

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

*На правах рукописи*

БЕРКАЕВ ДМИТРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ИНЖЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ  
В КОЛЛАЙДЕР 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

НОВОСИБИРСК – 2010

## Содержание

<b>Введение</b> . . . . .	3
<b>Глава 1. Проект ВЭПП-2000</b> . . . . .	5
1.1. Накопитель-охладитель БЭП . . . . .	6
1.2. Коллайдер ВЭПП-2000 . . . . .	7
1.3. Инжекция в ВЭПП-2000 . . . . .	8
1.3.1. Инфлектор бегущей волны . . . . .	9
1.3.2. Геометрическая апертура структуры ВЭПП-2000 . . . . .	11
1.4. Акцептанс структуры ВЭПП-2000 . . . . .	13
<b>Глава 2. Физический проект каналов инжекции частиц в коллайдер ВЭПП-2000</b>	18
2.1. Геометрия каналов инжекции . . . . .	18
2.2. Общий вид каналов инжекции . . . . .	19
2.3. Оптика каналов инжекции . . . . .	21
2.4. Магнитные элементы каналов инжекции . . . . .	25
2.4.1. Магниты $17.2^\circ$ и $41.2^\circ$ . . . . .	25
2.4.2. Импульсные квадрупольные линзы . . . . .	27
2.4.3. Магнитные измерения квадрупольной линзы . . . . .	29
2.4.4. Выпускной магнит БЭП — магнит М1. . . . .	31
2.4.5. Магниты МZ и МX . . . . .	33
2.4.6. Впускной промежуток . . . . .	34
2.4.7. Корректирующие магниты . . . . .	37
<b>Глава 3. Система измерения параметров пучка в транспортных каналах</b> . . . . .	39
3.1. Вторично-эмиссионные датчики . . . . .	39
3.2. Датчики тока изображения . . . . .	42
3.3. Аппаратное и программное обеспечение . . . . .	43
3.4. Пример измерения с помощью системы ИПП: электронная оптика в начале каналов . . . . .	47

<b>Глава 4. Система автоматизации каналов инжекции</b> . . . . .	49
4.1. Управление импульсными элементами каналов . . . . .	50
4.2. Управление источниками постоянного тока . . . . .	52
4.3. Управление генераторами инфлекторов . . . . .	53
4.4. Система синхронизации каналов . . . . .	54
4.5. Структура программного обеспечения . . . . .	56
4.6. Программы управления и контроля . . . . .	58
4.6.1. Управление каналами инжекции в ВЭПП-2000 . . . . .	59
4.6.2. Контроль импульсных источников питания . . . . .	64
4.6.3. Управление генераторами инфлекторов . . . . .	65
<b>Заключение</b> . . . . .	69
<b>Приложение А. Датчик тока изображения</b> . . . . .	72
А.1. Вычисление заряда и числа частиц в пучке . . . . .	72
А.2. Вычисление координат . . . . .	73
<b>Литература</b> . . . . .	74

## Введение

Начиная с 1974 г. электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2М в Новосибирске успешно работал в диапазоне энергий от порога рождения адронов до 1.4 ГэВ в с.ц.м. С помощью двух современных детекторов СНД и КМД-2 был набран интеграл светимости порядка  $74 \text{ пбн}^{-1}$ . Это позволило детально изучить большинство каналов адронной  $e^+e^-$  аннигиляции.

Весной 2000 года в ИЯФ СО РАН принято решение о модернизации ускорительного комплекса ВЭПП-2М для повышения светимости и увеличения максимальной достижимой энергии до 2 ГэВ, что позволит существенно расширить потенциал доступных экспериментов на комплексе. Кроме того, этот коллайдер позволит проверить концепцию круглых сталкивающихся пучков. Новый проект получил название ВЭПП-2000.

В связи с значительной модернизацией комплекса возникла необходимость проектирования новых каналов транспортировки и инжекции электронов и позитронов из бустерного накопителя БЭП в кольцо коллайдера ВЭПП-2000. Несмотря на то, что это кольцо имеет геометрию, похожую на ВЭПП-2М, модифицировать старые каналы не представлялось возможным, так как они рассчитаны на максимальную энергию 600 МэВ, и транспортируют пучки в те места, где у новой машины будут располагаться триплеты квадрупольных линз.

Новые каналы, должны быть рассчитаны на энергию вплоть до 900 МэВ и транспортировать  $10^8 - 10^{11}$  частиц в пучке, а также обеспечивать согласование оптических функций колец БЭП и ВЭПП-2000.

