ p_z(s) &= \frac{B\beta_z(s)' \cos(\nu_z s + \phi_z)}{2\sqrt{\beta_z(s)}} - B\nu_z \sqrt{\beta_z(s)} \sin(\nu_z s + \phi_z) \end{aligned} \quad (1.8)$$

1 Подставляя эти выражения в формулу для продольной составляющей момента импульса
 2 и учитывая периодичность β -функций и равенство нулю их производных в месте встречи,
 3 получаем:

$$M_y = AB\sqrt{\beta_x\beta_z}(\nu_z \sin(\nu_z s + \phi_z) \cos(\nu_x s + \phi_x) - \nu_x \sin(\nu_x s + \phi_x) \cos(\nu_z s + \phi_z)) \quad (1.9)$$

4 При равенстве бетатронных частот $\nu_x = \nu_z$ имеем сохранение продольного момента им-
 5 пульса через оборот частицы

$$M_y = AB\sqrt{\beta_x\beta_z}\nu \sin(\phi_z - \phi_x). \quad (1.10)$$

6 А это значит, что при одинаковости мест встречи движение каждой частицы полностью
 7 интегрируемо для обсуждаемого случая пучков с постоянной плотностью.

8 В реальной ситуации встречные пучки электронов и позитронов в месте встречи име-
 9 ют Гауссовское распределение плотности $\rho(s)$ по всем трем направлениям с поперечными
 10 размерами $\sigma_{x,z} = \sqrt{\beta_{x,z} \cdot \epsilon_{x,z}}$ и продольным размером σ_s . Для круглых пучков $\epsilon_x = \epsilon_z = \epsilon$
 11 и $\beta_x = \beta_z = \beta^*$. Поле встречного сгустка, вообще говоря, в этом случае тоже нелинейно.
 12 Но, как показано в работе [6], при "правильном" выборе фокусировки ($\sigma_s = \sqrt{2}\beta^*$) даже
 13 в 3-х мерном случае для центральной частицы с $s = 0$ движение интегрируемо и близко
 14 к этому при $s \leq \sigma_s$.

15 Отсутствие зависимости силы воздействия встречного пучка от времени можно про-
 16 демонстрировать на простом примере встречи коротких круглых сгустков ($\sigma_s \ll \beta^*$). В
 17 этом случае поперечный "удар" f_r , получаемый встречной тестовой частицей на некото-
 18 ром радиусе r не зависит от s :

$$f_r \sim \beta(s) \cdot \rho(s); \quad \rho(s) \sim 1/\beta(s). \quad (1.11)$$

19 Реальная ситуация, конечно, сложнее рассматриваемого примера, но, в целом, можно
 20 ожидать, что временная модуляция удара за счет синхротронных колебаний частиц в
 21 круглом случае значительно слабее, чем для плоских пучков.

22 Эти предположения о большей устойчивости встречных пучков были проверены в
 23 компьютерном моделировании эффектов встречи. Результаты моделирования зависимо-
 24 сти вертикального размера пучка от параметра ξ для "сильно-слабого" случая и парамет-
 25 ров ВЭПП-2М представлены на рисунке 1.1. Пунктирная линия - результат измерений
 26 z-размера на ВЭПП-2М для плоского пучка [19].

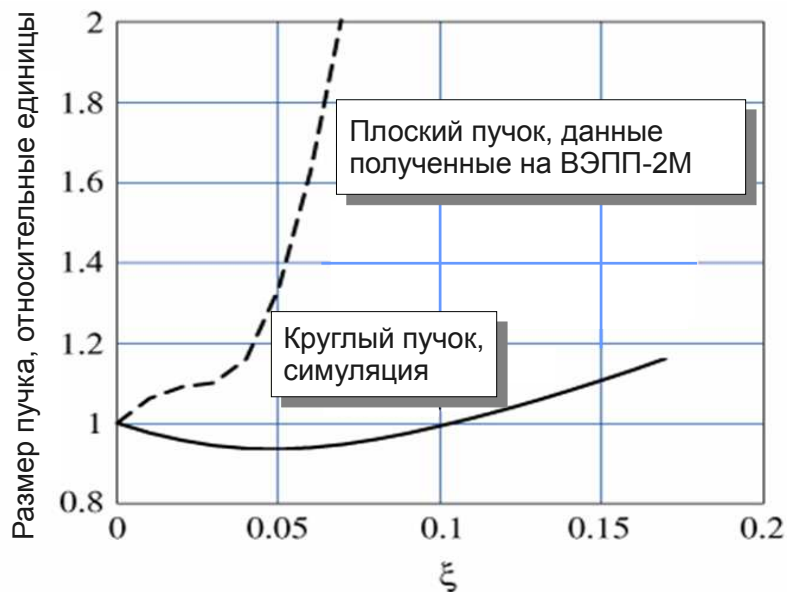


Рис. 1.1. Зависимость размера пучка от параметра ξ .

1 В работе [20] были проведены расчеты для оптики ВЭПП-2000 и в "сильно-сильном"
 2 случае. Как показано на рисунке 1.2 пучки остаются круглыми вплоть до значений па-
 3 раметра $\xi = 0.16$, а рост поперечных размеров незначителен. Рост светимости линейный
 4 до $\xi = 0.1$ и слабо насыщается выше.

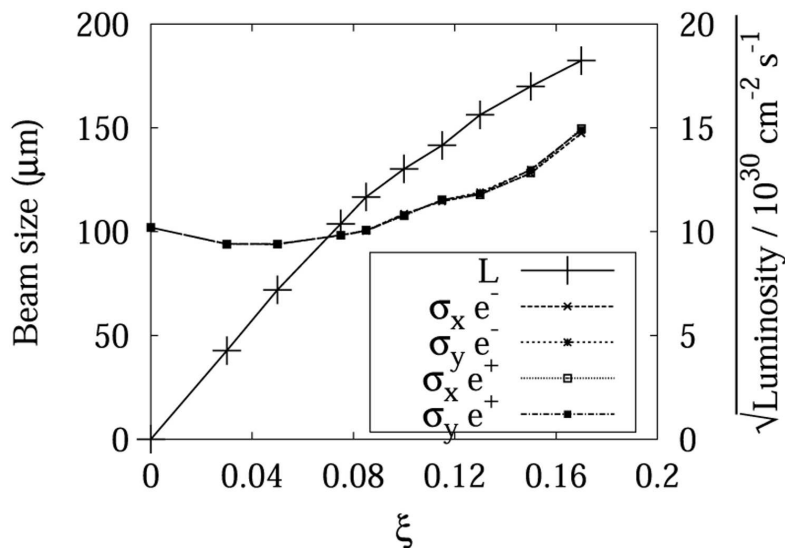


Рис. 1.2. Размеры пучков и светимость ВЭПП-2000 в зависимости от параметра ξ .

1.2. Описание коллайдера ВЭПП-2000

Итак, для получения круглых пучков необходимо соблюсти следующие условия:

1. Равные бета-функции в месте встречи: $\beta_x = \beta_z = \beta^*$.
2. Равные эмиттансы: $\varepsilon_x = \varepsilon_z = \varepsilon$.
3. Равные бетатронные частоты: $\nu_x = \nu_z = \nu$.

Так как ВЭПП-2000 имеет два места встречи, для взаимной компенсации сдвига бетатронных частот от встречного пучка эти частоты должны быть по возможности максимально приближены к целому резонансу. Другим важным параметром коллайдера являются его дисперсионные свойства. В промежутке встречи дисперсия должна быть равна нулю, для минимизации влияния синхротронного движения на эффекты встречи. Нулевую дисперсию так же важно иметь в инжекционном и резонаторном промежутках.

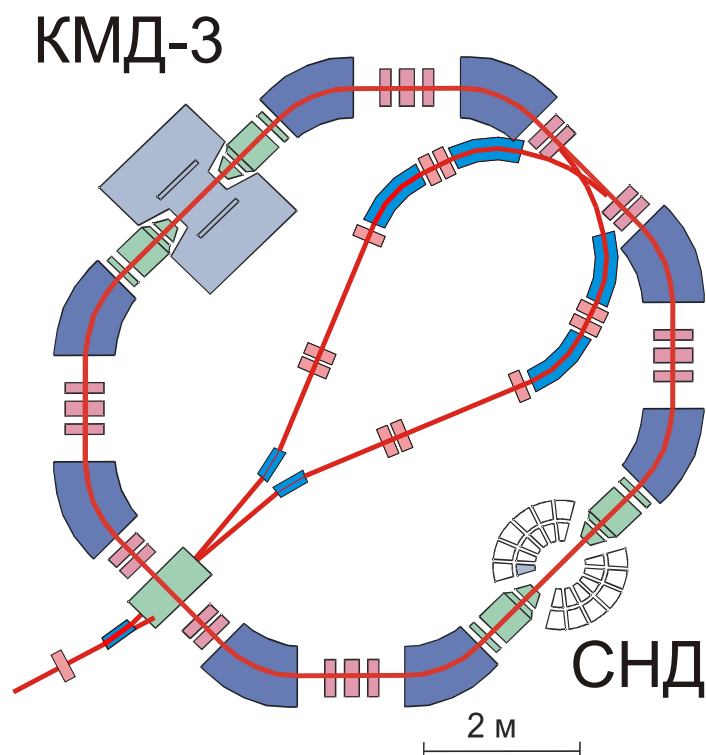


Рис. 1.3. Схема накопителя ВЭПП-2000.

Электронно-оптическая схема накопителя ВЭПП-2000 изображена на рисунке 1.3. Периметр кольца составляет 24.38 метра. Это максимальная длина, которую удалось

1 вписать в рамки экспериментального зала при условии достижения поля в поворотных
2 магнитах до 24 кГс.

3 Кольцо накопителя состоит из 4-х ахроматических 90-градусных поворотов, каж-
4 дый из которых содержит два дипольных магнита и триплет квадрупольных линз. Два
5 из 4-х прямолинейных промежутка с нулевой дисперсией предназначены для организации
6 мест встречи пучков и размещения детекторов КМД-3[30] и СНД. Два других использу-
7 ются для инжекции пучков и размещения высокочастотного ускоряющего резонатора с
8 напряжением до 120 кВ, работающего на частоте 172 МГц (14-ая гармоника частоты об-
9 ращения частиц). В инжекционном промежутке установлены импульсные магниты для
10 инжекции электронов и позитронов. Каналы инжекции пучков симметричны относитель-
11 но электронов и позитронов, что позволяет при необходимости легко менять направления
12 их движения в накопителе. Инжекция производится по однооборотной схеме в медианной
13 плоскости. Пластины инфлекторов установлены в двух соседних со впуском дипольных
14 магнитах. Причем, при инжекции электронов одна из них осуществляет предудар накоп-
15 ленного пучка, а вторая "гасит" поперечные импульсы, как впущенного пучка, так и
16 предударенного пучков. При инжекции позитронов пластины меняются ролями.

17 Для подавления хроматизма бетатронных частот используются два семейства сек-
18 ступолей, размещённых в триплетном промежутке.

19 Финальная фокусировка в каждом промежутке встречи организована с помощью
20 сильных соленоидов. Применение соленоидов для структур с круглыми пучками удоб-
21 но из-за их аксиально симметричной фокусировки. Однако поле соленоида B_y вращает
22 плоскость бетатронных колебаний, что приводит к их связи. В общем случае движения
23 частиц с X-Z связью можно показать, что важное для круглых пучков условие сохране-
24 ния момента движения M через оборот частицы будет выполняться, если оборотная 4x4
25 матрица имеет вид матрицы соленоида:

$$T = \begin{bmatrix} A & D \\ -D & C \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

26 Здесь 2x2 матрицы "A" и "C" определяют движение по X и Z направлениям, в то время
27 как матрица "D" "отвечает" за связь колебаний.

28 Легко видеть, что при условии поворота плоскости бетатронных колебаний в каж-
29 дом соленоиде на 45° градусов ($\int_0^l B_y ds = \pi BR$; где B - магнитное поле в поворотных
30 магнитах) можно сделать блок "D" равным нулю в нескольких случаях.

- 1 1. Простейшим вариантом включения является случай, когда поворот плоскости коле-
2 баний одним соленоидом компенсируется вторым соленоидом в том же промежутке.
3 При этом плоскости бетатронных колебаний вне экспериментальных промежутков
4 одинаковы в обоих полукольцах. Хотя этот вариант практически не отличается от
5 обычного режима плоских пучков, он удовлетворяет всем требованиям принципа
6 "круглых" пучков, при работе на основном резонансе связи. Условно этот режим
7 получил название "плоский".
- 8 2. Теперь рассмотрим вариант, когда в одном промежутке, как и в предыдущем слу-
9 чае, соленоиды компенсируют друг-друга, а в другом повороты плоскости бетатрон-
10 ных колебаний складываются. Тогда мы приходим к варианту кольца Мебиуса,
11 когда плоские моды колебаний имеют периодичность в два оборота. Собственные
12 однооборотные периодические моды в этом случае являются циркулярными.
- 13 3. В следующем варианте включения соленоидов плоскость бетатронных колебаний
14 поворачивается в одном и том же направлении в обоих промежутках встречи. Ясно,
15 что эти моды циркулярные. Этот вариант условно назван "двойной Мебиус".
- 16 4. Первоначально основным "круглым" вариантом полярности соленоидов рассматри-
17 вался случай, когда вращение на 90° в одном промежутке компенсируется враще-
18 нием на -90° в противоположном. При этом после каждого поворота X и Z моды
19 бетатронных колебаний меняются местами. Вследствие этого эмиттансы обеих мод
20 автоматически выравниваются.

21 Детальная отладка и оптимизация магнитной структуры ВЭПП-2000 проводилась с
22 помощью компьютерной программы "RING"[13]. Программа "RING" развивается в лабо-
23 ратории №11 ИЯФ СО РАН на протяжении многих лет и использовалась при разработке
24 множества проектов как в России, так и в мире [31]. Возможности программы позволяют
25 проводить расчеты оборотных матриц и поиск решений уравнения Хилла как для матриц
26 2×2 , так и для матриц 4×4 (движение со связью). Широкие возможности визуализации
27 делают удобным представление множества параметров структуры. Дополнительно преду-
28 смотрена автоматическая оптимизация структуры по заданным, желаемым параметрам,
29 а так же трекинг частиц с учетом нелинейных элементов и краевых эффектов магнитных
30 элементов.

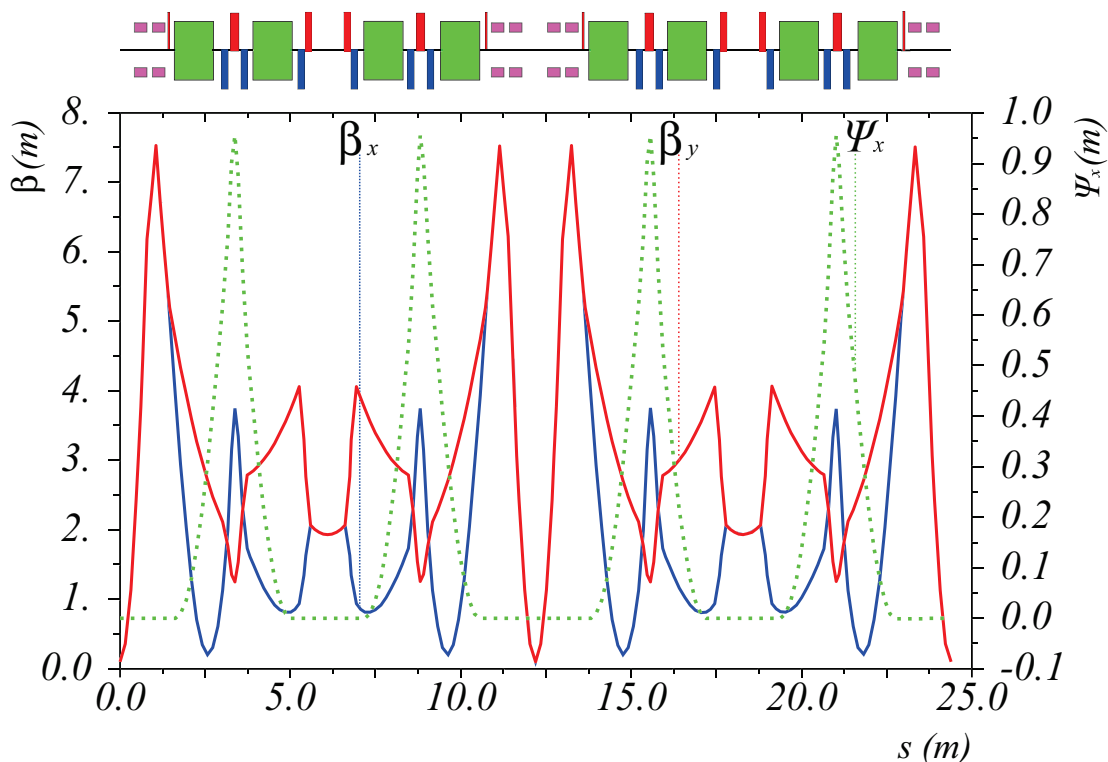


Рис. 1.4. Структурные функции ВЭПП-2000 для варианта с $\beta^* = 10$ см

1 На рисунке 1.4 показаны структурные функции коллайдера при энергии в 1 ГэВ
 2 для случая, когда моды колебаний плоские. В месте встречи $\beta_x^* = \beta_z^* = 10$ см. Бета-функ-
 3 ции достигают максимума (≈ 7.5 м) в соленоидах финального фокуса, расположенных
 4 на расстоянии 48 см от места встречи. Расчетная длина всех элементов соленоида 87.75
 5 см. После соленоидов установлена слабая линза длиной 6 см, необходимая для "расщеп-
 6 ления" бета-функций и согласования их с ахроматической полу-аркой кольца. Каждый
 7 ахромат состоит из двух поворотных магнитов по 45° градусов и триплета квадруполь-
 8 ных линз. Магнитная длина диполей ≈ 109.9 см. В прямолинейных промежутках для
 9 впуска и резонатора установлены еще по два семейства линз. Альфа-функции в центрах
 10 этих промежутков занулены. Длина линз 14 и 19 см. Градиенты магнитного поля во всех
 11 линзах не превышают 5 кГс/см. В таблице А.1 приведена подробная структура установ-
 12 ки.

13 Следует заметить, что для всех перечисленных выше вариантов включения соленоидов
 14 проекции огибающих бетатронных колебаний на плоскости x и z будут одинаковыми.
 15 Однако частоты бетатронных колебаний в этих случаях будут разными. На рисунке 1.5
 16 представлены рабочие точки ВЭПП-2000 для всех вариантов включения соленоидов.

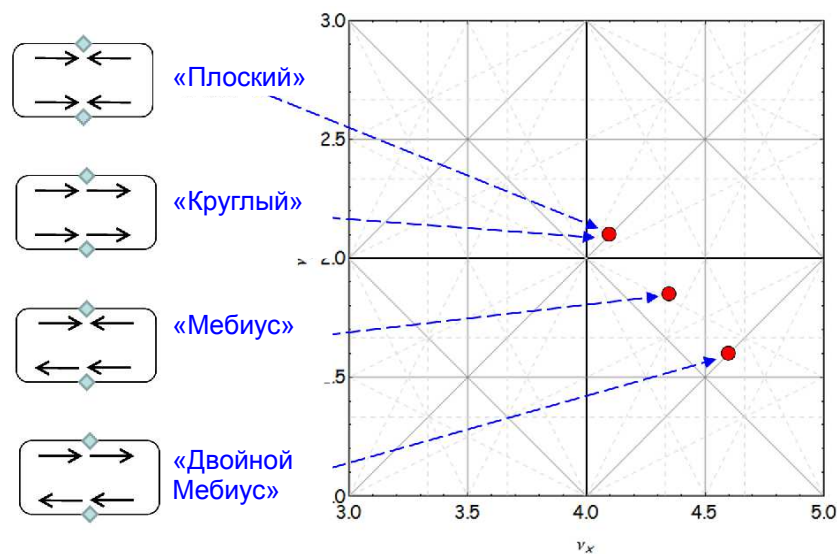


Рис. 1.5. Возможные рабочие точки коллайдера ВЭПП2000 для различных вариантов включения соленоидов.

1 Хотя оптика была посчитана и проанализирована для всех вариантов включения
 2 соленоидов, в течение первых сезонов работы установки использовался в основном "плоский"
 3 вариант оптики. Исследованию других вариантов было уделено существенно меньше
 4 времени, так как:

- 5 • Во-первых, для работы в "круглых" режимах усложняется настройка соленоидов,
 6 потому что требуется выполнение сразу двух условий. С одной стороны, для поворота
 7 плоскости бетатронных колебаний на угол 45° градусов должно выполняться
 8 условие $\int_0^l B_y ds = \pi BR$, где B - магнитное поле в поворотных магнитах. С другой
 9 стороны, фокусирующая сила соленоидов $1/F = \left(\frac{eH_l}{pc}\right)^2 \cdot l/2$.
- 10 • Во-вторых, для плоских мод коррекция натурального хроматизма бетатронных частот
 11 осуществляется в кольце ВЭПП-2000 с помощью двух семейств секступолей,
 12 установленных между линзами ахромата, где дисперсия достигает больших значений.
 13 Для компенсации нелинейного возмущения от этих секступолей и, соответственно,
 14 увеличения динамической апертуры в структуре предусмотрено дополнительное
 15 семейство секступолей, установленное в бездисперсионных технических промежутках.
 16 К сожалению, из-за поворота плоскости бетатронных колебаний в разных
 17 полукольцах для "круглых" режимов не удалось найти схему компенсации
 18 натурального хроматизма и нелинейных возмущений.