Целью данной работы является создание каналов транспортировки и инжекции электронов и позитронов в новый коллайдер ВЭПП-2000. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи: расчёт основных параметров однооборотной инжекции в электронно-оптическую структуру нового коллайдера ВЭПП-2000; расчёт геометрии, оптической схемы, а также расчёт магнитных параметров элементов каналов инжекции из бустерного накопителя БЭП в новый коллайдер ВЭПП-2000; создание системы измерения параметров пучков в каналах и создание системы автоматизации управления этими каналами, интегрированной в общую систему автоматизации всего ускорительного комплекса ВЭПП-2000.

Разработка и создание каналов транспортировки и инжекции электронов и позитронов в новое кольцо коллайдера ВЭПП-2000 с максимальной эффективностью позволили

достичь проектных параметров светимости на энергии  $\varphi$ -мезона и приступить к выполнению физической программы коллайдера ВЭПП-2000.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

1. Рассчитан аксептанс структуры кольца коллайдера ВЭПП-2000 в различных режимах работы.
2. Разработан физический проект каналов инжекции электронов и позитронов в коллайдер ВЭПП-2000, рассчитаны геометрия и система фокусировки этих каналов.
3. Произведены магнитные расчеты всех элементов каналов инжекции, проведенные магнитные измерения показали хорошее соответствие параметров расчетным значениям.
4. Создана автоматизированная система наблюдения за пучков в каналах инжекции.
5. Создана современная система управления каналами, интегрированная в систему автоматизации всего ускорительного комплекса ВЭПП-2000.

## Проект ВЭПП-2000

Создаваемый в ИЯФ СО РАН новый электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000 рассчитан на энергию 2 ГэВ в с.ц.м. и светимость  $1 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  [1, 2]. Кроме экспериментов в области физики высоких энергий, которые будут проводиться с помощью двух современных детекторов КМД-3 и СНД, проект позволит экспериментально проверить концепцию «круглых пучков» [3, 4], имеющую важное значение в физике циклических ускорителей. Схема нового ускорительного комплекса представлена на рисунке 1.1.

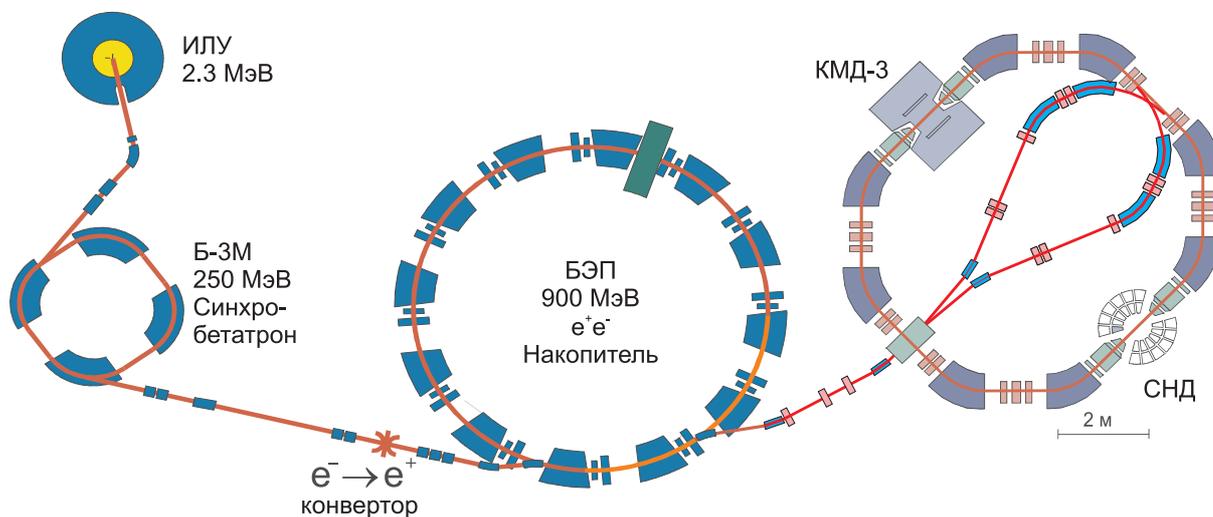


Рис. 1.1. Схема ускорительного комплекса ВЭПП-2000.