1 В результате, экспериментальное изучение "круглых" вариантов показало, что ди-
2 намическая апертуры составляет всего $\approx 10 \div 12\sigma$, в то время как в "плоском" варианте
3 она достигает $\approx 20 \div 25\sigma$. Обе этих величины качественно соответствуют расчетным.

4 Для оптимизации светимости структура коллайдера обладает достаточно широким
5 диапазоном возможных настроек. Например, с помощью варьирования параметров линз
6 в прямолинейных промежутках и соленоидов можно достаточно гибко изменять бета-
7 тронные частоты, сохраняя при этом β^* и ахроматичность арок.

8 К сожалению, для структуры ВЭПП-2000 существует одно жесткое ограничение –
9 уменьшение β^* однозначно ведет к возрастанию эмиттанса. Это свойство не позволяет
10 работать с малыми значениями β^* на больших энергиях из-за апертурных ограничений
11 в области финального фокуса. Для энергии $E=1$ ГэВ оптимальное значение бета-функ-
12 ции составляет $\beta^* = 10$ см. Для энергии 600 МэВ и ниже возможно уменьшить этот
13 параметр до 5 см, а для энергий в пределах 200 МэВ и до 2 см. Такая возможность
14 возникает благодаря специальной конструкции фокусирующих соленоидов, обмотки ко-
15 торых секционированы в продольном направлении. За счет этого, когда для получения
16 необходимого интеграла продольного поля не нужна полная длина соленоидов, можно
17 отключать некоторые секции и таким образом эффективно пододвигать фокусировку
18 ближе к месту встречи. Благодаря такой возможности светимость установки в низких
19 и средних областях рабочего диапазона энергий значительно повышается и изменяется
20 по закону $L \sim \gamma^2$, а не $L \sim \gamma^4$, в случае фиксированной β^* . На рисунке 1.6 показана
21 расчетная светимость коллайдера, оптимизированная по величине β^* , в зависимости от
22 энергии столкновений в системе центра масс.

23 Существенной частью магнитной структуры накопительного кольца ВЭПП-2000 яв-
24 ляется сверхпроводящий соленоид детектора КМД-3 с продольным магнитным полем
25 до 1.5 Т. Для компенсации связи бетатронных колебаний, вносимой этим магнитом, ис-
26 пользуются секции фокусирующих соленоидов в промежутке детектора, подключенные
27 специальным образом. Остаточная связь компенсируется с помощью скью-квадруполей.
28 Скью-квадруполи выполнены в виде дополнительных обмоток во всех секступольных
29 магнитах.

30 Система орбитальных коррекций состоит из 20 горизонтальных и 16 вертикальных
31 корректоров. Обмотки горизонтальных корректоров расположены в поворотных магни-
32 тах и в фокусирующих квадруполях, а обмотки вертикальных корректоров в дефокуси-

1 рующих квадрупольных магнитах.

2 Основные расчетные параметры накопителя ВЭПП-2000 представлены в таблице
3 1.1. Фотография современного состояния кольца ВЭПП-2000 представлена на рисунке
4 1.7.

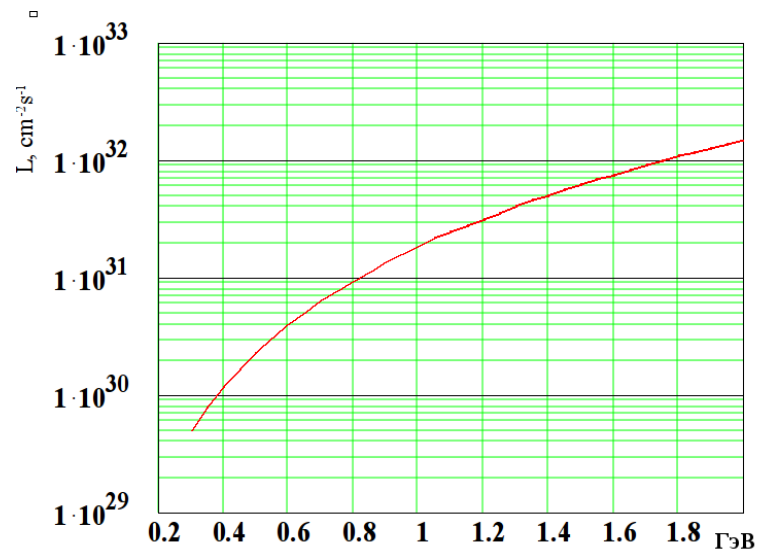


Рис. 1.6. Расчетная светимость коллайдера в зависимости от энергии.

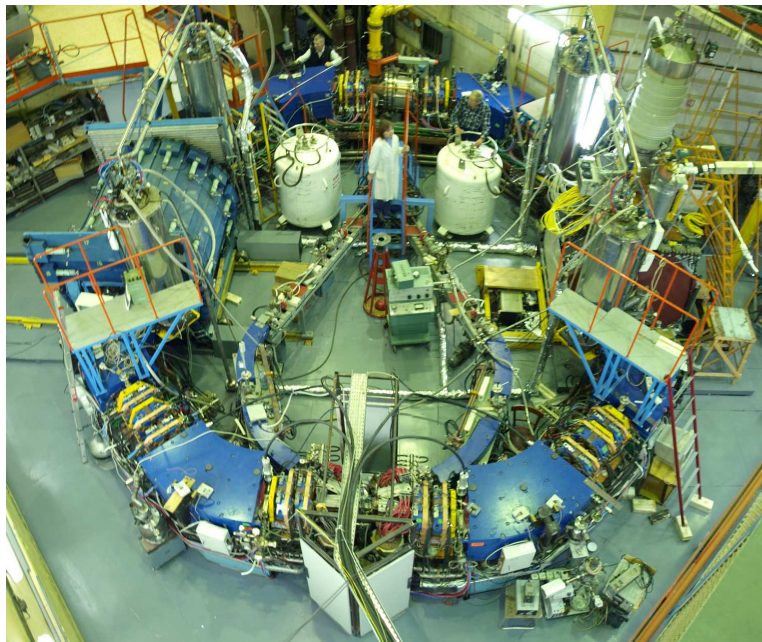


Рис. 1.7. ВЭПП-2000 в 2011 году.

Таблица 1.1. Основные параметры структуры ВЭПП-2000 на энергии 1ГэВ

Периметр	м	24.388
Частота ВЧ	МГц	172.0
Напряжение ВЧ	кВ	120
Номер ВЧ гармоники		14
Коэффициент уплотнения орбит		0.036
Синхротронная частота	кГц	30.73
Эмиттансы ϵ_x, ϵ_z	см·рад	$2.2 \cdot 10^{-5}, 2.2 \cdot 10^{-5}$
Потери энергии на оборот	кэВ	63
Безразмерные декременты затухания $\delta_x, \delta_z, \delta_s$		$3.0 \cdot 10^{-5}$ $3.0 \cdot 10^{-5}$ $6.6 \cdot 10^{-5}$
Энергетический разброс σ_E		$7.0 \cdot 10^{-4}$
Длина сгустка σ_s	см	3.3
β_x в месте встречи	см	10
β_z в месте встречи	см	10
Бетатронные частоты Q_x, Q_z		4.1, 2.1
Число частиц в сгустке		$1 \cdot 10^{11}$
Число сгустков		1
Светимость	см ⁻² сек ⁻¹	$1 \cdot 10^{32}$

Расчет, изготовление и измерения магнитных элементов

2.1. Поворотные магниты

2.1.1. Проект и параметры магнита

Основные параметры поворотного магнита накопительного кольца ВЭПП-2000 определяются рядом жестких требований. Радиус магнита и его ведущее магнитное поле заданы, в первую очередь, необходимой энергией пучка и, как сказано выше, размерами рабочего зала, где размещена установка. После ряда оптимизаций расположения кольца в зале, учитывая, что его площадь $18 \times 12 \text{ м}^2$, был выбран радиус равновесной орбиты $R_m = 140 \text{ см}$, а длина орбиты в 45° магните $L = 109.95 \text{ см}$. Соответственно, поле необходимое для достижения энергии 1 ГэВ: $H_z = 23.82 \text{ кГс}$.

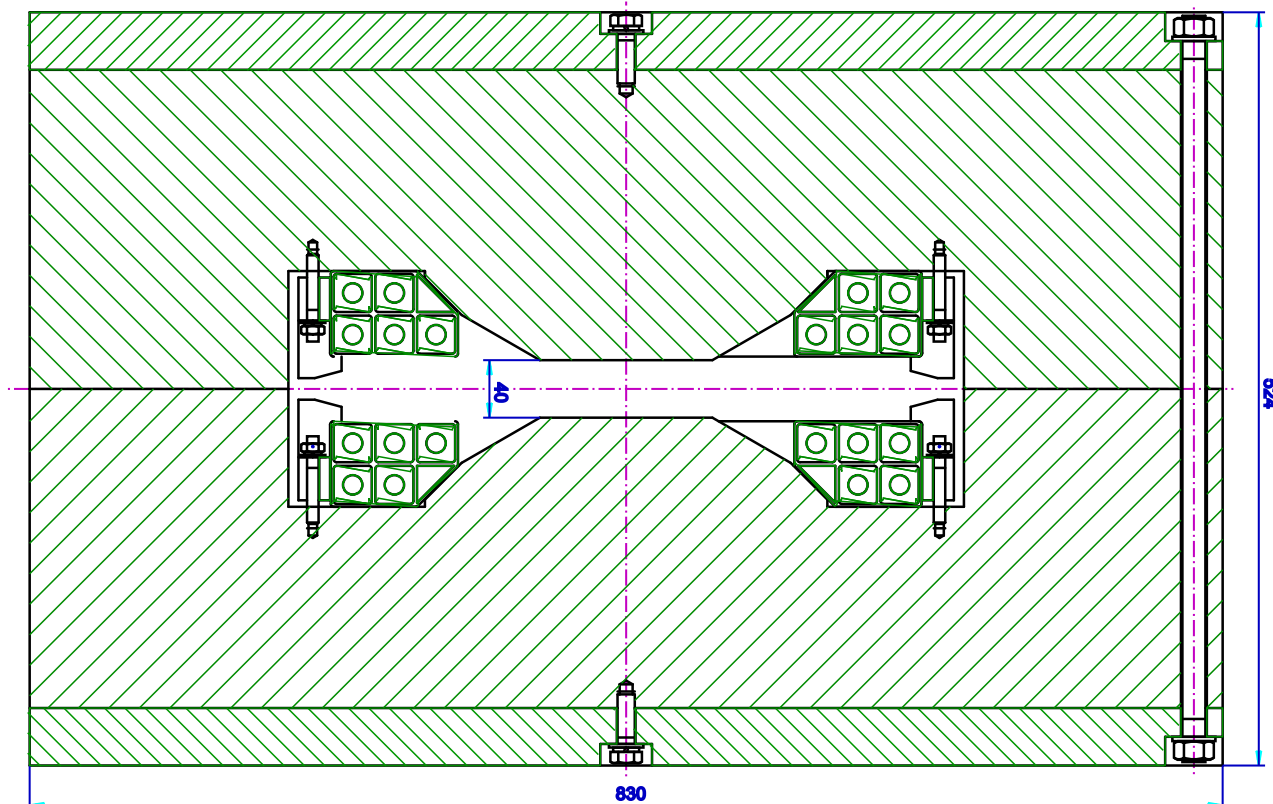


Рис. 2.1. Поперечное сечение поворотного магнита ВЭПП-2000.

1 Минимальная величина межполюсного зазора магнита на ВЭПП-2000 определяется
 2 вертикальным размером пучка. При эмиттансе $\varepsilon_z = 2.2 \cdot 10^{-5}$ максимальный размер пучка
 3 в магнитах $\sigma_z \simeq 1.1$ мм (на краю экспериментальных промежутков). Таким образом,
 4 чтобы не ограничивать время жизни пучка, величина зазора выбрана равной 40 мм, что
 5 примерно 20 раз превышает размер пучка. Для уменьшения влияния нелинейностей на
 6 динамику пучка относительная однородность поля должна быть 10^{-4} в области ± 20 мм
 7 от равновесной орбиты, как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении, для
 8 всего рабочего диапазона энергий.

9 Как и на ВЭПП-2М, была выбрана схема подключения, при которой все магниты
 10 соединены последовательно. Для этого был разработан источник питания, позволяющий
 11 получать ток до 10 кА и напряжение до 120 В (см. главу 3). В качестве шин питания
 12 выбрана медная водоохлаждаемая шина, имеющая в поперечном сечении квадратную
 13 форму со стороной 26.5 мм. Полная площадь сечения меди ≈ 560 мм². Учитывая все
 14 перечисленные параметры, получаем, что максимальное допустимое количество витков
 15 в магните 10 (по 5 на каждую половину). Так как для стабильного режима работы ис-
 16 точника рекомендуется отступить на 10% от предельных значений, то проектное поле
 17 должно достигаться при токе ≈ 9.0 кА.

Таблица 2.1. Основные характеристики дипольных магнитов ВЭПП-2000.

Угол поворота	45°
Радиус поворота	140 см
Магнитная длина	109.5 см
Зазор между полюсами	40 мм
Максимальное поле	24.5кГс
Максимальный ток в обмотках	10 кА
Неоднородность поля (4 × 4) см	≤ 0.0001
Вес	4000 кг

18 Чтобы добиться необходимых параметров магнита, на первоначальном этапе проек-
 19 тирования проводилось компьютерное моделирование, как двухмерного распределения
 20 магнитного поля в поперечном сечении магнита, так и трехмерного. Форма полюса и
 21 размеры ярма оптимизировались таким образом, чтобы получить максимальное поле

1 при заданном значении тока в обмотках и при этом получить необходимую однородность
 2 поля. В трехмерных расчетах основное внимание уделялось определению оптимальной
 3 формы торцевых фасок для минимизации зависимости эффективной магнитной длины
 4 от уровня поля. Все расчеты проводились в программе "Mermaid"[14].

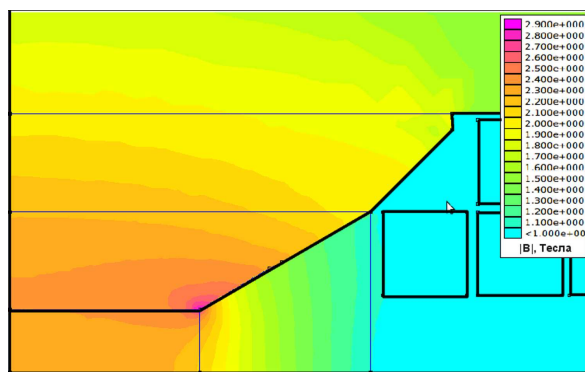


Рис. 2.2. Распределения магнитной индукции в области полюса.

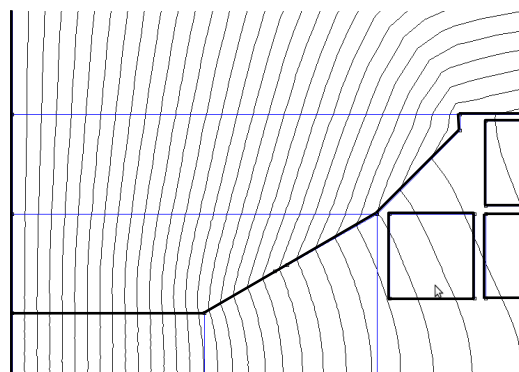


Рис. 2.3. Поток магнитного поля в области полюса.

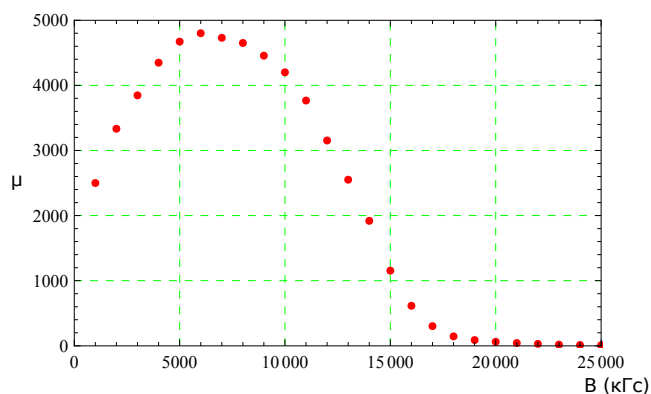


Рис. 2.4. Зависимость магнитной проницаемости от магнитной индукции для стали "Армко".

5 Финальный вариант полюса в поперечном сечении имеет следующую форму: го-
 6 ризонтальная часть ± 6 см, фаска шириной 6 см с углом 30° к медианной плоскости и
 7 фаска шириной 3 см с углом 45° . Такая форма полюса концентрирует магнитный по-
 8 ток и позволяет минимизировать "перенасыщение" железа на максимальной энергии и
 9 разместить токовые катушки как можно ближе к орбите. Требуемая однородность поля
 10 при этом обеспечивается во всем рабочем диапазоне. На рисунке 2.2 показано распре-
 11 деление модуля магнитной индукции $|B|$ в области полюса, а на рисунке 2.3 показаны
 12 линии магнитного потока. В качестве материала для моделирования была использована

- 1 магнитно-мягкая сталь "Армко". Предел насыщения такого материала порядка 23 кГс.
- 2 Зависимость относительной магнитной проницаемости "Армко" от магнитной индукции
- 3 $\mu(B)$ показана на рисунке 2.4.

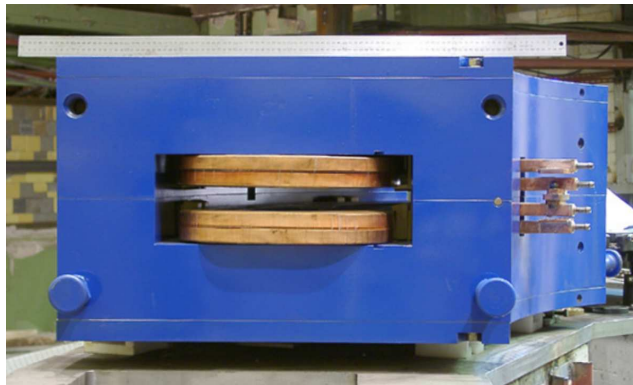


Рис. 2.5. Общий вид магнита.



Рис. 2.6. Половина магнита с вакуумной камерой.

4 Размеры ярма подбирались так, чтобы величина магнитной индукции в нем не пре-
 5 вышала 12 кГс. Общий размер магнита более 80 см в ширину и более 60 см в высоту
 6 (см. рисунок 2.1). Вес – более 4 тонн. Фотография магнита представлена на рисунке 2.5:
 7 магнит установлен на свое место в кольце, но токоподводящие шины еще не подключе-
 8 ны. На рисунке 2.6 показана нижняя половина магнита вместе с катушками и вакуумной
 9 камерой. Катушки сдвинуты в вертикальном направлении относительно медианной плос-
 10 кости на 22 мм и имеют вывод через центр магнита, для чего в ярме в этом месте сделан
 11 соответствующий паз. С другой стороны ярма выбран еще один паз для вывода синхро-
 12 тронного излучения. Пунктирные линии на рисунке 2.6 условно показывают лучи света
 13 электронов и позитронов, которые используются для диагностики пучков.

1 2.1.2. Магнитные измерения поворотных магнитов ВЭПП-2000

2 К осени 2002 года магниты были изготовлены. Единственным доступным источни-
3 ком питания, способным развить ток 10 кА, был "старый" выпрямитель бустерного
4 накопителя БЭП. В зале БЭП был организован временный стенд магнитных измерений.
5 На подготовку стенда к работе и проведение измерений восьми магнитов было потрачено
6 около полугода.

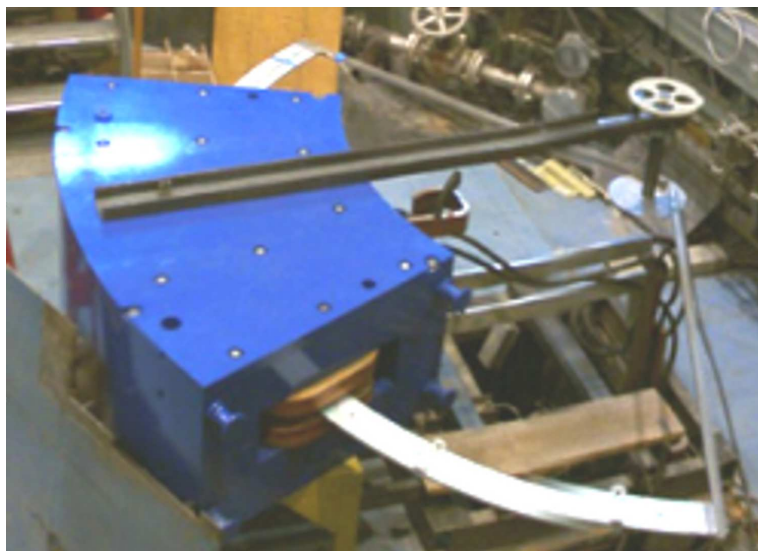


Рис. 2.7. Общий вид стенда магнитных измерений

7 В ходе измерений изучалось распределение вертикального магнитного поля в меди-
8 анной плоскости магнита в зависимости от силы тока в обмотках. Для измерений исполь-
9 зовались одиннадцать датчиков Холла, размещенных в линию на специальной каретке.
10 Расстояние между датчиками составляло 1 см. Каретка располагалась так, чтобы линия
11 датчиков Холла была строго по радиусу магнита, а центральный датчик находился на
12 радиусе расчетной орбиты. С помощью специального дугообразного крепления (радиус
13 дуги крепления равен радиусу магнита) каретка с датчиками перемещалась вдоль маг-
14 нита. С помощью жестких штанг центры дугообразного крепления и секторного магнита
15 совмещались с точностью ≈ 0.2 мм, гарантируя неизменное радиальное положение дат-
16 чиков относительно магнита при движениях дуги. Перемещение каретки по азимуту осу-
17 ществлялось с помощью шагового двигателя и контролировалось с помощью цифрового
18 угломера. В итоге точность выставки датчиков в горизонтальной плоскости составля-
19 ла ≈ 0.5 мм. Широкий полюс магнита позволял зафиксировать положение каретки по

1 вертикали с точностью до 0.1 мм.