Импульсным линейным ускорителем (ИЛУ) электронный пучок ускоряется до 2.3 МэВ, затем инжектируется в кольцо Б-3М, работающее в синхробетатронном импульсном режиме. В этом кольце электронный пучок ускоряется до 125 или 250 МэВ за 200 мкс. Пучок  $e^-$  125 МэВ накапливается в бустерном кольце БЭП, а затем ускоряется до энергии эксперимента (или до 900 МэВ) и инжектируется в коллайдер ВЭПП-2000. Для перехода в режим накопления позитронов БЭП изменяет полярность на противоположную. В этом режиме пучок электронов с энергией 250 МэВ из Б-3М фокусируется на вольфрамовую мишень  $e^- \rightarrow e^+$  конвертора. Полученные позитроны, в свою очередь фокусируются, и на энергии, в два раза меньшей — 125 МэВ, накапливаются в кольце БЭП. Затем, ускорившись, также инжектируются в кольцо ВЭПП-2000 в противоположном электронам направлении. После чего цикл работы комплекса повторяется.

## 1.1. Накопитель-охладитель БЭП

Накопительное кольцо БЭП (Бустер Электрон-Позитронный) способно накапливать пучки до 2 А, с максимальной энергией 900 МэВ. Кольцо БЭП — это жёстко-фокусирующая структура, состоящая из 12 периодов, каждый из которых представляет собой элементарную FODO-ячейку. Огибающие и дисперсионная функция одного периода такой структуры изображены на рисунке 1.2 [5].

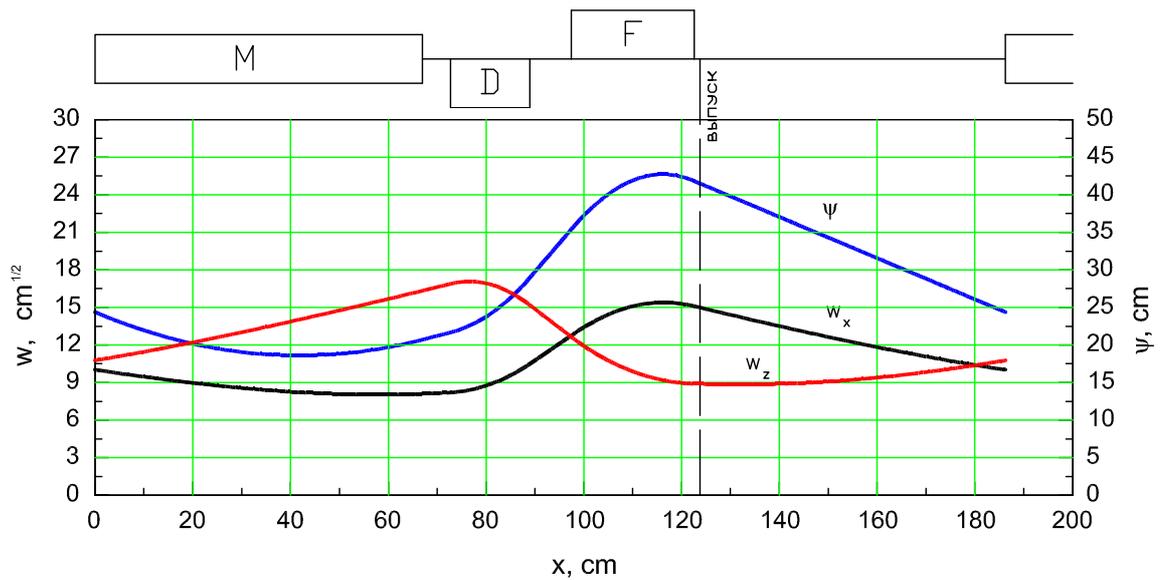


Рис. 1.2. Оптические функции одного периода структуры БЭП

Оптические функции БЭП в месте выпуска:

$$\begin{aligned} \beta_x &= 224.5 \text{ см}, & \alpha_x &= 1.1, & \beta_z &= 78.9 \text{ см}, & \alpha_z &= 0.1, \\ \psi_x &= 41.5 \text{ см}, & \psi'_x &= -0.275, & \psi_z &= 0, & \psi'_z &= 0. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Таблица 1.1. Основные параметры кольца БЭП.

Число периодов	$N$	12
Максимальная энергия, МэВ	$E_{max}$	900
Периметр, м	$\Pi$	22.35
Бетатронные частоты	$Q_x$	3.46
	$Q_z$	2.85
Коэффициент уплотнения орбит	$\alpha$	0.056
Времена затухания, мс	$\tau_x$	3.5
	$\tau_z$	2.95
	$\tau_s$	1.37
Поле в магните, кГс	$H_z$	23.46
Градиенты в линзах, кГс/см	$G_D$	-4.46
	$G_F$	3.03
Средний разброс энергий	$\sigma$	$6.56 \cdot 10^{-6}$
Эмиттансы, см·рад	$\varepsilon_x$	$6.47 \cdot 10^{-6}$
	$\varepsilon_x$	$1 \cdot 10^{-8}$

Как видно из таблицы 1.1, отличительной особенностью накопительного кольца БЭП является малый эмиттанс пучка.