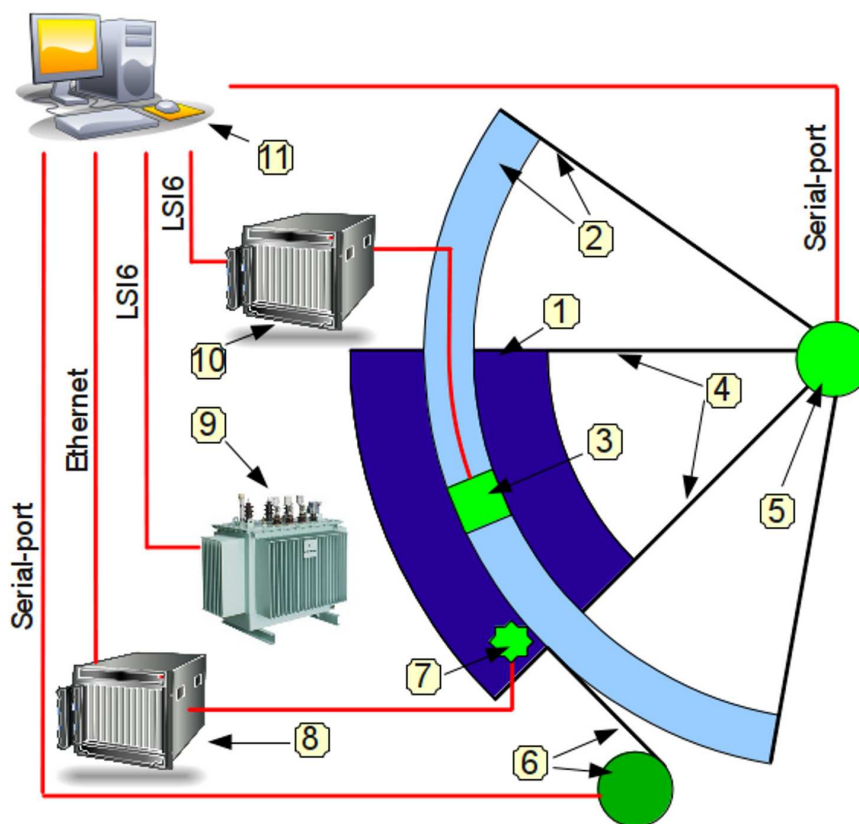


Рис. 2.8. Схема стенда магнитных измерений: 1 – измеряемый магнит; 2 – направляющая подложка; 3 – каретка с датчиками Холла; 4 – жесткие, фиксирующие штанги; 5 – цифровой угломер; 6 – шаговый двигатель, передаточный механизм и тросс натяжения; 7 – датчик ЯМР; 8 – VME-крейт с электроникой для датчиков ЯМР; 9 – источник питания ведущего поля; 10 – КАМАК-крейт с электроникой для датчиков Холла; 11 – управляющий компьютер.

2 Использовавшиеся датчики Холла калибровались с помощью измерения поля по
3 Ядерному Магнитному Резонансу [23]. Были проведены калибровки на нескольких ре-
4 перных значениях магнитного поля с интервалом 1.5 кГц в диапазоне от 0 до 24.5 кГц.
5 Зависимость поля между реперами интерполировалась с помощью кубических сплайнов.
6 В ходе испытаний была так же проверена работоспособность всех датчиков ЯМР, кото-
7 рые позже были установлены в магниты и используются для измерений ведущего поля
8 при работе накопителя.

9 Управление процессом измерений было автоматизировано и осуществлялось с помо-
10 щью программы "Izmer" , запущенной на персональном компьютере, располагавшемся

рядом со стендом. Программа была специально написана для удобного контроля за всеми параметрами (ток в обмотках магнита, калибровка датчиков, управление шаговым двигателем, позиционирование датчиков) и сохранения данных для последующего анализа.

2.1.3. Результаты магнитных измерений

Магнитные измерения показали хорошее совпадение с расчетными параметрами для всех магнитов. Необходимое для работы установки на энергии 1 ГэВ поле было получено при токе источника 9.1 кА. На рисунке 2.9 показана зависимость ведущего поля магнита от тока в обмотках. Сиреневые точки – результаты измерений; красная линия – зависимость, полученная при численном моделировании; синяя точка – плановое рабочее поле при энергии пучка 1 ГэВ.

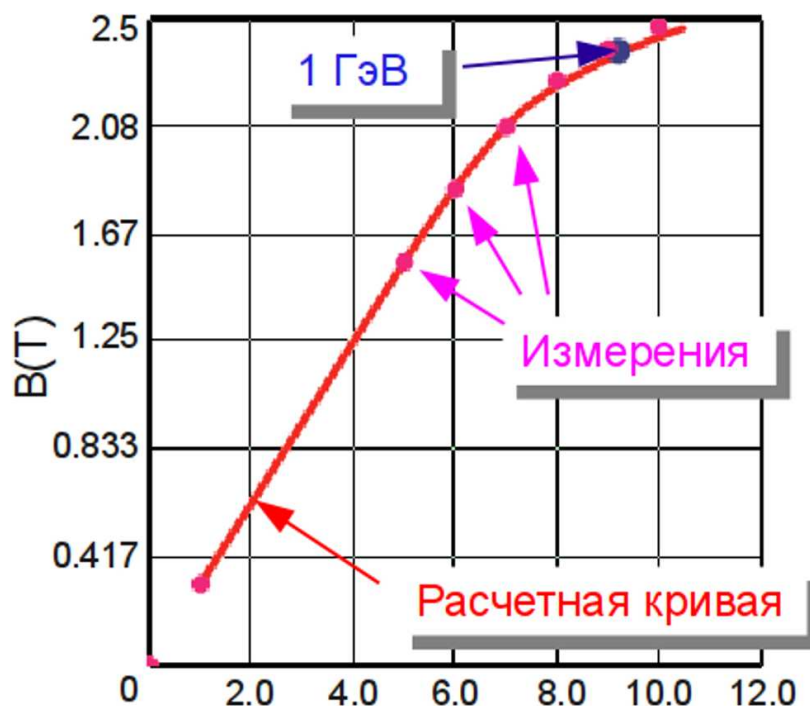


Рис. 2.9. Зависимость величины магнитного поля от тока в обмотках

На рисунке 2.10 в относительных единицах показано поперечное распределение вертикального магнитного поля в медианной плоскости ($B_0 = 12$ кГс). Красная линия показывает результаты численного моделирования, синие точки – результаты измерений. При таком уровне поля железо слабо насыщено, и относительная однородность поля в медианной плоскости составляет $\approx 10^{-4}$ для области ± 1.5 см от орбиты.

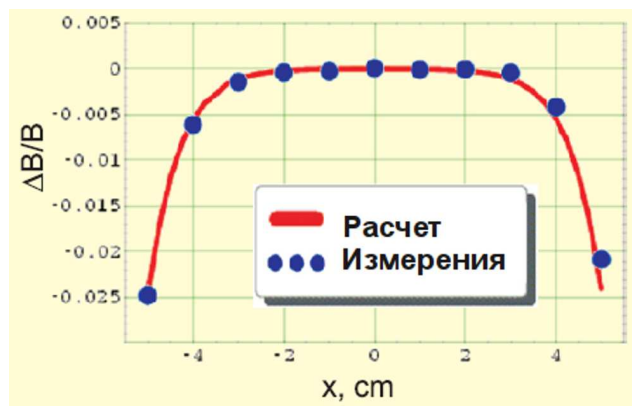


Рис. 2.10. Относительная зависимость ведущего поля от отклонения по радиусу ($B_0 = 12$ кГс).

1 На рисунке представлены аналогичные данные для случая большого поля: $B_0 = 23.8$
 2 кГс. Как видно из графика, однородность поля в этом случае несколько хуже: $\approx 3 \cdot 10^{-4}$,
 3 что, тем не менее, является приемлемым результатом. В связи с сильным насыщением
 4 ярма и тем, что магнит секторный, на орбите возникает небольшой градиент ведущего
 5 магнитного поля с величиной показателя спада $n \approx 0.07$. Это свойство магнита не было
 6 выявлено на стадии моделирования, так как из-за ограничений программы трех-мерные
 7 расчеты проводились для прямого магнита. Позже этот градиент учитывался при расче-
 8 тах структурных функций кольца.

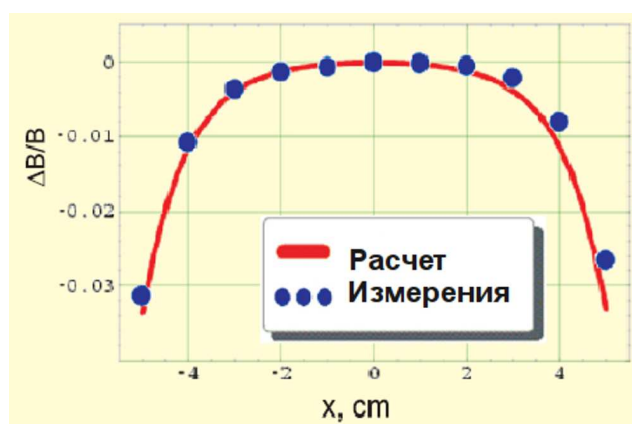


Рис. 2.11. Относительная зависимость ведущего поля от отклонения по радиусу ($B_0 = 12$ кГс).

9 Измерения показали, что отклонение эффективной магнитной длины диполей от
 10 расчетной находится в пределах $\pm 0.2\%$, что является хорошим результатом для магнитов
 11 с рабочим диапазоном полей от 5 до 24 кГс.

2.2. Квадрупольные линзы

Как показано в таблице А.1, в ВЭПП-2000 используется 24 квадрупольные линзы: 4 линзы длиной 19 см (семейство F2), 16 линз длиной 14 см (семейства D1, D2, D3 и F3) и 4 линзы длиной 6 см (семейство F1). Линзы длиной 19 и 14 см имеют одинаковое поперечное сечение, и из них собраны триплеты арок и дублеты технических промежутков. Эти линзы обычно называются "основными". В детекторных промежутках между соленооидами и поворотными магнитами установлены квадрупольные линзы длиной 6 см. Они относительно слабые и используются для согласования структурных функций арок и промежутка встречи.

2.2.1. "Основные" квадрупольные линзы

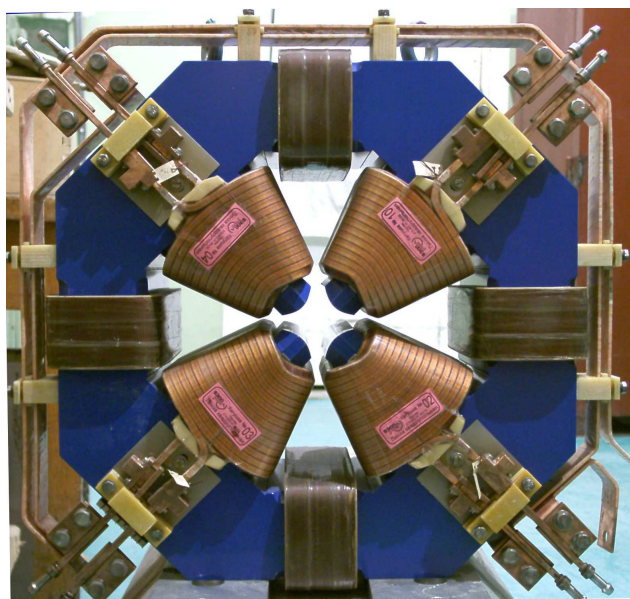


Рис. 2.12. Основная квадрупольная линза ВЭПП-2000.

Из расчетов магнитной структуры следует, что для работы установки на энергии 1 ГэВ необходимо, чтобы основные квадрупольные линзы могли создавать градиент магнитного поля 5 кГс/см. Вписанный радиус линзы выбран равным 20 мм. Для запитки линз используются источники питания ВЧ-300, способные выдавать ток до 300 А, при выходном напряжении 12 В. Опираясь на эти соображения была разработана физическая модель линзы и проведены магнитные расчеты.

Двухмерное распределение поля моделировалось с помощью программы "Mermaid".

1 Шина катушки имеет квадратное поперечное сечение с длиной стороны 8 мм. Чтобы до-
 2 стичь расчетных значений градиента магнитного поля при указанном максимальном токе
 3 требуется 29 витков катушки. По этой причине полюс получился достаточно длинным.
 4 Для уменьшения области предельного насыщения магнитной проницаемости ($\mu \sim 5 \div 10$)
 5 полюс сделан расширяющимся от центра к ярму, что несколько усложнило конструкцию
 6 катушки. Однородность градиента магнитного поля в рабочей области достигается благо-
 7 даря относительно широкому полюсу с гиперболическим профилем. Конечный вариант
 8 поперечного сечения линзы, полученный после ряда оптимизаций, представлен на рисун-
 9 ке 2.13.

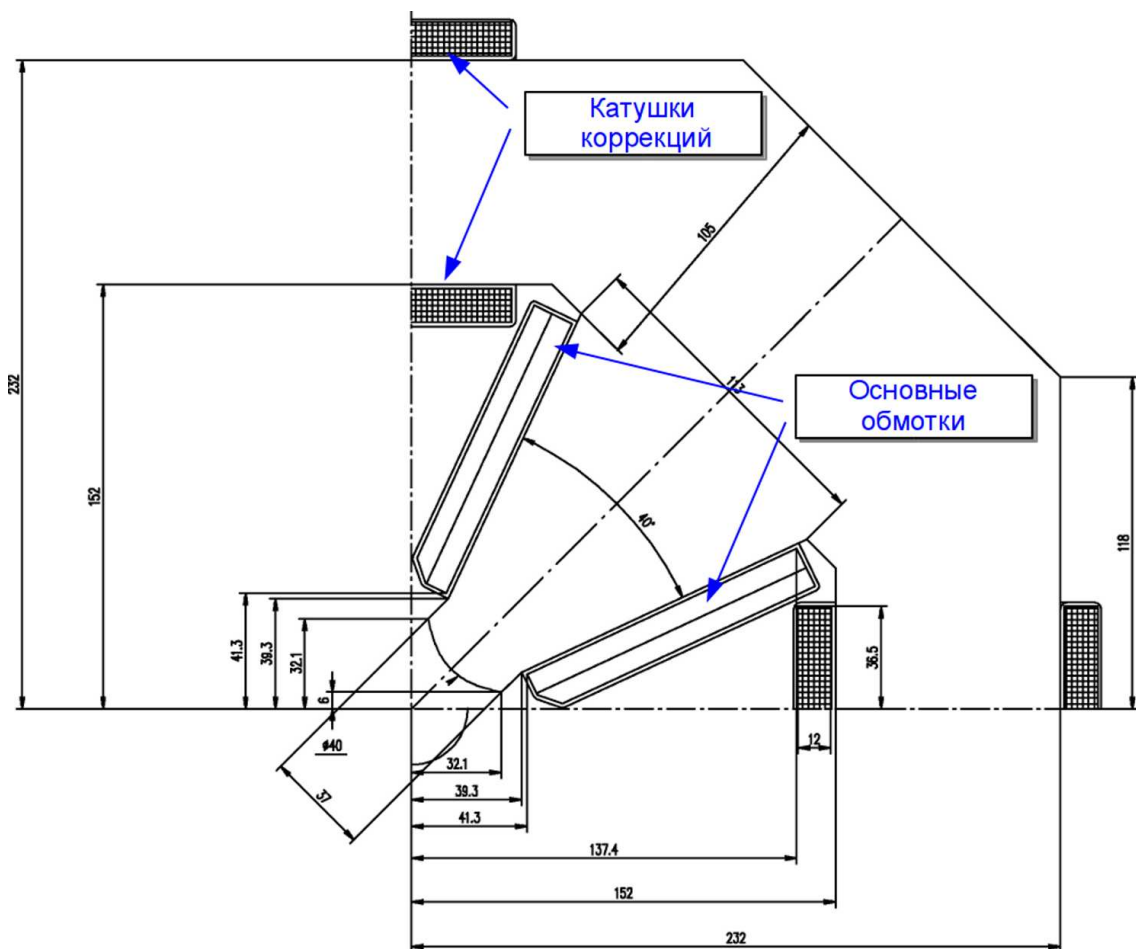


Рис. 2.13. Поперечное сечение основной квадрупольной линзы ВЭПП-2000.

10 Трехмерное моделирование магнитного поля вначале не проводилось. После изго-
 11 товления первых пяти линз на специальном стенде были проведены измерения магнитно-
 12 го поля. Магнитное поле линзы определялось линейкой датчиков Холла. Медная каретка

Таблица 2.2. Характеристики основной квадрупольной линзы ВЭПП-2000.

Градиент поля	5 кГс/см
Магнитная длина	190 мм
Диаметр вписанной окружности	40 мм
Количество витков основной обмотки	29
Номинальный ток	280 А
Напряжение	14.6 В
Мощность потерь	4 кВт
Количество витков обмотки коррекции	400
Номинальный ток обмотки коррекции	4 А

1 с наклеенными на неё семью датчиками перемещалась шаговым двигателем вдоль оси
2 линзы. При этом датчики располагались в горизонтальной плоскости, образуя горизон-
3 тальную линейку, перпендикулярную оси линзы. Положение датчиков на каретке было
4 определено ранее с точностью не хуже 0.01 мм. Для передвижения каретки строго по оси
5 линзы была изготовлена направляющая в виде закрытого жёлоба, которая закреплялась
6 на полюсах линзы. Таким образом, в результате измерений можно было получить зави-
7 симость вертикальной компоненты магнитного поля B_z от горизонтальной координаты
8 x для любого значения продольной координаты s .

9 Как и для измерения дипольных магнитов, датчики Холла были предварительно от-
10 калиброваны в дипольном магните с однородным вертикальным полем с помощью ЯМР
11 датчика. Кроме того, перед каждой серией измерений определялись значения тока дат-
12 чиков Холла при нулевом магнитном поле в пермалловом экране. Данные калибровки,
13 а также "нули" датчиков в виде файлов использовались программой "HALL" , которая
14 управляла источником тока, питающим линзу, шаговым двигателем и обрабатывала дан-
15 ные с датчиков Холла. Для каждой линзы было проведено несколько измерений для
16 различных величин питающего тока. Значения полей семи датчиков с шагом по продоль-
17 ной оси 5 мм записывались в файл для дальнейшей обработки. Примером обработанного
18 файла может служить рисунок 2.14.

19 В таблице 2.3 приведены измеренные интегральные значения градиентов линз G.

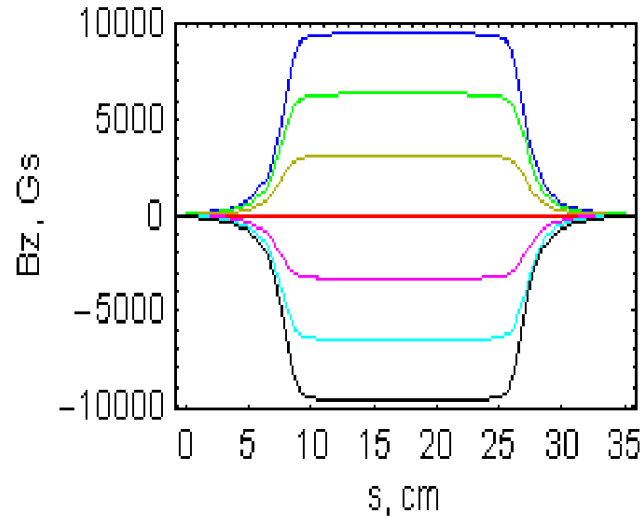


Рис. 2.14. Продольное распределение магнитного поля в основной линзе ВЭПП-2000 для нескольких значений отклонения в поперечной плоскости. Ток в обмотках 280 А.

Таблица 2.3. Измеренные интегральные значения градиентов линз и додекапольных поправок.

Номер линзы	$\int G ds, \text{ кГс}$	$\int P_{12} ds, \text{ кГс/см}^4$
00	95.84	-0.123 ± 0.005
02	95.31	-0.115 ± 0.005
03	95.95	-0.094 ± 0.005
04	95.35	-0.104 ± 0.005
05	95.61	-0.102 ± 0.005

1 Из данных измерений следует, что для получения расчетного интеграла поля в линзе
 2 необходим несколько более высокий градиент, чем предполагалось. При длине линзы 190
 3 мм, на энергии 1 ГэВ необходимый интеграл градиента $\int G_z \cdot ds$ составляет 98.8 кГс, что
 4 дает значение градиента 5.2 кГс/см. В таблице 2.3 даны также коэффициенты мульти-
 5 польного разложения (P_{12}) магнитного поля при пятой степени координаты x , которые
 6 дают наибольшее отклонение зависимости интеграла поля от линейной. Это связано с
 7 четырёхкратной симметрией линзы, подавляющей меньшие порядки.

8 Другим выводом, сделанным после предварительных магнитных измерений, была
 9 необходимость доработки краев полюсов. В ходе конструирования для более тесного при-

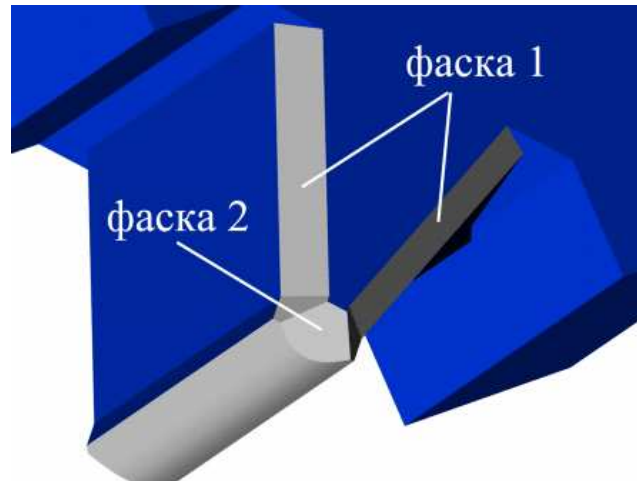


Рис. 2.15. Трехмерное изображение полюса линзы с фасками.

1 легания обмоток с полюса были сняты "боковые" фаски шириной 1 см (фаска 1 на ри-
 2 сунке 2.15). Этот факт обусловил относительно большое значение додекапольной нели-
 3 нейности из-за эффективного заужения полюса на краях.

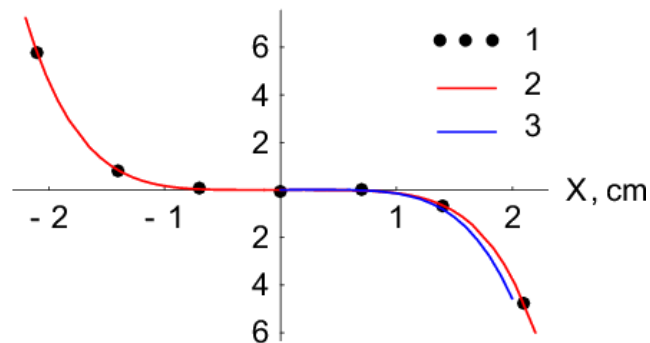


Рис. 2.16. Нелинейная поправка поперечного распределения поля: 1,2 - измерения, 3 - моделирование.

4 На рисунке 2.16 изображена зависимость отклонения магнитного поля от линей-
 5 ного для одной из линз. Для анализа эффекта в программе MERMAID была создана
 6 трехмерная модель линзы с фасками. Расчёты делались для четверти линзы с заданными
 7 краевыми условиями, предполагая идеальную четырёхкратную симметрию. 45-градусная
 8 фаска аппроксимировалась ступеньками, вследствие чего эффективно фаска получилась
 9 большего размера. Это приводит к немного меньшим значениям интеграла градиента и
 10 несколько большему значению нелинейности.

11 Для уменьшения значения нелинейности было предложено доработать линзу сняти-

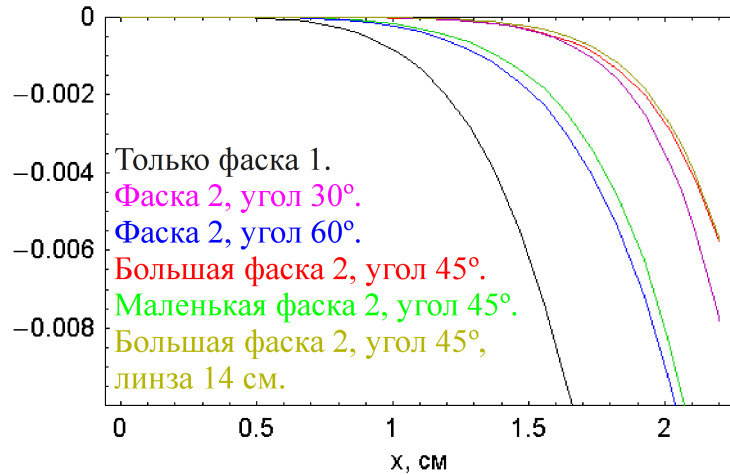


Рис. 2.17. Относительный вклад нелинейных компонентов в продольном интеграле поля для различных типов фасок.

1 ем дополнительной фаски (фаска 2 на рисунке 2.15). Значительное время было уделено
2 расчётам качества магнитного поля для различных вариантов новой фаски. На рисунке
3 2.17 показан относительный вклад нелинейности в продольный интеграл магнитного по-
4 ля в линзе ($(\int B_z(x) ds - \int G \cdot x ds) / \int G \cdot 2 ds$) для различных типов фаски. Выбранный
5 вариант позволил подавить нелинейные поправки примерно в 10 раз. Стоит отметить,
6 что новая фаска дополнительно уменьшает эффективную длину линзы. Компенсировать
7 этот эффект приходится за счет увеличения тока в обмотках линзы. Расчеты показали,
8 что для обеспечения указанного выше интеграла градиента значение тока должно рав-
9 няться $I \approx 350A$.

10 Учитывая все соображения, указанные выше, в конструкцию квадрупольных линз
11 были внесены изменения. После изготовления всех линз были проведены повторные маг-
12 нитные измерения. Целью этих измерений была проверка идентичности и калибровка
13 линз.

14 2.2.2. "Расщепляющие" линзы

15 Короткие квадрупольные линзы ($L = 6$ см) рассчитаны на градиент магнитного поля
16 до 1 кГс/см и запитываются от источников тока УМ-6. Основная задача этих линз в
17 магнитной структуре – произвести "расщепление" β_x, β_z -функций (одинаковых в проме-
18 жутке встречи) для гладкого их согласования с аркой кольца.

1 2.3. Элементы коррекций

2 2.3.1. Секступоли

3 В кольце ВЭПП-2000 используется три семейства секступолей. Все они имеют одина-
 4 ковое поперечное сечение. Хроматизм бетатронной частоты при высокой интенсивности
 5 циркулирующего в накопителе пучка является причиной коллективной неустойчивости
 6 – "голова-хвост". Кроме того, из-за связи поперечных и продольной степеней свободы за
 7 счет хроматизма возникают синхробетатронные резонансы, влияющие на эффекты взаи-
 8 модействия встречных пучков. Для подавления этих эффектов задействованы секступо-
 9 ли семейства S_x ($L = 54$ мм) и S_z ($L = 91$ мм), расположенные в триплетах ахроматов,
 10 где ψ -функция достигает большой величины. Максимальный градиент магнитного поля
 11 $P_6 = 2$ кГс/см².

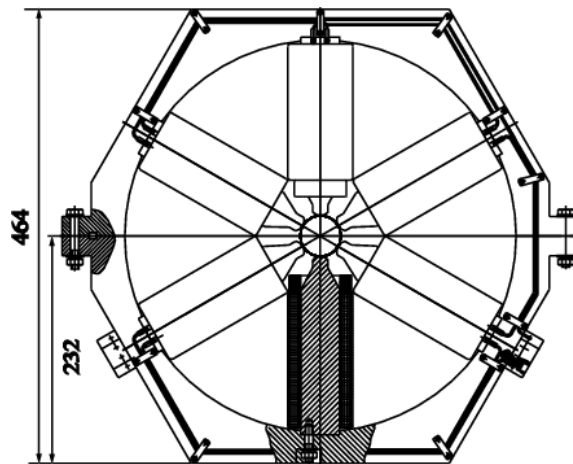


Рис. 2.18. Поперечное сечение секступольной линзы ВЭПП-2000.

12 С другой стороны, секступоли, являясь нелинейными по отклонению от равновесной
 13 орбиты элементами, оказывают сильное влияние на поперечную динамику частиц в нако-
 14 пителе, приводя к появлению нелинейных резонансов и уменьшению области устойчивого
 15 движения частиц – динамической апертуры. Малая динамическая апертура сказывается
 16 на эффективности захвата инжектируемых в накопитель частиц, времени жизни пучков
 17 и, как следствие, приводит к увеличению вредного фона на детекторах.

18 Для компенсации нелинейностей от основных секступолей используется третье се-
 19 мейство S_d ($L = 54$ мм). Эти секступоли расположены в промежутках инжекции и
 20 промежутке резонатора, где дисперсия занулена. Согласно результатам моделирования

1 применение дополнительного семейства секступольных корректоров позволяет получить
 2 приемлемую динамическую апертуру ($\approx 15 \cdot \sigma_x$ для частиц с отклонением по энергии в
 3 диапазоне $\delta p = 0 \div 12\sigma_E$).

4 2.3.2. Скью-квадрупольные коррекции

5 Магнитное поле в идеальном секступоле равно $B_z(x, z) = P_6 \cdot (x^2 - z^2)/2$. Если рав-
 6 новесная орбита проходит не по оси линзы $z \rightarrow z + z_0$, на частицы действует скью-квад-
 7 рупольный градиент: $-P_6 \cdot z_0$. В Sz секступолях ВЭПП-2000 градиент составляет $P_6 = 1.7$
 8 кГс/см², тогда для искажения орбиты в 1 мм скью-квадрупольный градиент будет равен
 9 $G = P_6 \cdot z_0 = 170$ Гс/см. При случайных отклонениях равновесной орбиты это может
 10 приводить к расщеплению частот до $\Delta\nu \approx 0.02$. Другими источниками связи X и Z бе-
 11 татронных колебаний могут являться наклоны квадрупольных линз и недокомпенсация
 12 соленоидальных элементов.

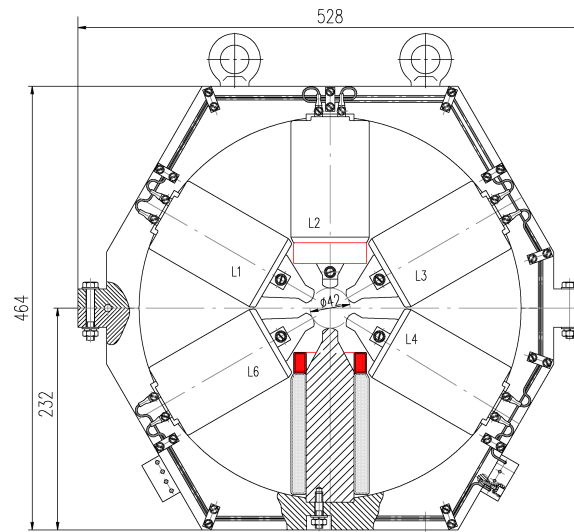


Рис. 2.19. Дополнительные обмотки для создания скью-градиента.

13 Как обсуждалось в главе 2, для компенсации связи в структуре ВЭПП-2000 преду-
 14 смотрены скью-квадрупольные коррекции. Они выполнены в виде дополнительных обмо-
 15 ток на двух из шести полюсов секступолей накопителя (см. рис. 2.19). Силы коррекций
 16 $G = 50$ Гс/см рассчитаны на то, чтобы иметь возможность компенсировать расщепление
 17 частот $\Delta\nu \approx 0.02$. Сделать коррекции с большим запасом по градиенту было проблема-
 18 тично в силу ограниченного пространства для обмотки.

1 2.3.3. Дипольные коррекции в поворотных магнитах

2 В поворотных магнитах предусмотрены обмотки, позволяющие корректировать ос-
 3 новное поле на величину ± 120 Гс. Обмотка – это 60 витков с током до 4 А, что на
 4 максимальной энергии коллайдера составит $\sim 0.5\%$ от тока основных обмоток магни-
 5 та. В качестве источников питания для коррекций в дипольных магнитах используются
 6 слаботочные источники УМ-6.

7 2.3.4. Дипольные коррекции в квадрупольных линзах

8 Плотная расстановка основных элементов накопительного кольца ВЭПП-2000 ис-
 9 ключает возможность размещения дипольных корректоров в виде отдельных элементов.
 10 Поэтому для компенсации неточностей выставки и для управления равновесной орбитой
 11 дипольные коррекции выполнены в виде дополнительных обмоток во всех квадруполь-
 12 ных линзах (см. рисунок 2.13). В линзах F1 корректирующие обмотки предусмотрены
 13 по обоим направлениям (F1x, F1z) для компенсации искажения орбиты, создаваемого
 14 сверхпроводящими соленоидами из-за неточности их выставки. Во всех дефокусирую-
 15 щих линзах (D1z, D2z, D3z) располагаются коррекции вертикальных искажений орбиты,
 16 а в фокусирующих линзах (F2x, F3x) – горизонтальных. Каждая обмотка имеет 400 вит-
 17 ков и рассчитана на ток до 4 А. Питание катушек осуществляется с помощью источников
 18 стабилизированного тока УМ-6.

19 В таблице 2.4 приведены расчеты возникающих искажений равновесной орбиты и
 20 необходимые поля компенсирующих их корректоров для смещения основных элементов
 21 по горизонтали на 0.2 мм (для D3 – по вертикали). Расчет сделан для максимальной
 22 энергии коллайдера $E = 1.0$ ГэВ. В скобках указан элемент, в котором расположен кор-
 23 ректор.

24 Очевидно, что магнитное поле выполненных таким образом коррекций не может
 25 быть идеальным. При величине дипольной составляющей $B_z = 0.53$ кГс секступольный
 26 градиент магнитного поля составляет $P_6 = 0.2$ кГс/см². В то же время секступольный
 27 градиент самых сильных секступольных линз ВЭПП-2000 Sz равен $P_6 = 1.7$ кГс/см² при
 28 длине 9 см. Таким образом, при длине линз семейства F2 19 см дипольные коррекции
 29 в них могут заметно влиять на нелинейную динамику в кольце. В связи с этим фактом
 30 возникает необходимость заботиться о минимизации токов дипольных корректоров. На

Таблица 2.4. Искажения орбиты и необходимая сила корректоров в квадрупольных линзах.

Элемент	Искажение орбиты	Поле компенсирующего корректора
Соленоид S1, $L = 52$ см, $B_s = 118$ кГс	3 мм	$B_z = 150$ Гс, $B_x = 100$ Гс (F1)
Линза F2, $L = 19$ см, $G = 5.2$ кГс/см	3.8 мм	$B_z = 100$ Гс (F2)
Линза D3, $L = 14$ см, $G = -4.2$ кГс/см	2.2 мм	$B_x = 90$ Гс (D3)
Линза F1, $L = 6$ см, $G = 1.2$ кГс/см	0.4 мм	$B_z = 20$ Гс (F1)

- 1 рисунке 2.20 представлен относительный вклад секstupольной составляющей в продоль-
- 2 ный интеграл магнитного поля в зависимости от отклонения в горизонтальной плоскости.

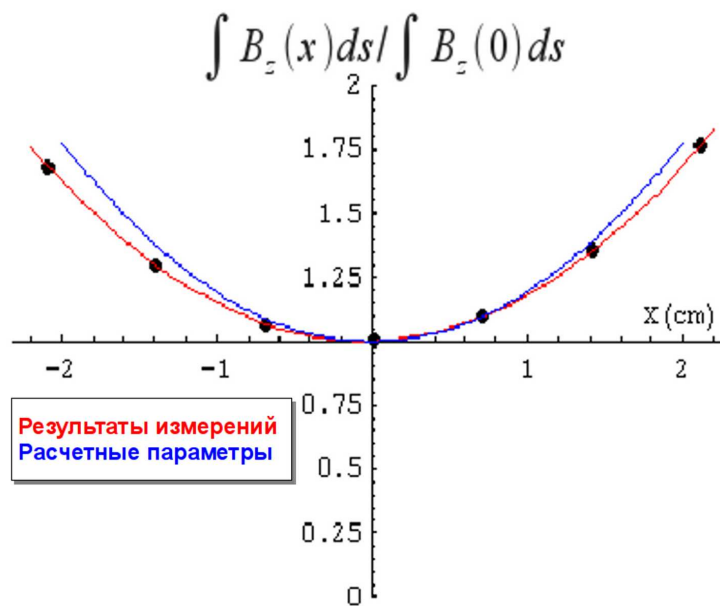


Рис. 2.20. Секstupольная составляющая в дипольной коррекции квадрупольных линз.

1 2.4. Сверхпроводящие соленоиды

2 Как было подробно рассказано в главе 1, при применении принципа "круглых"
 3 пучков соленоиды являются важнейшими элементами магнитной структуры коллайде-
 4 ра. Сверхпроводящие соленоиды, используемые на ВЭПП-2000, являются и самыми
 5 технически сложными магнитными элементами установки, потребовавшими для своего
 6 создания участия сразу нескольких лабораторий ИЯФ.

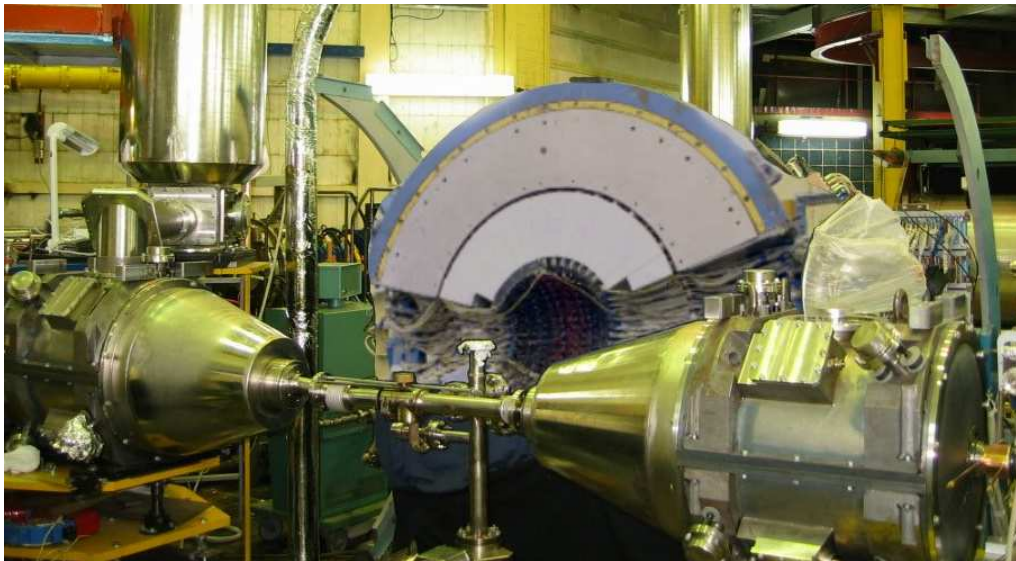


Рис. 2.21. Соленоиды 1S и 4S и детектор СНД.

7 2.4.1. Параметры и конструкция

8 Соленоид ВЭПП-2000 разделен в продольном направлении на три катушки – две
 9 из них имеют длину 250 мм и рассчитаны на поле до 13 Т. Третья имеет длину 140 мм
 10 и рассчитана на поле до 8 Т. Каждая из длинных катушек в свою очередь секциониро-
 11 вана по радиусу на пять частей. Две внутренних секции намотаны многоволоконным
 12 проводом Nb_3Sn диаметром 1.24 мм. Волокна помещены в медную матрицу, с коэффици-
 13 ентом заполнения Nb_3Sn/Cu – 80%. Третья секция так же намотана проводом Nb_3Sn , но
 14 коэффициент Nb_3Sn/Cu – 50%. Две внешних секции намотаны проводом $Nb-Ti$ диамет-
 15 ром 1.26 и 0.92 мм. Этот провод так же помещен в медную матрицу с коэффициентами
 16 $NbTi/Cu$ – 52% и 43% соответственно. Конструктивно катушка из $Nb-Ti$ провода сдела-
 17 на в виде отдельного соленоида и надевается на катушку из Nb_3Sn/Cu . Дополнительная
 18 катушка длиной 140 мм намотана проводом $Nb - Ti$.