## 1.2. Коллайдер ВЭПП-2000

Оптика нового коллайдера определяется требованиями, накладываемыми концепцией круглых пучков: равные горизонтальная и вертикальная бета-функции в месте встречи, равные горизонтальный и вертикальный эмиттансы и равные дробные части бетатронных частот. Все эти требования удается реализовать с помощью двух пар сверхпроводящих соленоидов, образующих симметричную финальную фокусировку в двух местах встречи, оборудованных детекторами. Сильная соленоидальная фокусировка обеспечивает малые и равные бета-функции в месте встречи и  $90^\circ$  поворот плоскостей бетатронных колебаний при каждом проходе пучком места встречи. Симметричная фокусировка в арках и варьирующаяся плоскость колебаний нормальных мод автоматически приводят к одинаковым эмиттансам и

равным дробным частям бетатронных частот [6].

Благодаря этим особенностям в такой оптике появляется новый интеграл движения, который приводит к улучшению стабильности даже с учётом нелинейных эффектов встречи. Этот новый подход к оптике обосновывает предположение о большей достижимой светимости в новой структуре коллайдера.

Недостаток места для коллайдера обуславливает применение сильных магнитов ведущего поля. Для достижения энергии в 1 ГэВ требуется поле 24 кГс. Оптическая структура включает в себя шесть семейств квадрупольей с максимальным градиентом 5 кГс/см, которые имеют независимое питание. Выбранное оптическое решение имеет преимущество нулевой дисперсии в местах встречи, а также в резонаторном и инжекционном промежутках.

В кольце коллайдера установлено три семейства секступольей. Коррекция хроматизма производится за счет семейств секступольей  $S_x$  и  $S_z$ , расположенных в квадрупольных триплетах в местах с ненулевой дисперсионной функцией. Последнее семейство секступольей расположено в местах, где отсутствует дисперсия и предназначено для улучшения динамической апертуры.

Коррекция горизонтальной и вертикальной орбиты производится с помощью 20 горизонтальных и 20 вертикальных дипольных коррекций, совмещенных с квадрупольными линзами. Для коррекции ведущего поля предусмотрено 8 дополнительных горизонтальных дипольных коррекций, расположенных в поворотных магнитах.

Основные характеристики коллайдера ВЭПП-2000 приведены в таблице 1.2 [7].

### 1.3. Инжекция в ВЭПП-2000

В новом проекте инжекция пучков производится в дальний от БЭП промежуток с нулевой дисперсией, расположенный симметрично между соленоидами. В таком варианте траектория инжектированного пучка не будет зависеть от величины полей сверхпроводящих соленоидов, что позволит использовать в экспериментах различные оптические схемы: круглые пучки, плоские пучки, одинарный и двойной мёбиус.

Бустерное кольцо БЭП способно накапливать пучки с энергией до 900 МэВ. Поэтому, работа на низких энергиях может осуществляться с непрерывной инжекцией пучка из бустера в накопительное кольцо на энергии эксперимента. Работа в диапазоне от 900 МэВ до 1 ГэВ потребует подъема энергии пучка после инжекции до энергии эксперимента. В свя-

Таблица 1.2. Основные параметры коллайдера ВЭПП-2000 на энергии  $E=1000$  МэВ

Периметр, м	$\Pi$	24.388
Частота ВЧ, МГц	$f_0$	172.0
Напряжение ВЧ, кВ	$V$	120
ВЧ гармоника	$q$	14
Коэффициент уплотнения орбит	$\alpha$	0.036
Синхротронная частота	$\nu_s$	0.003
Эмиттансы, см · рад	$\varepsilon_x, \varepsilon_z$	$2.2 \cdot 10^{-5}$
Потери энергии/оборот, кэВ	$\Delta E_0$	41.5
Энергетический разброс	$\sigma$	$7.0 \cdot 10^{-4}$
$\beta_x, \beta_z$ в месте встречи, см	$\beta_x^*, \beta_z^*$	10
Бетатронные частоты	$Q_x, Q_z$	4.1, 2.1
Число частиц в сгустке	$e^-, e^+$	$1.0 \cdot 10^{11}$
Число сгустков		$1 \times 1$
Сдвиги частот	$\xi_x, \xi_z$	0.075, 0.075
Светимость на одно место встречи, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$L_{max}$	$1.0 \cdot 10^{32}$

зи с этим, каналы инжекции в ВЭПП-2000 целесообразно рассчитывать на максимальную энергию в те же 900 МэВ.

### 1.3.1. Инфлектор бегущей волны

Для однооборотной инжекции в коллайдер ВЭПП-2000 применяются инфлекторы бегущей волны (рисунок 1.3). Инфлекторные пластины выполнены в виде несимметричных полосковых линий, установленных по внутреннему радиусу кольца, и расположены в вакуумной камере внутри поворотных магнитов, примыкающих ко впускному промежутку. Для реализации идеи накопления пучков применяются два инфлектора: предудар накопленного пучка и удар накопленного и впускаемого пучков.

Поле такого инфлектора, рассчитанное программой *MERMAID* [8] представлено на рисунке 1.4. Номинальное напряжение на пластине инфлектора равно 50 кВ для инжекции на энергии 900 МэВ. Длина инфлектора по орбите составляет 136 см.

Поскольку инфлекторы работают в режиме встречной бегущей волны (чтобы исключить влияние на попутный пучок), то при переходе с одного режима на другой необходимо изменить не только полярность импульсов, но и направление распространения волны [7, 9].

Процедура накопления пучка с предупредом захваченного в ВЭПП-2000 пучка представлена на рисунке 1.5. Как видно из рисунка, при размере ножа впускного магнита  $2.5 \text{ мм}^1$  оптимальным напряжением *преддара* является  $35 \text{ кВ}$ . При этом накопленный пучок имеет фазовые координаты в месте инъекции (синий пунктирный график на рисунке 1.5):

$$x = -0.59 \text{ см}, \quad x' = -0.22 \text{ мрад.} \quad (1.2)$$

Впускаемый пучок представлен на рисунке 1.5 красной сплошной линией.

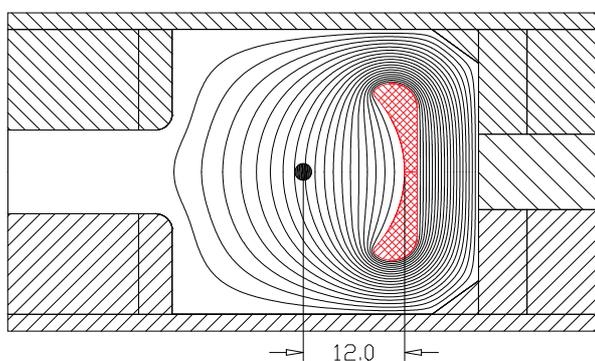


Рис. 1.3. Расположение инфлятора в вакуумной камере. Поперечное сечение.

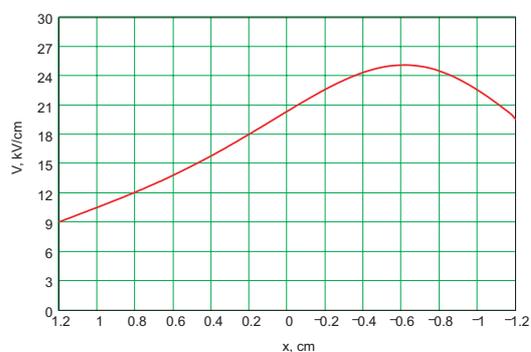


Рис. 1.4. Поле инфлятора  $U = 50 \text{ кВ}$ .  $x = 0$  соответствует центру вакуумной камеры.