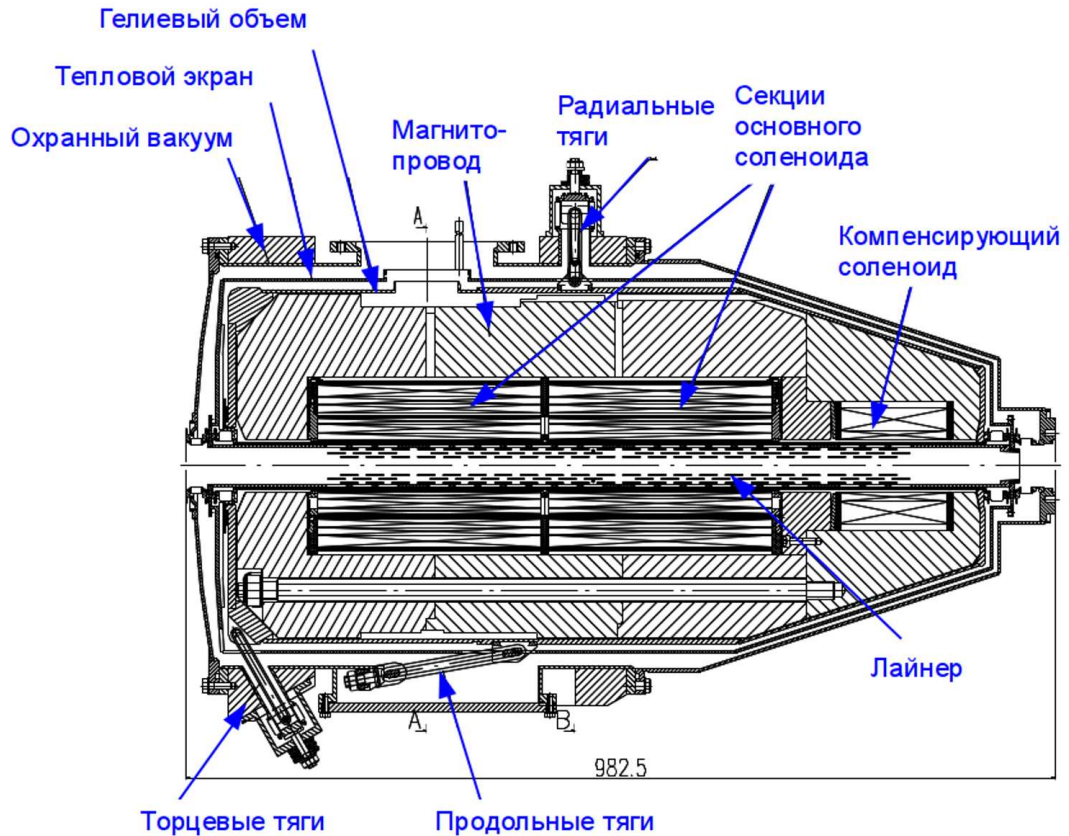


Рис. 2.22. Соленоид в криостате (осевое сечение).

1 Все катушки помещены в единое ярмо магнитопровода. При этом они спроекти-
 2 рованы и изготовлены, чтобы выдерживать расчетные механические напряжения – при
 3 энергии 1 ГэВ (тока в $Nb - Ti$ секциях 216 А , а в Nb_3Sn секциях 158 А) возникает
 4 сжимающее усилие равное 59 т между пятисекционными соленоидами и отталкивающее
 5 усилие 14 т между компенсирующим и основным соленоидами.

6 Сверхпроводящие соленоиды вместе с ярмом помещаются в гелиевый объем, кото-
 7 рый окружен со всех сторон медным экраном, который, в свою очередь, обернут 10-ю
 8 слоями алюминизированного лавсана и помещен в объем охранного вакуума. Медный
 9 экран принимает на себя излучение от внешних стенок криостата мощностью около 20
 10 Вт. От синхротронного излучения гелиевый объем внутри защищает специальный мед-
 11 ный лайнер, находящийся в основном вакууме накопителя и позволяющий снимать до 60
 12 Вт мощности, что соответствуют расчетным параметрам накопителя при работе на мак-
 13 симальной энергии: $E = 1$ ГэВ, $I^+ = I^- = 200$ мА. Медный экран и лайнер охлаждаются
 14 жидким азотом.

1 Для крепления соленоида используется три типа тяг: три радиальных тяги, опреде-
 2 ляющих поперечную выставку соленоида; четыре тяги, определяющие выставку заднего
 3 торца соленоида; четыре продольных тяги, рассчитанные на противодействие полю детек-
 4 тора КМД-3, который своим полем 1.5 Т притягивает соленоид с усилием 6 т.

5 Основной криостат соединен вакуумированным каналом с дополнительным гелие-
 6 вым дьюаром, имеющим объем 120 литров, что примерно соответствует суточному рас-
 7 ходу гелия. Этот же канал используется для подвода жидкого азота к медному экрану
 8 и сверхпроводящих шин, идущих от тоководов к обмоткам соленоида. Расход гелия в
 9 рабочем режиме ВЭПП-2000 порядка 4 литров в час. Дозаправка дьюаров происходит
 10 раз в сутки и занимает около одного часа.

11 2.4.2. Коммутация и система блокировок

12 Общая схема коммутации катушек соленоида представлена на рисунке 2.23. В стан-
 13 дартном режиме соленоид запитывается тремя источниками стабилизированного постое-
 14 янного тока – по одному для основных катушек (Nb_3Sn/Cu и $Nb - Ti$) и еще один для
 15 компенсирующей катушки. На рисунке катушки отмечены как S1, S2 и S3, соответственно.
 16 Максимальный ток источников 400 А, что превышает предельные токи катушек.

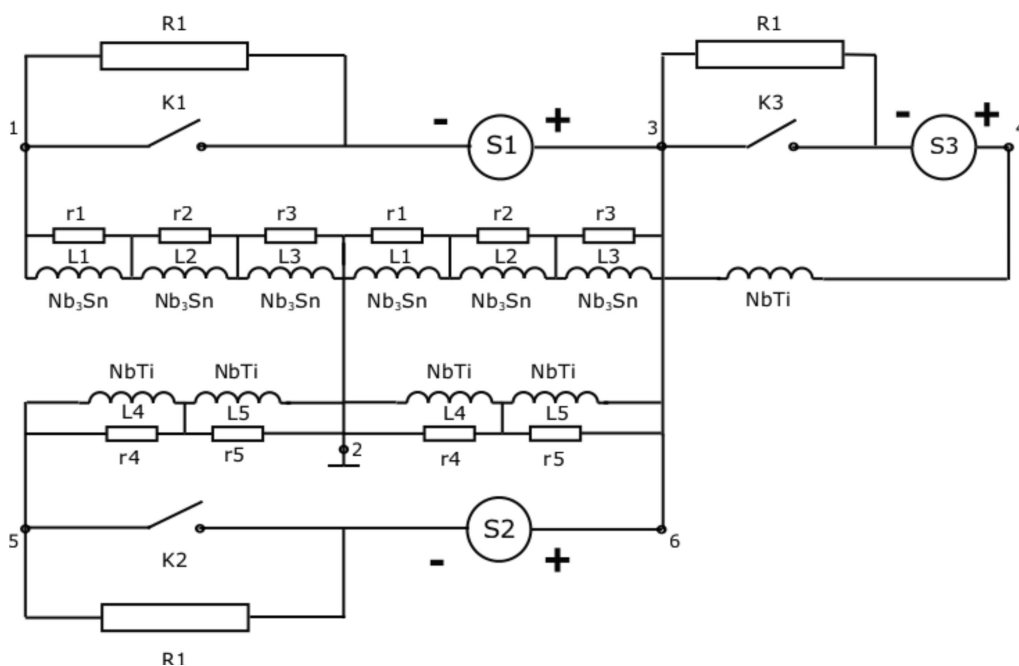


Рис. 2.23. Схема коммутации сверхпроводящего соленоида ВЭПП-2000.

1 Секции каждой катушки соединены последовательно и имеют индуктивности: $L_1 =$
 2 0.023 Гн , $L_2 = 0.03 \text{ Гн}$, $L_3 = 0.014 \text{ Гн}$, $L_4 = 1.4 \text{ Гн}$, $L_5 = 1.5 \text{ Гн}$. Параллельно каждой сек-
 3 ции включены шунтирующие сопротивления, которые используются для предохранения
 4 обмоток от разрушения во время срыва сверхпроводимости. Сопротивления расположе-
 5 ны прямо в гелиевом объеме и имеют следующие номиналы: $r_1 = r_2 = 0.4 \text{ Ом}$, $r_3 = 0.7$
 6 Ом , $r_4 = r_5 = 1.1 \text{ Ом}$. Дополнительно предусмотрены внешние сопротивления $R_1 = 1.8$
 7 Ом , которые в случае аварии подключаются специальными ключами $K_1 - 3$ в коммута-
 8 ционную цепь.

9 Большое внимание уделено также системе защит и блокировок. Защита от разру-
 10 шения катушек при срыве сверхпроводимости ("quench") осуществляется с помощью
 11 специального блока-компаратора [15], который сравнивает падение напряжений на двух
 12 продольных частях соленоида. При нарушении симметрии блок-компаратор отключает
 13 источник питания и переключает токовый ключ. Такая система позволяет снизить ток
 14 в катушках соленоида примерно в десять раз за одну секунду. Защита осуществляется
 15 отдельно для Nb_3Sn/Cu и $Nb-Ti$ катушек. Дополнительно в блоке quench-защиты уста-
 16 новлено оборудование для измерения температуры и уровня жидкого гелия в дьюаре.

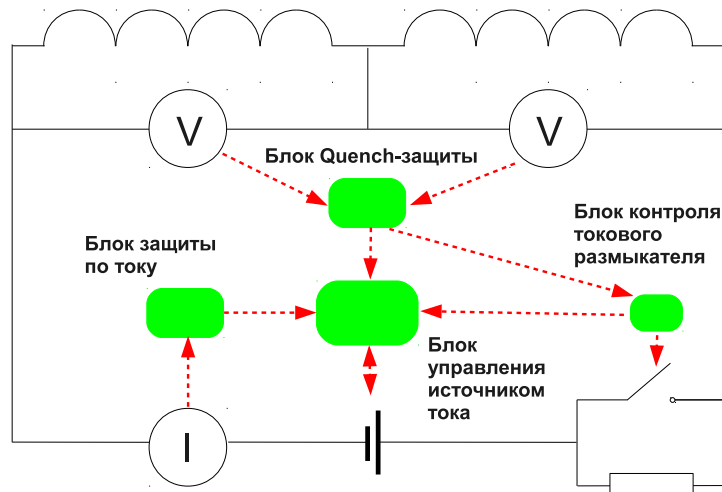


Рис. 2.24. Схема защитных блокировок сверхпроводящего соленоида ВЭПП-2000.

17 Дополнительно, чтобы исключить возможность подать на катушки слишком боль-
 18 шой ток (в случае самовозбуждения источника питания или сбоя в системе управления)
 19 предусмотрены независимые измерители тока, выполненные в виде отдельных блоков.

1 Для каждой катушки соленоида на блоке измерителей выставляется предельное значе-
 2 ние тока, при достижении которого источник питания этой катушки выключается. Внеш-
 3 нее сопротивление в таком случае не подключается, и ток в цепи постепенно падает за
 4 счет сопротивления токоподводов. Постоянная времени для $Nb-Ti$ катушек в таком слу-
 5 чае порядка часа. Общая схема системы блокировок показана на рисунке 2.24. Черным
 6 цветом показана упрощенная электрическая схема, а красным пунктиром – логические
 7 связи.

8 2.4.3. Магнитные измерения

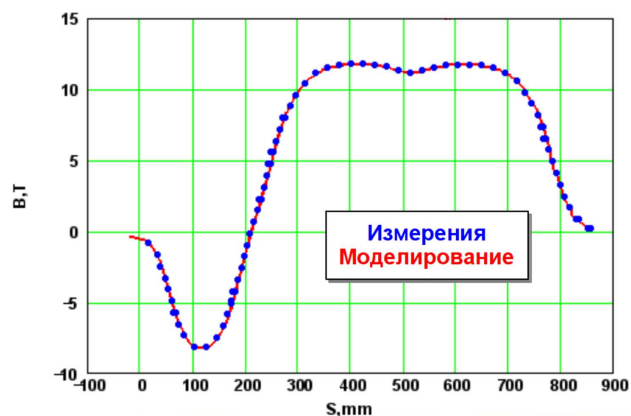


Рис. 2.25. Продольное магнитное поле в соленоиде. Измерения и моделирование.

9 Магнитные измерения проводились как для отдельных катушек, так и для всех
 10 катушек в сборе. Все измерения проводились в погружном криостате. Значения токов,
 11 которые были достигнуты в ходе испытаний составили 180 А в Nb_3Sn обмотках и 243 А
 12 в $Nb-Ti$ обмотках, что с запасом удовлетворяет требованиям на максимальное поле в
 13 соленоиде.

14 Магнитные измерения продольного поля соленоида проводились с помощью дат-
 15 чиков Холла, для чего датчики передвигались в жидком гелии с помощью 5-метровой
 16 тонкостенной трубы из нержавеющей стали, которая перемещалась из внешней атмосфе-
 17 ры в криостат с жидким гелием через специальный уплотнитель. Калибровка датчиков
 18 производилась с помощью датчика ЯМР, который также был помещён в жидкий гелий.
 19 На рисунке 2.25 представлены комбинированные результаты измерений и моделирования
 20 в программе "Mermaid".

Глава 3

Источники питания

3.1. Источник питания основных магнитов ВЭПП-2000

Система питания ведущего магнитного поля ВЭПП-2000 [10] должна обеспечивать ток до 10 кА при непрерывном режиме работы. Нагрузка представляет собой 8 размещенных по кольцу магнитов, имеющих по две обмотки из 5 витков каждая и соединенных последовательно. Падение напряжения на один магнит при максимальном токе составляет 10 В. Учитывая падение напряжения на подводящих шинах, выпрямитель должен обеспечивать напряжение до 125 В при максимальной энергии кольца.

Основные параметры силовоточного выпрямителя для ВЭПП-2000, питающегося от силового трансформатора ТМНПУ-4000/10, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Основные характеристики источника питания дипольных магнитов ВЭПП-2000.

Напряжение первичной обмотки	10 кВ
Выпрямленное напряжение	75 ÷ 120 В
Выпрямленный ток	0 ÷ 10000 А
Номинальная мощность	1400 кВт
Схема выпрямителя	шестифазная
Относительная стабильность	10^{-5} (при токе 10 кА)

Основой выпрямителя является стандартный комплект ТПВ-10000/825, состоящий из двух выпрямительных шкафов (ШВ1 и ШВ2), обеспечивающих выпрямленный ток до 5 кА каждый (см. рисунок 3.1).

Для фильтрации пульсаций каждый выпрямитель работает на реактор, собранный из шихтованного железа с медными водоохлаждаемыми обмотками. После реакторов происходит суммирование токов от выпрямителей и включены фильтрующие емкостные батареи (40 конденсаторов с параметрами: 350 В, 18 мФ). Далее шины питания проходят через обмотки трансформатора подавления пульсаций (ТПП). На первичную обмотку ТПП подается сигнал с усилителя в противофазе с пульсациями. Далее после ТПП плю-



Рис. 3.1. Выпрямительный шкаф ШВ1 и стойка управления.



Рис. 3.2. Трансформатор подавления пульсаций.

- 1 совая и минусовая шины проходят через бесконтактные датчики тока (БИТ1 и БИТ2),
- 2 которые являются основными элементами системы стабилизации тока. В целом, данная
- 3 система позволяет добиться относительной стабильности $\approx 10^{-5}$ при максимальном токе.

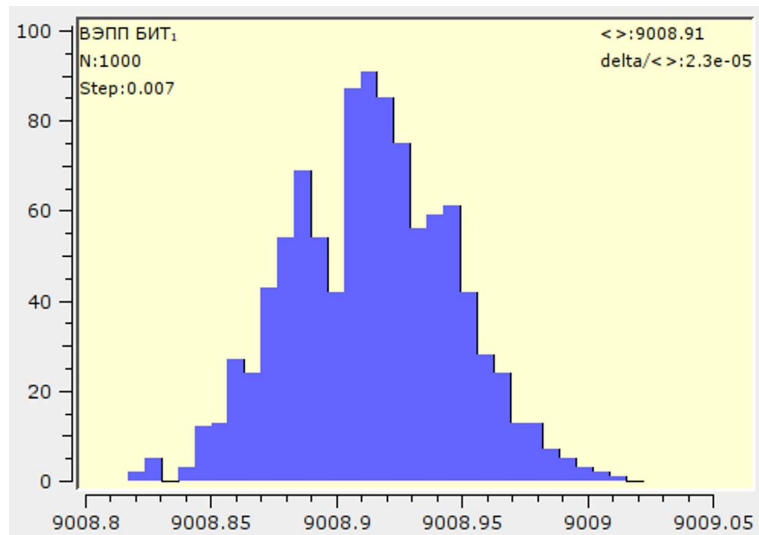


Рис. 3.3. Гистограмма стабильности источника основного поля на энергии около 1ГэВ ($\sigma \approx 2 \cdot 10^{-5}$).

3.2. Источники питания для основных квадрупольных линз ВЭПП-2000

В качестве источника тока для основных квадрупольных линз ВЭПП-2000 выбран источник типа ВЧ-300/12 [7]. Данный тип источников разработан в ИЯФ СО РАН для питания магнитных элементов электрофизических установок стабилизированным постоянным током с возможностью удаленного цифрового управления и контроля. Штатный режим источника ВЧ-300/12 допускает выходной ток до 300 А и напряжение до 12 В. Основные параметры источника приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Основные параметры источников стабилизированного выпрямленного тока ВЧ-300/12.

Выходное напряжение	0-12 В
Выходной ток	0-300 А
Напряжение питания	220/380 В
Нестабильность выходного тока	0.01%
Пульсации выходного напряжения	0.01%
Коммутационные пульсации 40 кГц	0.1%
Число каналов измерения напряжения	5
Число каналов дистанционного управления	8
Число каналов дистанционного контроля	8
Габариты	480x240x400 мм
Вес	15 кг

Управление источником осуществляется удаленно с помощью блока CDAC20 [8], который содержит прецизионные ЦАП и АЦП, коммутатор аналоговых сигналов для обеспечения измерения напряжений по 8 каналам, 8-канальные входной и выходной регистры для контроля состояния источника и дистанционного управления (в том числе включения и выключения), а также интерфейс в стандарте CAN [12]. С помощью шины CAN-BUS все источники связаны в одну сеть и подключены к автоматизированной системе управления комплексом (см. главу 4). Предусмотрен также вариант "ручного"

1 управления для настройки источников.



Рис. 3.4. Стойка с источниками ВЧ-300/12, установленная под коллайдером ВЭПП-2000.

2 На ВЭПП-2000 все блоки ВЧ-300 собраны в 6 шкафов. Общий вид шкафа с ис-
3 точниками приведен на рисунке 3.4. В начале предполагалось, что все источники будут
4 размещены в шкафах посегментно – по одному шкафу на каждый квадрант установки.
5 Каждый источник занимает одну корзину в стандарте "Вишня". Однако в связи с обсто-
6 ятельствами, указанными в главе 2.1.2, оказалось, что на энергии 1 ГэВ максимального
7 тока источников не достаточно для самых напряженных линз – семейства F2, D3, F3.
8 К тому же, при работе в предельных режимах по току и напряжению не гарантируется
9 стабильность работы, что недопустимо при работе коллайдера, требующего тонкой на-
10 стройки магнитной структуры. Тогда для всех линз этих семейств источники были "удво-
11 ены". В результате увеличения количества корзин на 12 штук пришлось установить два
12 дополнительных шкафа и переделать коммутацию. В новой схеме в сезон 2010-2011 года
13 источники показали стабильную работу на предельной энергии коллайдера.

3.3. Источники питания для сверхпроводящих соленоидов.

В ходе ввода соленоидов в эксплуатацию и в течение первых двух сезонов работы для запитывания катушек сверхпроводящего соленоида использовались источники, подобные источникам для квадрупольных линз (ВЧ-300). Однако опыт работы со сверхпроводящими соленоидами показал, что некоторые аспекты не были учтены на стадии проектирования. Так например, при выводе тока из $NbTi$ катушек, суммарная индуктивность которых ≈ 6 Гн, для сохранения управляемости приходится снижать ток очень медленно – примерно 0.25 А/сек. Чтобы решить эту проблему, были созданы обновленные источники VCH-300K, способные изменять полярность и соответственно выдавать ток ± 400 А и напряжение ± 8 В. Эти источники собраны в стандарте Евромеханика. Применена более современная элементная база. Для повышения отказоустойчивости всей системы используется водяное охлаждение вместо воздушного. По всем остальным параметрам источники подобны предыдущим – имеются два канала внешних блокировок, управление происходит с помощью блока CEAS51 (аналог CDAC20 в стандарте "Евромеханика"). На рисунке ?? показаны две стойки, где собраны по 3 источника питания, соответствующие им ключи-размыкатели и защитные сопротивления.



Рис. 3.5. Стойки с источниками VCH-300K и высокоточными ключами.

3.4. Источники питания для элементов коррекций

Для питания секступолей, расщепляющих линз, а также всех обмоток коррекций (дипольные коррекции в поворотных магнитах и квадрупольных линзах, скью-квадрупольные коррекции в секступолях) в кольце ВЭПП-2000 используются биполярные источники УМ-6 [11]. Всего в кольце ВЭПП-2000 76 катушек коррекций. Посистемно их количество приведено в таблице 3.3

Таблица 3.3. Элементы накопительного кольца ВЭПП-2000 для питания которых используются УМ-6.

Дипольные коррекции	36
Квадрупольные линзы	4
Скью-квадрупольные коррекции	12
Секступольные коррекции	24

Ток во всех этих элементах не превышает 5 А. Однако активное сопротивление этих катушек сильно различается. По этой причине все элементы были разделены на группы по выходному напряжению: до 32 В, до 40 В, до 48 В, до 64 В и до 80 В. Каждая такая группа питается от индивидуального буферного источника. Основные параметры блоков УМ-6 представлены в таблице 3.4

Таблица 3.4. Основные параметры источников питания УМ-6.

Выходной ток	$\pm 6A$
Стабильность	$\leq 0,1\%$
Выходное напряжение	$\pm 120B$
Управление	ЦАП/АЦП
Охлаждение усилителя мощности	Воздушное
Охлаждение корзины	Воздушное с нагнетанием
Защита от перегрузки	Да
Защита по температуре	Нет

1 Блоки усилителей мощности выполнены в стандарте "Вишня-40". Мультиканаль-
2 ный модуль занимает две корзины размерами 480x240x400 мм. Шкаф с восемью корзина-
3 ми "Вишня" может вместить в себя более 40 каналов УМ-6. При этом охлаждение шкафа
4 остается достаточным для нормального функционирования блоков. На рисунке 3.6 по-
5 казаны шкафы с блоками УМ-6, установленные в техническом помещении комплекса
6 ВЭПП-2000.



Рис. 3.6. Шкафы с элементами питания УМ-6 и управляющими блоками.

7 Для управления слаботочными элементами на ВЭПП-2000 используется два типа
8 блоков-контроллеров. Первый вариант – для одновременного управления и контроля 8-ю
9 блоками УМ-6 задействуется блок САС208, который включает 8-канальный 16-битный
10 ЦАП, 20-канальный 24-битный АЦП и регистры ввода-вывода, для 8/8 внешних команд.
11 Во втором варианте можно одновременно контролировать и управлять 16-ю блоками с по-
12 мощью 16-канального 16-битного модуля ЦАП (CANDAC16) и 40-канального 24-битного
13 модуля АЦП (CANADC40) [8]. В обоих вариантах для связи модулей с автоматизирован-
14 ной системой управления комплексом используется шина CAN-BUS.

Глава 4

Система управления магнитными элементами ВЭПП-2000

Как уже было сказано выше, ускорительный комплекс ВЭПП-2000 использует некоторые элементы предыдущей машины ВЭПП-2М. Это частично касается и системы управления. Однако управление самим коллайдером ВЭПП-2000, включая инжекцию, было полностью построено на новой элементной базе и основываясь на современных принципах организации автоматизированных систем управления. "Старые" компоненты по возможности модернизировались и интегрировались в новую систему.

4.1. Структура системы управления

Несмотря на то, что количество каналов управления и наблюдения для ускорительного комплекса ВЭПП-2000 не так велико (~ 500 каналов управления и ~ 1000 каналов наблюдения), система управления построена таким образом, чтобы максимально структурировать все ее составляющие [27]. Во-первых, произведено четкое разделение на несколько подсистем – сильноточные источники, источники коррекций, импульсные элементы, термоконтроль, контроль криогеники, наблюдение за пучком и т.д. – всего порядка 15 подсистем. Аппаратура и программы в каждой подсистеме объединены по следующим принципам – однотипность методов управления и выполняемых задач.

Во-вторых, каждая из подсистем условно разделена на три уровня. Верхний уровень – это графический интерфейс программ управления, с которыми непосредственно взаимодействует оператор ускорительного комплекса. Нижний уровень – это программы, предоставляющие доступ к различным аппаратным контроллерам: ЦАП, АЦП и т.д. Средний уровень – это набор программ и библиотек для обеспечения удобного взаимодействия между верхним уровнем и нижним. Также, по возможности, в этот уровень вынесена вся логика работы подсистемы – пересчет кодов в физические величины, разнообразные программные защиты, последовательности команд.

Все три уровня имеют доступ к одной общей базе данных для конфигурирования. Программы всех уровней могут обмениваться данными напрямую между друг другом.

1 Логическая схема системы организации системы управления по подсистемам и уровням
 2 представлена на рисунке 4.1. Предложенная схема позволяет легко добавлять новые под-
 3 системы по мере их возникновения и упрощает создание самих программ, в том числе
 4 при совместной работе нескольких программистов.

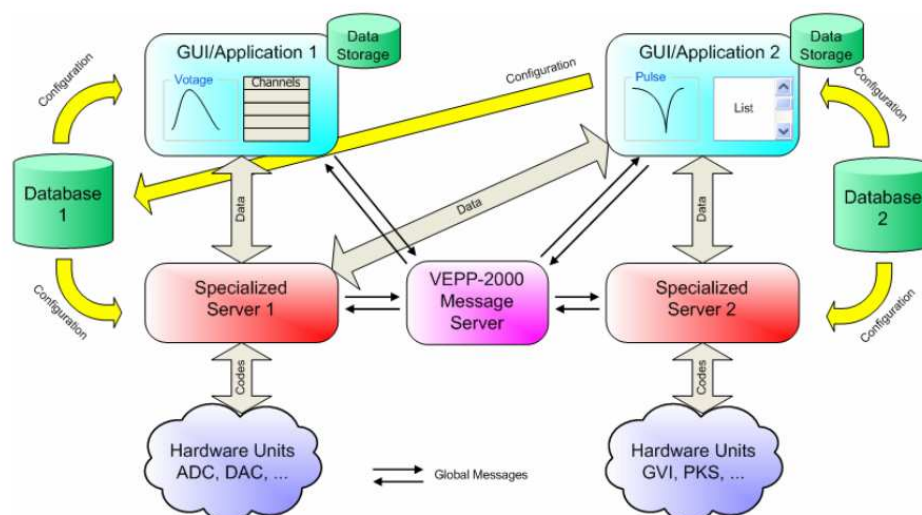


Рис. 4.1. Схема структуры взаимодействия различных элементов системы управления.

5 Принцип модульности используется и при организации аппаратного обеспечения
 6 системы управления – часть компьютеров используется для визуализации, часть для
 7 хранения данных и поддержки инфраструктуры компьютерной сети, часть для низко-
 8 уровневое взаимодействие с блоками-контроллерами различных подсистем. Между со-
 9 бой все компьютеры связаны в единую сеть ethernet, отделенную от общей сети ИЯФ
 10 выделенным шлюзом, что позволяет получить большую автономность и отказоустойчи-
 11 вость системы.

12 В качестве программной среды используется в основном свободное программное
 13 обеспечение: операционная система GNU/Linux, коллекция компиляторов и библиотек
 14 gcc/glibc, системы баз данных PostgreSQL и MySQL, многопрофильные библиотеки GTK+,
 15 QT и Motif.

16 Хотя в качестве аппаратного протокола общения с блоками-контроллерами на ком-
 17 плексе используется два варианта - протокол КАМАК и более современный протокол
 18 CAN [12], для управления магнитными элементами накопительного кольца ВЭПП-2000
 19 используется только последний. Протокол CAN и шина данных CANBUS являются про-

1 мышленным стандартом и особенно удобны в применении, когда элементы системы управ-
 2 ления значительно удалены друг от друга, как это часто происходит на ускорителях эле-
 3 ментарных частиц. При использовании CANBUS удается сильно сократить количество
 4 необходимых кабелей и шин.

5 Для управления всеми источниками питания магнитных элементов накопительно-
 6 го кольца ВЭПП-2000 используются всего три типа блоков-контроллеров [9]: CDAC20
 7 (CEDAC20, CEAS51) для управления источниками квадрупольных линз, соленоидов и
 8 поворотных магнитов и CANDAC16, CANADC40 для управления квадрупольными рас-
 9 щепляющими линзами семейства F1 и разнообразными катушками коррекций. Эти блоки
 10 могут подсоединяться к шине данных CANBUS и имеют более-менее унифицированный
 11 программный протокол. Также можно упомянуть несколько вспомогательных для маг-
 12 нитной системы блоков: для контроля температуры используется блок SAC208, для за-
 13 щиты катушек соленоидов при срывах сверхпроводимости используется блок "Junktion
 14 box"[15].

Таблица 4.1. Блоки-контроллеры управления источниками питания магнитных элементов.

Магнитный элемент	Тип контроллера	количество
Поворотные магниты ВЭПП	CDAC20	3
Поворотные магниты БЭП	CDAC20	9
Квадрупольные линзы	CDAC20	20
Сверхпроводящие соленоиды	CEAS51	12
Коррекции	CANDAC16/CANADC40	72

15 4.2. Высокоуровневые инструменты для управления магнитными 16 элементами

17 При создании верхнего уровня системы управления была поставлена и выполнена
 18 задача по максимальному упрощению работы оператора комплекса. Все интерфейсы по-
 19 строены таким образом, чтобы по возможности скрыть от оператора устройство самой
 20 системы управления и предоставить возможность сосредоточиться на вопросах работы

1 непосредственно с установкой: все параметры задаются и отображаются в физических
 2 величинах - ток, напряжение, магнитное поле, энергия, время. Важные параметры вы-
 3 несены в отдельные таблицы контроля. Данные, требующие анализа, отрисовываются в
 4 виде графиков и диаграмм. Предусмотрена система архивного хранения операционных
 5 параметров для последующего изучения или восстановления.

The screenshot shows the VERP software interface. At the top, it displays 'Источники: Ошибка' (Sources: Error) and a power level of '974.4 МэВ'. Below this, there are several data tables with columns for 'Имя' (Name), 'Iуст(A)' (Current), 'U(В)' (Voltage), and 'Шаг' (Step). The interface includes navigation buttons like '<<', '>>', and 'T 1.0', as well as a 'Время: 70' (Time: 70) indicator. The tables contain numerical data for various components, some highlighted in green or red.

Рис. 4.2. Интерфейс программы "VERP".

6 В арсенале оператора коллайдера ВЭПП-2000 есть несколько программ для управ-
 7 ления магнитной структурой. Программа "VERP" является универсальным средством
 8 управления на ВЭПП-2000. Она представляет собой набор таблиц, в которые включены
 9 все магнитные элементы кольца ВЭПП-2000, как основные, так и корректоры. В табли-
 10 цах представлены заданные и отработанные значения токов и напряжения. Существует
 11 возможность работать как с отдельным элементом, так и с "массивом" из нескольких эле-
 12 ментов. Поддерживается возможность сохранять и восстанавливать массивы с/на жест-
 13 кий диск, а так же осуществлять программируемые переходы между этими массивами.
 14 За 4 года работы установки накоплено около 5000 уникальных массивов.

15 "Solenoids" – программа для управления и контроля источников питания сверх-
 16 проводящих соленоидов. Как и в программе "VERP", предоставляется возможность
 17 изменять ток в соленоидах как для отдельной катушки так и группами, отображаются
 18 основные параметры. Однако здесь акцент сделан на максимальную безопасность рабо-
 19 ты с такой критически-важной системой как соленоиды, для чего в программу внесены
 20 разнообразные механизмы защиты от ошибок оператора.

	NAMES	ENTRY	GO	L	STEP	SET/MEAS	MAIN DCCT	DCCTO/VOLT	POW
<input type="checkbox"/>	1S1	180.5360	GO	<input type="checkbox"/>	0.0000	180.5360 180.5363	180.5537	180.5450 2.0729	*
<input checked="" type="checkbox"/>	1S2	103.2202	GO	<input type="checkbox"/>	1.0000	103.2202 103.2211	103.2804	103.2315 1.5562	*
<input type="checkbox"/>	1S3	24.0047	GO	<input type="checkbox"/>	0.0000	24.0047 24.0038	24.0130	24.0108 0.8103	*
<input type="checkbox"/>	2S1	180.8599	GO	<input type="checkbox"/>	0.0000	180.8599 180.8603	180.8446	180.8594 1.7031	*
<input checked="" type="checkbox"/>	2S2	103.4009	GO	<input type="checkbox"/>	1.0000	103.4009 103.3996	103.4316	103.4150 1.3047	*
<input type="checkbox"/>	2S3	24.0479	GO	<input type="checkbox"/>	0.0000	24.0479 24.0503	24.0404	24.0487 0.6968	*
<input type="checkbox"/>	3S1	180.8599	GO	<input type="checkbox"/>	0.0000	180.8599 180.8598	180.9094	180.8741 1.8078	*
<input checked="" type="checkbox"/>	3S2	103.4009	GO	<input type="checkbox"/>	1.0000	103.4009 103.4006	103.4236	103.4061 1.3281	*
<input type="checkbox"/>	3S3	24.0479	GO	<input type="checkbox"/>	0.0000	24.0479 24.0481	24.0470	24.0553 0.7330	*
<input type="checkbox"/>	4S1	180.5360	GO	<input type="checkbox"/>	0.0000	180.5360 180.5341	180.6024	180.5452 1.6903	*
<input checked="" type="checkbox"/>	4S2	103.2202	GO	<input type="checkbox"/>	1.0000	103.2202 103.2228	103.2087	103.2199 1.3049	*
<input type="checkbox"/>	4S3	24.0047	GO	<input type="checkbox"/>	0.0000	24.0047 24.0041	24.0105	24.0055 0.6856	*
<input type="checkbox"/>	Select all	Time: 10	GO	<input type="checkbox"/>	1.0000	⏪ ⏩ ⏹ ⏪ ⏩			:)

Table 4S2 started

Рис. 4.3. Интерфейс программы "Solenoids".

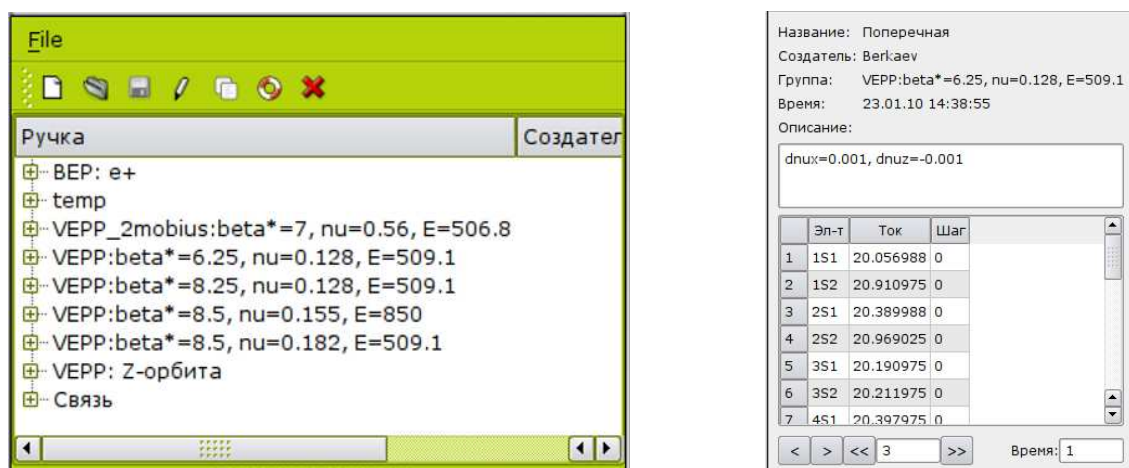


Рис. 4.4. Интерфейс программы "Ручки".

1 Для более удобной и точной настройки параметров магнитной структуры коллай-
 2 дера используется программа "Ручки". Она позволяет задавать наборы элементов и ве-
 3 личины сдвигов для управления каким-то одним из параметров. Например, для сдвига
 4 рабочей точки кольца вдоль резонанса связи требуется одновременное изменение пара-
 5 метров соленоидов и трех семейств квадрупольных линз. В программе заданы такие
 6 "ручки" как: изменение β^* для двух мод бетатронных колебаний, изменение связи бета-
 7 тронных частот, выравнивание орбиты по горизонтали и вертикали с помощью разных
 8 наборов дипольных коррекций и т.д. Коэффициенты и наборы элементов могут быть
 9 подобраны численно в программах моделирования ускорителей "RING" или "MAD" , а

1 после внесены в программу и применены на реальной установке.

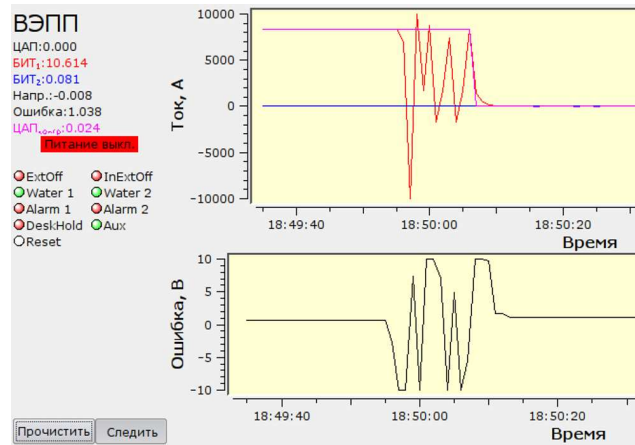


Рис. 4.5. Интерфейс программы "Istochnik".

2 Для детального контроля за состоянием источников питания магнитных элементов
 3 используется ряд специализированных программ. Для отслеживания состояния источни-
 4 ков питания поворотных магнитов кольца ВЭПП-2000 и БЭП предназначена программа
 5 "Istochnik". Взаимодействуя с сервером, программа воспроизводит все показатели, как
 6 будто оператор находится в зале источника. Отображаются "блокировки", сигнализиру-
 7 ющие о возникновении неисправности, динамически изменяемые величины отрисовыва-
 8 ются в виде графиков, так что можно проследить их развитие во времени. Например, на
 9 рисунке ?? показано развитие аварии на источнике питания ВЭПП-2000.

Wed Nov 2 14:18:29 2011

MAG	Поле по ЯМР. Измерение.	Поле по токам Расчет.
1M1	12182.5605	12193.5449
1M2	12241.7480	12307.0898
2M2	12209.8262	12263.6562
3M1	12198.8301	12248.0361
3M2	12231.7832	12284.7002
4M1	12241.3740	12302.0205
4M2	12196.5840	12213.3457
2M1	12197.1191	12220.7910

12224.6906Гс Среднее поле по 8 маг.
 510.301МэВ Вклад в энергию 8 маг.
 -0.019MeV Поправка к энергии от F2

```

+++++
+ 512.076MeV Энергия (расчет!) +
+ Точность ~2.0 МэВ! +
+++++
+ 510.320 MeV, Реальная энергия! +
+ Точность ~0.2МэВ! +
+++++

```

Рис. 4.6. Интерфейс программы "NMR".

1 Для вычисления средней энергии пучков в накопителе используется программа
2 "NMR". Эта программа оценивает магнитное поле в поворотных магнитах и энергию
3 кольца с помощью измеренных токов в магнитах и корректорах. Полученное поле пе-
4 редается серверу датчиков ЯМР [23], запущенному в отдельном крейте, для определе-
5 ния области поиска ЯМР. По измеренным значениям поля энергия кольца оценивается
6 с большей точностью. В настоящий момент ведется разработка улучшения программы
7 для организации обратной связи, когда программа будет подстраивать ведущее поле под
8 заданную энергию.

9 Стоит также отметить две программы, являющиеся вспомогательными для работы
10 с магнитной системой, но безусловно важными. "Styo" – программа для контроля крио-
11 генной системы сверхпроводящих соленоидов – позволяет отслеживать уровень гелия и
12 азота в сосудах Дьюара, температуру в криостате и температуру токовводов, управлять
13 заливкой. "Thermo" – программа для контроля температуры магнитных элементов.

Опыт работы с магнитной системой коллайдера

К моменту написания данной работы период ввода в эксплуатацию ВЭПП-2000 был закончен. В рамках этого процесса были запущены и налажены все системы установки. В данной главе описывается некоторый опыт работы с магнитной структурой на ВЭПП-2000, полученный за это время.

5.1. Пробный запуск коллайдера без сверхпроводящих соленоидов

Первый пучок электронов в накопительном кольце ВЭПП-2000 был получен в начале сентября 2006 года. Так как сверхпроводящие соленоиды еще не были готовы к установке в кольцо, была предложена альтернативная электронно-оптическая схема, позволяющая получить захват пучка без использования соленоидов [16]. Структурные функции такого режима представлены на рисунке 5.1.

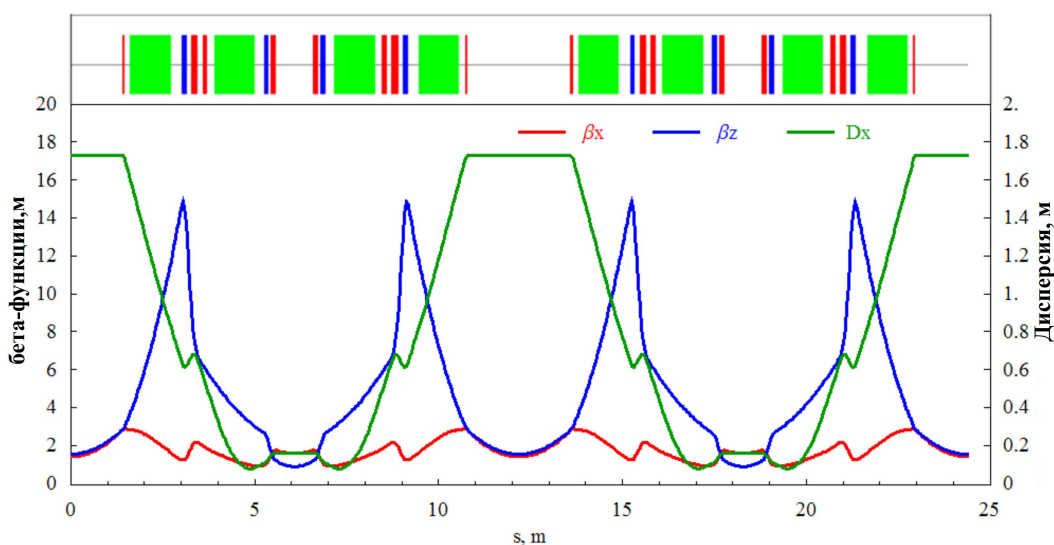


Рис. 5.1. Структурные функции накопительного кольца ВЭПП-2000 в режиме без соленоидальной фокусировки.