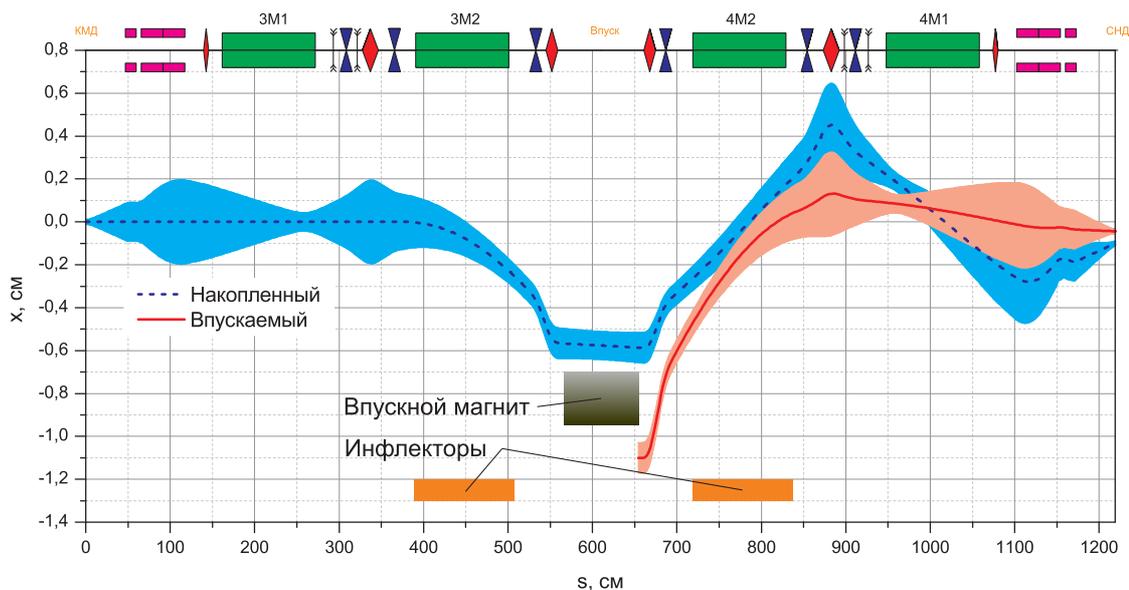


Рис. 1.5. Накопление пучка с предупредом. Удар —  $50 \text{ кВ}$ , предупред —  $35 \text{ кВ}$ .

<sup>1</sup> Конструкция впускного магнита более подробно описана во второй главе, п.2.4.6

Для питания инфлекторных пластин ВЭПП-2000 было создано два типа генераторов: электронный (положительной полярности) и позитронный (отрицательной полярности). Кроме этого, накопление частиц в коллайдере предполагает использование пары генераторов каждого типа: одного предупредного и одного ударного. Разработанные в ИЯФ СО РАН генераторы обеспечивают до 50 кВ импульсного напряжения на инфлекторных пластинах в бегущей волне длительностью 20–25 нс.

### 1.3.2. Геометрическая апертура структуры ВЭПП-2000

Ограничения геометрической апертуры кольца связаны с внутренним размером вакуумной камеры в местах, где  $\beta$ -функция достигает своего максимума. Геометрическая апертура без учета размеров пучков может быть рассчитана по формуле:

$$A(s) = \frac{A_{max}}{\sqrt{\beta_{max}}} \cdot \sqrt{\beta(s)}, \quad (1.3)$$

где  $A_{max}$  — апертурное ограничение вакуумной камеры в тех местах, где  $\beta$ -функция достигает своего максимума —  $\beta_{max}$ .

Изначально коллайдер ВЭПП-2000 проектировался с  $\beta^* = 6.25$  [10]. Оптические функции такой структуры представлены на рисунке 1.6.