Бетатронные частоты $\nu_x = 2.4$, $\nu_z = 1.2$. Несмотря на относительную "мягкость" оптики, набег фаз между впускным магнитом и кикером достаточен для инжекции.

1 α -функции занулены в детекторных промежутках, а также промежутках инжекции и
2 резонатора. β -функции достигают 15 метров в пике. Дисперсия имеет максимум 8 мет-
3 ров в детекторных промежутках. Максимальная достижимая энергия кольца в данном
4 режиме 600 МэВ. Это ограничение возникает из-за насыщения "расщепляющих" линз,
5 установленных в промежутках встречи.

6 Без элементов финального фокуса работа со встречными пучками невозможна, по-
7 этому такая оптика использовалась для первого захвата пучков в кольцо, настройки
8 перепуска частиц, калибровки системы наблюдения за пучком. Также важной задачей
9 для начала работы с круглыми пучками была механическая юстировка сверхпроводящих
10 соленоидов, подвешенных внутри криостатов. Для этого в режиме «мягкой оптики» со-
11 леноиды включались в качестве слабого возмущения, после чего измерялось вносимое
12 таким возмущением искажение орбиты. Каждая секция всех четырех соленоидов была
13 протестирована с полем до 40 кГс. Далее координаты центра каждой секции (x_i, z_i, x'_i, z'_i)
14 вычислялись при помощи анализа т.н. матрицы отклика орбиты и производились меха-
15 нические коррекции положения соленоидов.

16 5.2. Получение высокого вакуума

17 Другой важной задачей являлось получение высокого вакуума, необходимого для
18 работы со встречными пучками. Вакуумная камера ВЭПП-2000 состоит из нескольких
19 сегментов: 8-и камер внутри дипольных магнитов, 4-х вакуумных камер соленоидов, ка-
20 мер в экспериментальных и технических прямых участках. Система высоковакуумной
21 откачки состоит из 16 портов с ионно-геттерными насосами ПВИГ-100, расположенных
22 по краям вакуумных камер поворотных магнитов; ионно-геттерного насоса ПВИГ-250,
23 соединенного с резонатором накопителя; 4 крионасосов, образованных холодной внутрен-
24 ней поверхностью криостатов соленоидов.

25 Для получения расчетного вакуума $\approx 10^{-10}$ торр вакуумная камера прогревалась
26 до $350\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 24 часов под вакуумом, после чего дополнительно обезгаживалась с
27 помощью синхротронного излучения. Для такой процедуры также используется режим
28 структуры без соленоидов. Мощность СИ при токе $I^- = 200$ мА примерно 30 Вт/м на
29 энергии 500 МэВ.

30 В варианте оптики без соленоидов накопление пучка затруднительно, так как набег

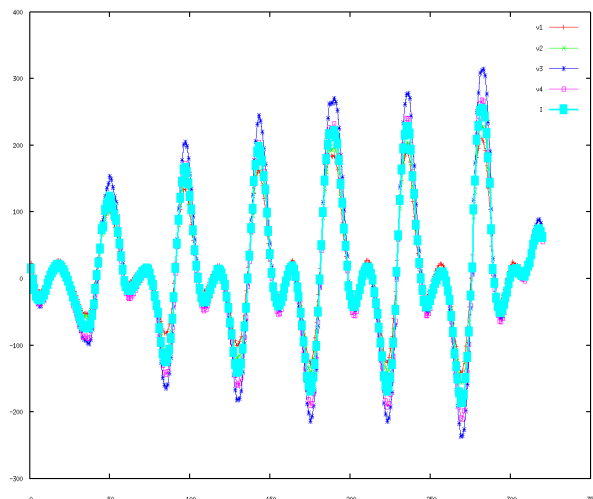


Рис. 5.2. Сигнал с пикапа, когда в кольцо инжектировано 7 сгустков.

1 фазы между ударом и пред-ударом не оптимален. Однако в режиме одного пучка для
 2 получения больших токов можно использовать заполнение кольца несколькими сгустка-
 3 ми. Частота ВЧ резонатора ВЭПП-2000 172.0 МГц. Частота обращения в кольце 12.292
 4 МГц. Таким образом, в кольцо можно впускать до 14 сгустков. Для тренировки вакуум-
 5 ной камеры использовалось 7 сгустков. На рисунке 5.2 показан сигнал с пикап-станции в
 6 кольце в зависимости от времени. Суммарный ток достигал 150 мА, а интегрально было
 7 набрано $\approx 20\text{А}\cdot\text{ч}$. В результате тренировки синхротронным излучением рабочий вакуум
 8 с током порядка 100 мА составлял $\approx 10^{-9}$ торр.

9 5.3. Калибровка средней энергии пучков

10 Для экспериментов, которые планируется провести на ВЭПП-2000, чрезвычайно
 11 важно определение средней энергии пучков с относительной точностью порядка $\Delta E/E =$
 12 10^{-4} или лучше. Для точного определения энергии кольца нужно знать несколько пара-
 13 метров. Магнитное поле в поворотных диполях измеряется с помощью датчиков ЯМР
 14 [23]. Датчики установлены в каждом магните и располагаются вне вакуумной камеры в
 15 медианной плоскости и сдвинуты на 3 см по радиусу от орбиты пучка. По азимуту магни-
 16 та датчики находятся в области, где поле имеет максимум. Поле на орбите определяется с
 17 помощью пересчета по калибровкам, полученным при проведении магнитных измерений.
 18 Однако несмотря на то, что датчики ЯМР определяют поле с относительной точностью

1 $\approx 10^{-6}$ для любой энергии накопителя, интеграл поля вдоль орбиты пучка определяется
 2 с куда худшей точностью. Нужно учитывать положение равновесной орбиты, токи ди-
 3 полных корректоров в фокусирующих квадрупольях. Кроме того, как показывает опыт
 4 работы на накопителе ВЭПП-2М [21], существенным фактором является температура
 5 окружающей среды и самих магнитных элементов. Все эти параметры можно учесть с
 6 помощью калибровок энергии различными способами.

7 5.3.1. Калибровка энергии по массе ϕ -мезона

8 Одним из способов калибровки энергии может выступать измерение резонанса рож-
 9 дения ϕ -мезона. Энергия этого процесса хорошо известна и равняется 1019.445 ± 0.020
 10 МэВ. Первые измерения светимости и сканирование ϕ -мезонного резонанса были прове-
 11 дены с детектором СНД в 2008 году. В конце 2009 года был готов к началу измерения
 12 и детектор КМД-3. Для калибровки его систем и уточнения шкалы энергий ВЭПП-2000
 13 сканирование в области ϕ -мезонного резонанса было повторено.

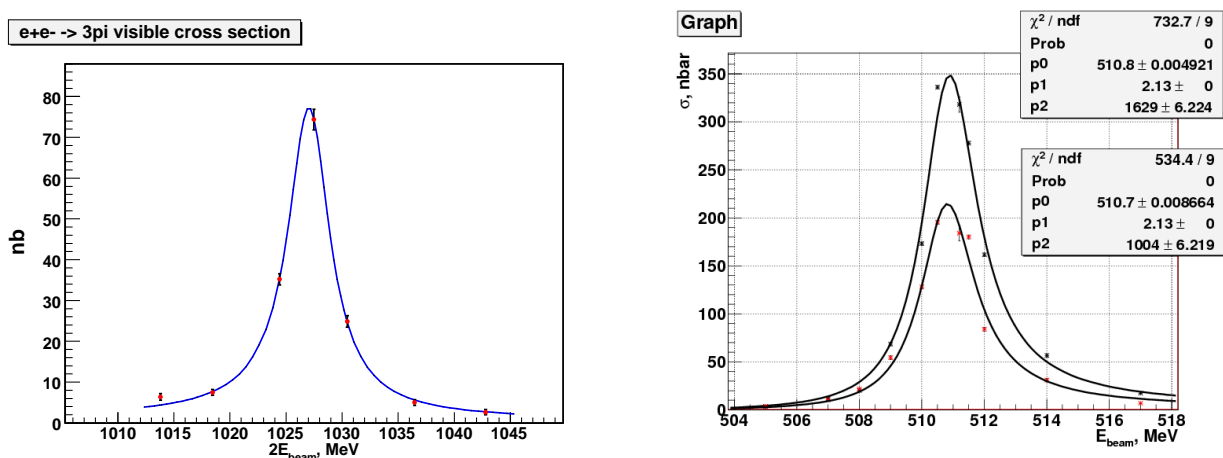


Рис. 5.3. Измерение энергии рождения ϕ -мезона. Слева – данные детектора СНД (2008г). Справа – данные детектора КМД-3 (2009г). Энергия каждой точки определялась по измерениям данных датчиков ЯМР с последующей обработкой.

14 Во-время первого измерения, каждая точка набора статистики соотносилась с оце-
 15 ночной энергией, которая была получена на основе данных магнитных измерений. Ошиб-
 16 ка между оценочной и реальной энергией составила около 3.5 МэВ и была в последствии
 17 учтена в формуле оценки светимости.

18 Одиночный дипольный корректор порождает изменение замкнутой орбиты пучка,

1 описываемое относительно основной орбиты следующей формулой:

$$u(s) = \theta \frac{\sqrt{\beta_u(s_0)\beta_u(s)}}{2 \sin(\pi Q_u)} \cos(|\phi_u(s) - \phi_u(s_0)| - \pi Q_u), \quad (5.1)$$

2 где β_s и ϕ_s – параметры бетатронного движения, Q_s – бетатронная частота, а θ
 3 – сила корректора. Изменение энергии от действия корректора будет пропорционально
 4 изменению длины замкнутой орбиты:

$$\frac{\delta E}{E} = -\frac{1}{\alpha} \frac{\delta L}{L}, \quad (5.2)$$

5 где α – коэффициент уплотнения орбит. Как показано в [22] изменение длины ор-
 6 биты, а следовательно и энергии, для одиночного корректора в первом приближении
 7 пропорционально дисперсионной функции и силе корректора:

$$\delta L = \Psi_u(s_0)\theta. \quad (5.3)$$

8 Второе измерение энергии рождения ϕ -мезон, проводилось через год после первого
 9 и хотя магнито-оптическая структура совпадала, набор значений дипольных корректо-
 10 ров существенно отличался. Учитывая разницу в массивах 2008 и 2009 годов и ошибку
 11 определения энергии, составившую ≈ 1 МэВ, была вычислена необходимая поправка. На
 12 ВЭПП-2000 при расчете поправки учитываются только линзы семейства F2, так как это
 13 единственные X-корректоры, располагающиеся в ахроматах, где дисперсия не занулена.

14 5.3.2. Калибровка энергии методом резонансной деполяризации

15 В конце первого экспериментального сезона была предпринята недельная попыт-
 16 ка провести калибровку энергии ВЭПП-2000 методом резонансной деполяризации [26].
 17 Прежде всего необходимо сказать, что наличие сильных соленоидов в магнитной структу-
 18 ре накопителя приводит к значительным ограничениям для радиационной поляризации
 19 пучков. Поляризация возможна только при противоположной полярности соленоидов
 20 в каждом экспериментальном промежутке [25]. Более того, результат зависит также и
 21 от последовательности полярностей соленоидов на кольце в целом. Если расположение
 22 соленоидов подчеркивает первую орбитальную гармонику продольного поля, то радиаци-
 23 онная поляризация возможна в области энергий от 0.6 до 1 ГэВ со сравнительно малым

- 1 временем поляризации. На рисунке 5.4 представлен расчет программой «ASPIRRIN» [24]
 2 степени радиационной поляризации в зависимости от энергии.

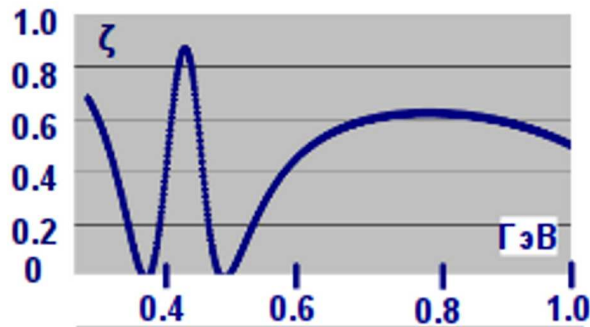


Рис. 5.4. Степень радиационной поляризации пучка на ВЭПП-2000 в зависимости от энергии.

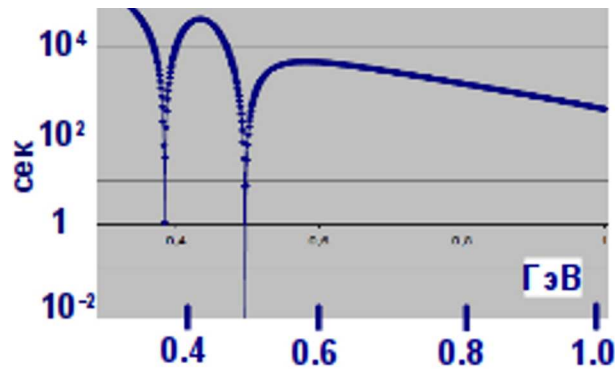


Рис. 5.5. Время радиационной поляризации пучка на ВЭПП-2000 в зависимости от энергии.

- 3 На рисунке 5.5 представлен расчет времени радиационной поляризации в зависи-
 4 мости от энергии. Следует заметить, что высокий уровень магнитного поля ВЭПП-2000
 5 на энергиях выше 700 МэВ позволяет использовать эффект поляризации не только для
 6 калибровки энергии, но и открывает возможность постановки экспериментов со встреч-
 7 ными поляризованными пучками.

- 8 Для энергий 200–600 МэВ, где время радиационной поляризации велико, можно
 9 также иметь пучки с высокой степенью поляризации при конфигурации соленоидов с
 10 подчеркнутой второй орбитальной гармоникой. При этом поляризация пучков осуществ-
 11 ляется в бустерном накопителе БЭП на большой энергии с последующим перепуском
 12 пучка в ВЭПП-2000.

- 13 Для наблюдения резонансной деполяризации пучка по измерению скорости счета ча-
 14 стиц, рассеянных внутри сгустка (эффект Тушека), на ВЭПП-2000 в одном техническом
 15 промежутке были поставлены два подвижных сцинтилляционных счетчика. Поскольку

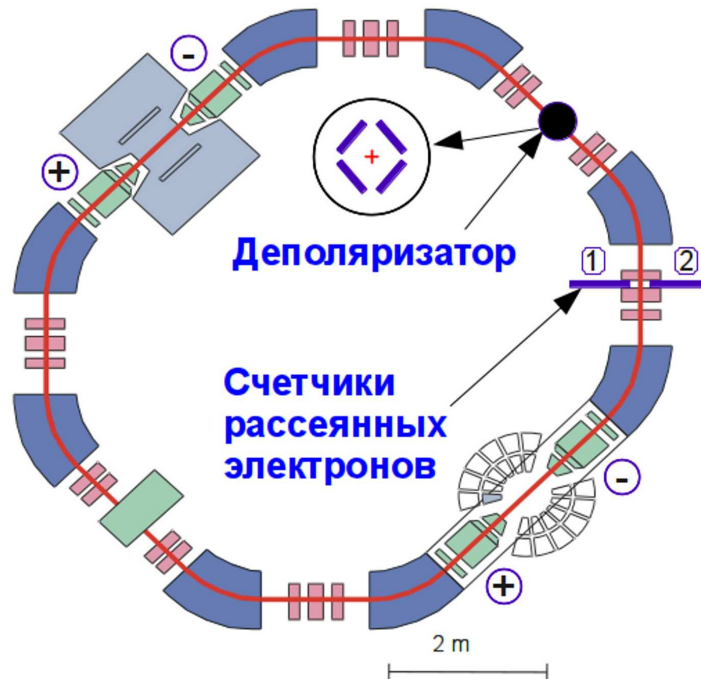


Рис. 5.6. Схема измерения энергии по резонансной деполаризации пучка.

1 эффект Тушека имеет зависимость от поляризации пучка, то в момент разрушения по-
 2 лярizations должен происходить скачок в скорости счета. Деполаризатор представляет из-
 3 себя 4 коротких (10 см) пластинок в вакуумной камере, запитанных от 2-х канального ра-
 4 диочастотного усилителя. Расположение пластинок позволяет возбуждать магнитное поле
 5 любого направления в плоскости, поперечной орбите пучка. Деполаризация происходит
 6 при совпадении частоты деполаризатора f_d с одной из комбинаций частот спиновой пре-
 7 цессии и частоты обращения: $f_d = (k \pm \nu_s) \cdot f_0$, где k – целое число. Хорошо известно,
 8 что при вертикальной поляризации частота спиновой прецессии однозначно связана с
 9 энергией частицы:

$$E(\text{MeV}) = 440.6484 \cdot \left(\frac{f_d}{f_0} + 1 \right); \quad (k = 1).$$

10 Первое измерение было проведено на энергии 750 МэВ, при которой время радиаци-
 11 онной поляризации достаточно мало (≈ 30 минут). Сильные деполаризующие резонансы
 12 в этой области отсутствуют, даже если предположить, что симметрия соленоидов наруше-
 13 на до уровня 1%. Сканирование осуществлялось в полосе частот $\Delta f_d = 0.001 f_0 (2 - \nu_s)$ со
 14 скоростью 10 Гц/сек. После наблюдения первых скачков скорости счета, область частот
 15 была сужена в 2 раза и скорость сканирования – в 10 раз. На рисунке 5.7 представлены

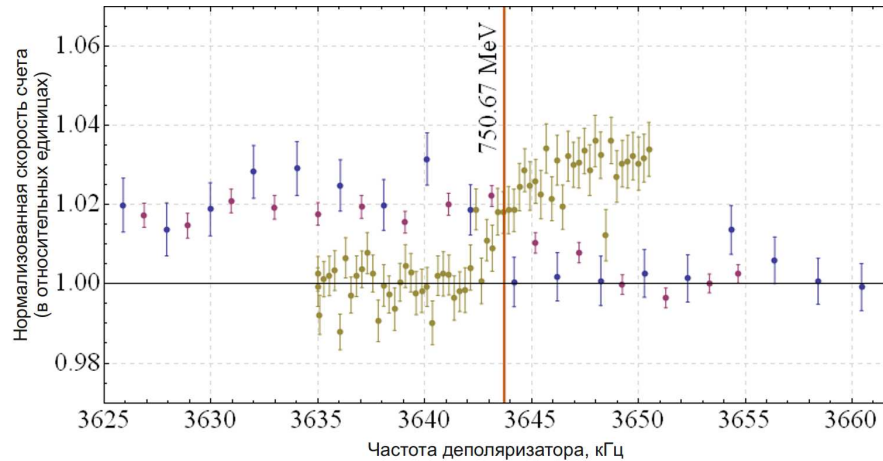


Рис. 5.7. Относительная скорость счета рассеянных электронов, нормированная на квадрат тока пучка в зависимости от частоты деполяризатора для трех измерений.

1 данные этих измерений. Скачок скорости счета во всех случаях происходит в узкой обла-
 2 сти частот деполяризатора, что позволяет определить энергию пучка: $E = 750.67 \pm 0.03$
 3 МэВ.

4 Полученный результат отличается от энергии, определенной по измерениям поля
 5 в магнитных элементах после поправок, внесенных благодаря калибровкам по массе
 6 ϕ -мезонного резонанса на величину порядка 0.1 МэВ. Дальнейшее увеличение точности
 7 определения энергии планируется осуществить с помощью учета температурных эффек-
 8 тов [21] и дальнейшей калибровки в широком диапазоне энергий с помощью резонансной
 9 деполяризации.

10 5.4. Экспериментальная проверка метода круглых пучков

11 Весной 2008 года основные этапы ввода установки в эксплуатацию были завершены:
 12 заработали все источники питания, получен необходимый вакуум, отлажен процесс вы-
 13 равнивания орбиты и оптики методом матриц отклика, настроен перепуск и накопление
 14 позитронов и электронов в кольце. Также был запущен детектор СНД, благодаря чему
 15 появилась возможность измерять светимость. Все это позволило произвести эксперимент
 16 по измерению удельной светимости ($L/I^- \cdot I^+$) круглых пучков в зависимости от тока
 17 пучков и сравнить данные ВЭПП-2000 с аналогичным измерением на ВЭПП-2М [18].

18 Структура ВЭПП-2000 в этом эксперименте была подобрана таким образом, чтобы
 19 основные параметры соответствовали подобным в эксперименте на ВЭПП-2М, например,

- 1 β -функция в месте встречи равнялась 4.5 см ($\beta^* = 5$ см. для ВЭПП-2М). Чтобы полу-
- 2 чить такую β^* в соленоидах были включены только ближние к месту встречи обмотки.
- 3 Энергия в обоих случаях была 511 МэВ. Светимость, измеренная детектором СНД нор-
- 4 мировалась на токи пучков.

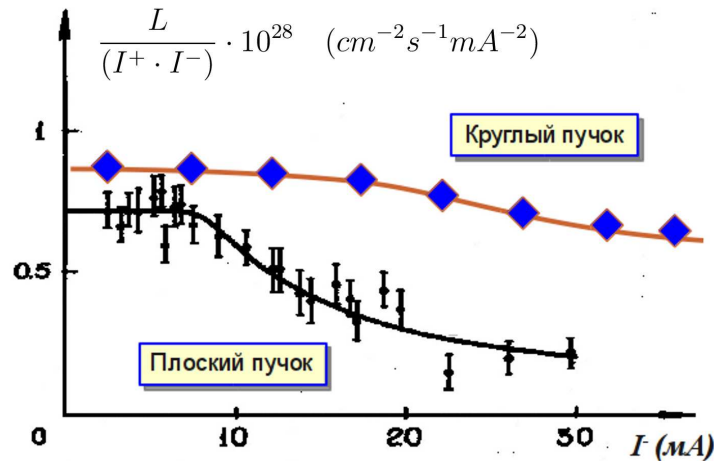


Рис. 5.8. Удельная светимость в зависимости от тока для круглого (ВЭПП-2000, 2008г) и плоского (ВЭПП-2М, 1976 г) пучков.

- 5 Результат такого эксперимента представлен на рисунке 5.8. Как видно из рисун-
- 6 ка, для случая круглого пучка удельная светимость падает по более пологому закону.
- 7 Максимальная светимость достигнутая в ходе эксперимента, равнялась $L = 1.1 \cdot 10^{31}$
- 8 $1/\text{см}^2\text{с}$, а параметр $\xi = 0.1$. На рисунке 5.9 показана измеренная светимость в сравнении
- 9 с расчетной кривой. Недостаток позитронов не позволил получить полного соответствия.

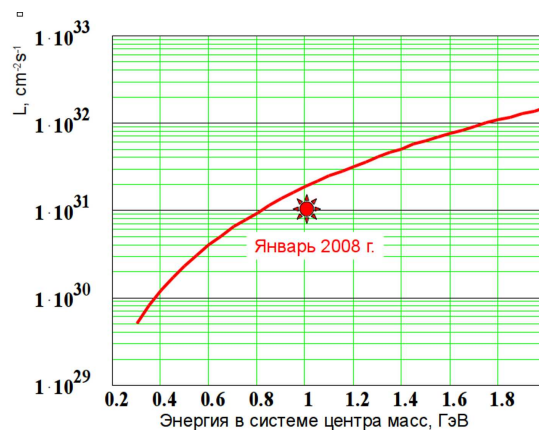


Рис. 5.9. Светимость ВЭПП-2000: Измеренное значение и расчетная кривая.

1 5.5. Подъем энергии ВЭПП-2000 в режиме встречных пучков до 2 1ГэВ

3 В 2010 и 2011 году на ВЭПП-2000 был проведен набор статистики в области энер-
4 гий от 500 МэВ до 1 ГэВ. Было набрано 500 нб^{-1} в каждой из 40 точек, расположенных
5 равномерно по всей исследуемой области с интервалом в 12.5 МэВ. В ходе сканирования
6 проверялась работоспособность различных систем коллайдера и детекторов в широком
7 диапазоне энергий. Одной из значимых трудностей, которая повлияла на время наборо-
8 ра статистики, стало изменение энергии накопительного кольца ВЭПП-2000 в режиме
9 сталкивающихся пучков ("рэмпинг").

10 Максимально-достижимая расчетная энергия бустерного накопителя БЭП – 900
11 МэВ. Соответственно, для работы со встречными пучками на энергиях выше 900 МэВ на-
12 копительное кольцо ВЭПП-2000 должно изменять свою энергию для перехода с энергии,
13 на которой происходит набор светимости, на энергию перепуска и обратно. На практике
14 оказалось, что максимальная энергия БЭП с интенсивным пучком ($I > 40 \text{ мА}$) дополни-
15 тельно ограничена эффектом "голова-хвост" , который возникает из-за насыщения сек-
16 ступольной компоненты в поле этого накопителя. В итоге, максимальная энергия БЭП
17 для перепуска пучков в ВЭПП-2000 оказалась равна 825 МэВ и возникла необходимость
18 "рэмпинга" от этой энергии до 1 ГэВ.

19 Ввиду разности насыщения поворотных магнитов и линз ВЭПП-2000 подъём энер-
20 гии пришлось организовать ступенчатым образом через несколько промежуточных мас-
21 сивов, в каждом из которых настраивалась структура кольца (бетатронные частоты,
22 орбита, электронно-оптическая схема). Переход между массивами осуществлялся линей-
23 ным изменением токов во всех магнитных элементах. Однако оказалось, что бетатронные
24 частоты отклоняются в процессе перехода от рабочей точки на резонансе связи на вели-
25 чину $\sim \pm 0.05$, что ограничивало токи встречных пучков из-за эффектов встречи.

26 Дальнейшее изучение показало, что частота при "рэмпинге" всегда запаздывает
27 относительно изменения энергии. При увеличении энергии частота уходит вниз, а при
28 уменьшении энергии – вверх. После детального разбирательства с причинами проблемы
29 было выяснено, что запаздывание происходит из-за большой индуктивности сверхпро-
30 водящих соленоидов ($L_{N\&T_i} \approx 6 \text{ Гн}$). В частности, это объясняет наблюдаемый эффект
31 изменения частот уже после достижения источниками конечных значений тока. На ри-

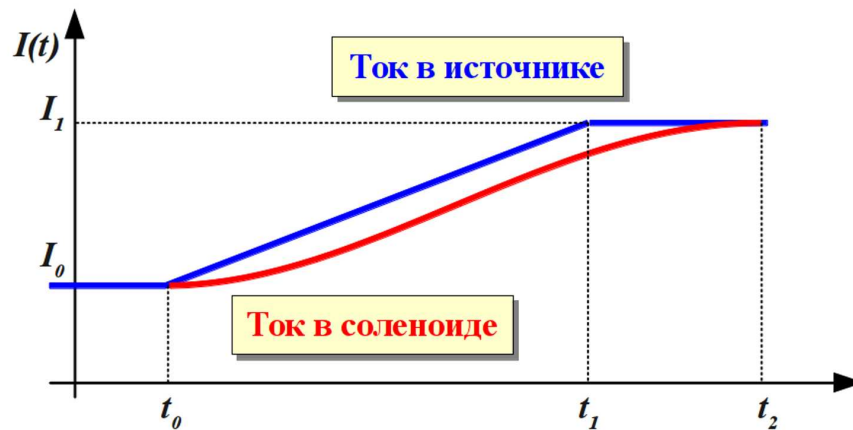


Рис. 5.10. Диаграмма изменения токов в источнике и в соленоиде.

- 1 сунке 5.10 показана диаграмма изменения тока в соленоидах и остальных элементах в
- 2 зависимости от времени.

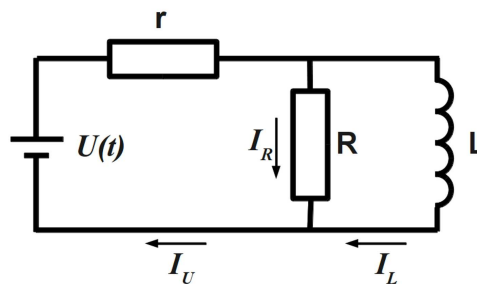


Рис. 5.11. Схема подключения обмотки соленоида.

3 В начале, для компенсации этого эффекта были введены дополнительные массивы с
 4 поперечным сдвигом рабочей точки относительно резонанса связи. Хотя это и позволило
 5 уменьшить сдвиги рабочей точки до $\Delta\nu \approx 0.02$, работать при самых больших энергиях
 6 стало крайне затруднительно в связи с тем, что на настройку всех режимов уходило
 7 больше времени, чем на набор статистики.

8 Выход был найден в специальном подборе формы изменения напряжения источни-
 9 ков питания соленоидов. На рисунке 5.11 показана упрощенная схема включения солено-
 10 ида. R и r – шунтирующее сопротивление и сопротивление токоподводов соответственно,
 11 L – индуктивность катушки соленоида. Запишем правила Кирхгофа для этой схемы:

$$I_U = I_R + I_L$$

$$U = I_U r + I_R R \quad (5.4)$$

$$U = I_U r + L \frac{dI_L}{dt}$$

Выражая I_R и I_U через U и I_L приходим к следующему выражению:

$$U = rI_L + L \frac{r + R}{R} \frac{dI_L}{dt} \quad (5.5)$$

Пусть необходимо, чтобы в некоторый промежуток времени ток в соленоиде изменялся по линейному закону:

$$I_L(t) = I_L(t_0) + kt, \quad k = \frac{I_L(t_1) + I_L(t_0)}{t_1 - t_0} \quad (5.6)$$

Подставляя в 5.5 получим следующую зависимость напряжения источника от времени:

$$U(t) = rI_L(t_0) + rkt + Lk \frac{r + R}{R} \quad (5.7)$$

Вычитая уровень начального напряжения $U(t_0)$, получаем, что кроме линейного изменения источник должен совершить в момент t_0 скачок напряжения:

$$\Delta U = Lk \frac{r + R}{R} \quad (5.8)$$

Так как ВЧ-300 является источником тока, то чтобы получить необходимый скачок напряжения, нужно поднять ток в источнике на величину:

$$\Delta I_U = \frac{L}{R} \left(\frac{I_L(t_1) + I_L(t_0)}{t_1 - t_0} \right) \quad (5.9)$$

Диаграмма изменения тока в источнике и в соленоиде для предложенной схемы представлена на 5.12. Такой метод был опробован экспериментально. Подобранный коэффициент $L/R = 5.7$ позволил сократить уход бетатронных частот до $\Delta\nu \approx 0.01$ и значительно сократить количество необходимых промежуточных массивов и соответственно необходимое время подготовки к набору статистики.

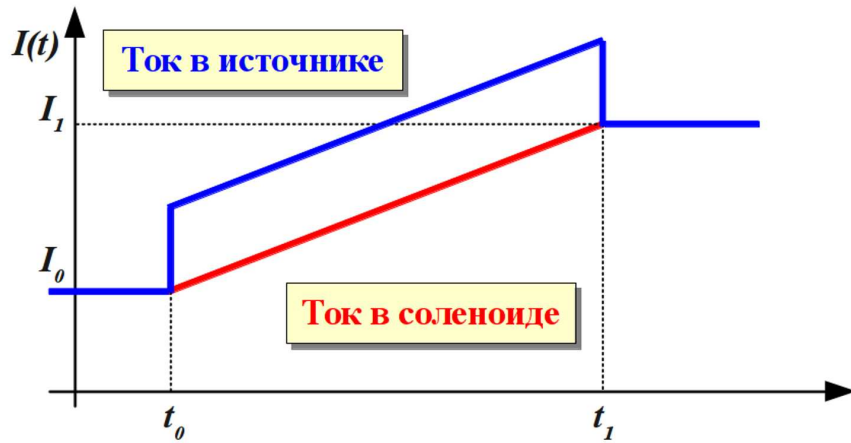


Рис. 5.12. Диаграмма изменения токов в источнике и в соленоиде по новой схеме.

- 1 Описанная схема достижения энергии $E=1$ ГэВ – это временное решение проблемы.
- 2 В данный момент на ВЭПП-2000 идет подготовка к модернизации бустерного накопите-
- 3 ля БЭП и каналов инжекции, чтобы обеспечить возможность работы на полной энергии
- 4 ВЭПП-2000 вплоть до 1 ГэВ. В таком случае ВЭПП-2000 будет работать в режиме "фаб-
- 5 рики".

Заключение

Перечислим основные результаты данной работы:

1. Разработаны принципы построения магнито-оптической системы для нового накопителя с круглыми встречными электрон-позитронными пучками на энергию до 2 ГэВ в системе центра масс.
2. Создана магнитная система установки, включающая в себя поворотные магниты с полем до 24 кГс, квадрупольные линзы с градиентом магнитного поля до 5.2 кГс/см и сверхпроводящие соленоиды финального фокуса с магнитным полем до 13 Т.
3. Реализована автоматизированная система управления и контроля магнитных элементов и источников их питания, построенная на принципах разделения подсистем и предоставляющая широкие возможности для работы операторов комплекса.
4. Настроена система стабилизации и определения энергии пучков в накопителе по измерениям параметров магнитных элементов. Проведена абсолютная калибровка энергии пучков по массе ϕ -мезонного резонанса и по резонансной деполяризации.
5. В двух экспериментальных заходах с детекторами КМД-3 и СНД доказана работоспособность магнитной системы ВЭПП-2000 во всем рабочем диапазоне энергий вплоть до 1 ГэВ.
6. Экспериментально проверена концепция круглых встречных пучков, позволяющая достигнуть величины коэффициента пространственного заряда $\xi = 0.15$.

Автор хотел бы выразить свою глубокую признательность Ю.М.Шатунову и И.А. Копу за общее руководство; своим коллегам по лаборатории Д.Е. Беркаеву, Д.Б. Шварцу, Ю.А. Роговскому, А.Л. Романову, Е.А. Переведенцеву, А.П. Лысенко, И.Н. Нестеренко, А.Н. Кирпотину, В.П. Просветову, О.А. Проскуриной, Р.З. Пронику, Ю.М. Жаринову, М.И. Непомнящих, В.С. Селезневу, Ю.Н. Петрову, за помощь в различных аспектах на всём протяжении работы; А.В. Евстигнееву и Л.М. Щеголеву за конструирование магнитных элементов; Н.А. Мезенцеву, В.А. Шкарубе, В.В. Анашину, А.Н. Драничникову, А.А. Краснову, Н.А. Пименову и С.П. Демину за организацию и поддержку криогеники на ВЭПП-2000; А.С. Медведко, Э.А. Куперу, В.Р. Козаку, О.В. Беликову, В.Ф. Веремеенко,

- 1 Ю.М. Великанову, Г.В. Карпову, К.М. Горчакову и другим сотрудникам лаборатории №6
- 2 за создание источников питания и электроники для управления комплексом ВЭПП-2000;
- 3 моей жене Н.С. Шатуновой за заботу и поддержку.

Приложение А

Детальная структура ВЭПП-2000

В таблице А.1 приведен последовательный список элементов четверти накопительного кольца ВЭПП-2000, начиная от места встречи и заканчивая центром технического промежутка. Также приведены параметры магнитных элементов при энергии 1 ГэВ.

Таблица А.1. Элементы одной четверти кольца ВЭПП-2000 на энергии 1ГэВ

N	Тип	Длина, см	B, кГс	G, кГс/см	Bs, кГс
1	Промежуток	43.85			
2	Соленоид	14			86.7877
3	Промежуток	5.9			
4	Соленоид	52			-113.473
5	Промежуток	22.8			
6	Квадруполь F1	6		0.995	
7	Промежуток	16			
8	Магнит M1	109.956	23.8073		
9	Промежуток	29.5			
10	Квадруполь D1	14		-1.16053	
11	Промежуток	12			
12	Квадруполь F2	19		4.69767	
13	Промежуток	12			
14	Квадруполь D2	14		-2.53251	
15	Промежуток	18			
16	Магнит M2	109.956	23.8073		
17	Промежуток	25			
18	Квадруполь D3	14		-4.69767	
19	Промежуток	4.875			
20	Квадруполь F3	14		4.94065	
21	Промежуток	50.821			

Литература

- 1
- 2 [1] *Auslander V.L. et all.* // Proc. of 7-th Int.Con. on High Energy Acc., Erevan, 1970, v.2,
3 p.26.
- 4 [2] *Budker G.I. et all.* // Proc. of 5-th Int.Con. on High Energy Acc., Frascati, 1965, p.389.
- 5 [3] Накопительное кольцо БЭП. Рабочие материалы: Препринт 83-98. – Новосибирск:
6 ИЯФ СО РАН, 1983.
- 7 [4] *Barkov L.M. et all.* // Proc. of 14-th Int.Con. on High Energy Acc., Tsukuba, 1995, p.1385.
- 8 [5] *Landau L.D., Lifshitz E.M.*. Mechanics. Moscow, 1963.
- 9 [6] *Danilov V.V., Perevedentsev E.A.* // Proc. of 7-th ICFA Beam Dynamics Workshop,
10 Dubna, 1995, p.167.
- 11 [7] *Vasichev S.S. et all.* Precision current source of the inverter type VCH-300-12 to power
12 magnetic systems of accelerators and charged particle storage rings. // XX Russian Particle
13 Accelerator Conference, 10 to 14 September, 2006, Novosibirsk, Russia.
- 14 [8] *Kozak V.* A distributed automation system for electrophysical installations, Automation,
15 Control and Information Technology. – IASTED International Conference, Novosibirsk,
16 Russia, June 20-24, 2005, pp.157-160.
- 17 [9] *Kozak V.R.* Embedded device set for control systems. Implementation and applications.//
18 XX Russian Particle Accelerator Conference, 10 to 14 September, 2006, Novosibirsk, Russia.
- 19 [10] *Vasichev S.S. et all.* Power supplies for the bending magnets of the BEP and VEPP-2000
20 storage ring. // XX Russian Particle Accelerator Conference, 10 to 14 September, 2006,
21 Novosibirsk, Russia.
- 22 [11] Усилители мощности УМ-6 и УМ-20 для питания корректоров комплекса
23 ВЭПП-2000. Препринт 2007-14 / О.В. Беликов, Д.Е. Беркаев, В.Р. Козак, А.С. Мед-
24 ведко. – Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2007.
- 25 [12] CAN in Automation [Электронный ресурс], 2010. <http://www.can-cia.org/>.

- 1 [13] *Лысенко А. П.* – Программа численного моделирования ускорителей и каналов. –
2 ИЯФ СО РАН, Новосибирск.
- 3 [14] *Дубровин А. Н.* – Mermaid User’s Guide, Novosibirsk, 2006. – ИЯФ СО РАН, Новоси-
4 бирск.
- 5 [15] *Batrakov A. et all.* Control and data acquisition systems for high field superconducting
6 wigglers. // 7th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation,
7 Berlin, Germany, August 21-25, 2000.
- 8 [16] *Berkaev D. et al.* First commissioning results of VEPP-2000. // *ICFA Beam*
9 *Dyn.Newslett.* –2009. –Vol.48. –Pp. 235-242.
- 10 [17] *Ivanov P.M. et all.* Luminosity and Beam-Beam Effects on the Electron-Positron Storage
11 Ring VEPP-2M with Superconducting Wiggler Magnet. //Proceedings of the Third
12 Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Beam-Beam Effects in Circular Colliders.
13 pp. 26-33.
- 14 [18] Изучение эффектов электромагнитного взаимодействия встречных пучков в нако-
15 пителе ВЭПП-2М. Препринт 76-79 / И.Б. Вассерман, И.А. Кооп, С.И. Мишнев, Г.М.
16 Тумайкин, Ю.М. Шатунов. – Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1976.
- 17 [19] *Nesterenko I. et all.* // Proc. of Mini-Workshop on “Round beams and related concepts
18 in beam dynamics”, Fermilab, December 5-6, 1996.
- 19 [20] *Valishev A. et all.* Strong Strong Simulation of Beam Beam Interaction for Round Beams.
20 Novosibirsk, IYF & КЕК, Tsukuba. PAC03-FPAB051. May, 2003.
- 21 [21] *Бакланов Б.А. и др.* //Труды 7-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряжен-
22 ных частиц. Дубна 1980г. т.1. стр 338.
- 23 [22] *Hofmann A.* Transporting the energy calibration across optics. // Proceedings of 3rd
24 Workshop on LEP performance, Chamonix, France, 10 - 16 Jan 1993, pp.303-308.
- 25 [23] Прецизионные магнитометры на основе ЯМР в стандарте VME. Препринт 2004-55 /
26 Г.В. Карпов, А.С. Медведко, Е.И. Шубин. – Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2004.

- 1 [24] *Perevedentsev E.A., Ptitsyn V.I., Shatunov Yu.M.* // Proc. of the 15-th Spin Physics
2 Symposium SPIN-2002, p. 761, 2002.
- 3 [25] *Koop I.A. et al.* Plans for polarized beams at VEPP-2000 and U-70. Novosibirsk, IYF.
4 2007. 9 pp.
- 5 [26] *Середняков С.И. , Скринский А.Н. , Тумайкин Г.М. , Шатунов Ю.М.* ЖЭТФ 71,
6 2025, 1976.
- 7 [27] *Berkaev D. et al.* Vepp-2000 collider control system.– Prepared for ICALEPCS'09, Kobe,
8 Japan, 10-17 Oct, 2009.
- 9 [28] *Achasov M.N. et al.* Spherical neutral detector for VEPP-2M collider. // *Nucl. Instrum.*
10 *Meth.* –2000. A449. pp.125-139.
- 11 [29] *Anashkin E.V. et al.* The CMD-2 cryogenic magnetic detector. // *Instrum. Exp. Tech.*
12 . –2006. –Vol.49. –pp. 798-814.
- 13 [30] *Khazin B.* Physics and detectors for VEPP-2000. –Published in *Nucl.Phys.Proc.Suppl.*
14 181-182. 2008. pp.376-380.
- 15 [31] *Antonov A.N. et al.* The electron-ion scattering experiment ELISe at the International
16 Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR): A conceptual design study. // *Published*
17 *in Nucl.Instrum.Meth.* –2011. –A637. –pp. 60-76.
- 18 [32] *Romanov A. et al.* Round Beam Lattice Correction using Response Matrix at
19 VEPP-2000. –Prepared for IPAC-2010. May 2010.