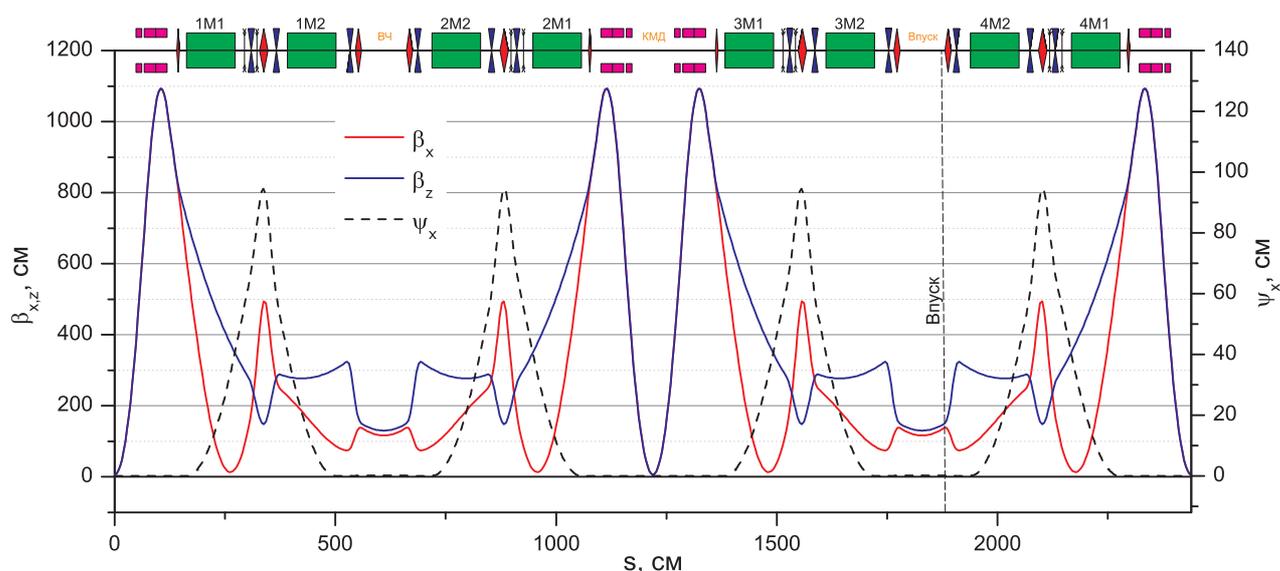


Рис. 1.6. Оптические функции коллайдера ВЭПП-2000.  $\beta^* = 6.25$  см.

Значение оптических функций в месте впуска, расположенном на расстоянии 62 мм от

квадрупольной линзы, для такой структуры составляют

$$\begin{aligned} \beta_x &= 134 \text{ см}, & \alpha_x &= -0.38, & \beta_z &= 145.5 \text{ см}, & \alpha_z &= -0.34, \\ \psi_x &= 0, & \psi'_x &= 0, & \psi_z &= 0, & \psi'_z &= 0. \end{aligned} \quad (1.4)$$

На рисунке 1.7 показана геометрическая апертура структуры ВЭПП-2000 с  $\beta^* = 6.25$ , рассчитанная по формуле (1.3). При этом  $A_{max} = 2$  см, а  $\beta_{max} = 1093$  см — апертура и  $\beta$ -функция в соленоидах финального фокуса. При определении минимально возможной апертуры между равновесной орбитой и ножом впускного магнита можно не учитывать дисперсию благодаря тому, что и в экспериментальных, и в технических — ВЧ и инжекционном — промежутках дисперсионная функция равна нулю (пунктирный график на рисунке 1.7).

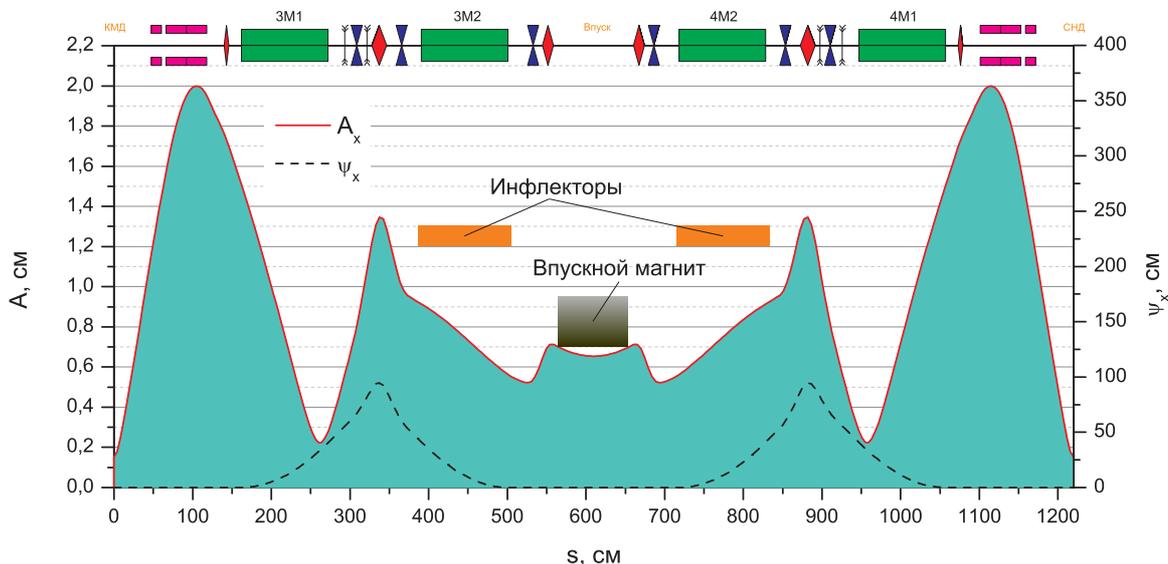


Рис. 1.7. Геометрическая апертура половины кольца ВЭПП-2000.  $\beta^* = 6.25$  см, расстояние от равновесной орбиты до ножа впускного магнита — 0.7 см.

Таким образом, как видно из графика на рисунке 1.7, при проектировании впускного участка, чтобы не ухудшить геометрический аксептанс кольца, следует отодвинуть нож впускного магнита по крайней мере на 0.7 см от равновесной орбиты во впускном промежутке. Такое расстояние и было заложено в проект инжекционных каналов ускорительного комплекса ВЭПП-2000.

Однако, уже в процессе ввода ускорительного комплекса ВЭПП-2000 в эксплуатацию было решено перейти к режиму  $\beta^* = 10$  см, который соответствует более оптимальной работе коллайдера и обеспечивает большую динамическую апертуру [11]. Оптические функции такой модифицированной оптической структуры представлены на рисунке 1.8.

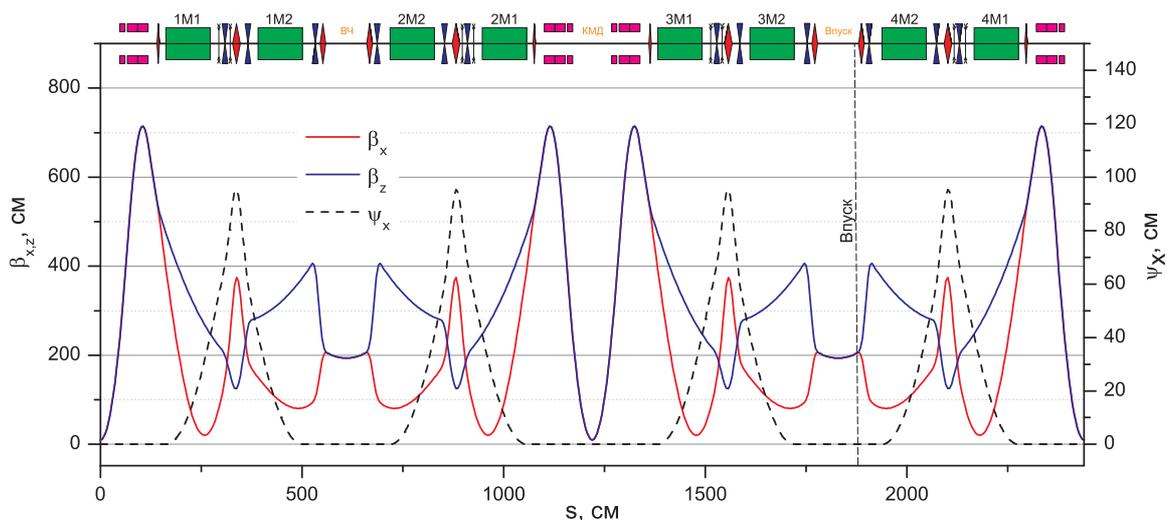


Рис. 1.8. Оптические функции коллайдера ВЭПП-2000.  $\beta^* = 10$  см.

Значение оптических функций в месте впуска для данной структуры составляют

$$\begin{aligned} \beta_x = 204 \text{ см}, \quad \alpha_x = -0.23, \quad \beta_z = 204 \text{ см}, \quad \alpha_z = -0.23, \\ \psi_x = 0, \quad \psi'_x = 0, \quad \psi_z = 0, \quad \psi'_z = 0. \end{aligned} \quad (1.5)$$

В данной структуре максимальное значение  $\beta$ -функций в соленоидах финального фокуса составляет  $\beta_{sol} = 714$  см, а в месте инжекции —  $\beta_{sept} = 205$  см. В такой ситуации геометрическое ограничение определяется не внутренней апертурой вакуумной камеры соленоидов — 2 см, а ножом впускного магнита — 0.7 см. Для данных условий график физической апертуры представлен на рисунке 1.9.

Для того, чтобы “освободить” всю апертуру соленоидов для движения частиц, потребовалось бы отодвинуть нож впускного магнита по крайней мере на 1.1 см, как это видно из соотношения:

$$\frac{\sqrt{\beta_{sept}}}{\sqrt{\beta_{sol}}} \cdot A_{sol} = \frac{\sqrt{205 \text{ см}}}{\sqrt{714 \text{ см}}} \cdot 2.0 \text{ см} = 1.07 \text{ см}.$$

Такая модификация не представляется возможной, поскольку это потребовало бы увеличения напряжения удара до 60 кВ и более, что, в свою очередь, привело бы к необходимости разработки принципиально нового типа генераторов ударов и предударов.

#### 1.4. Акseptанс структуры ВЭПП-2000

Численное моделирование прохождения впускаемого пучка в полях нелинейного инфлектора моделировалось при помощи комбинации мультиполей, соответствующих расчет-

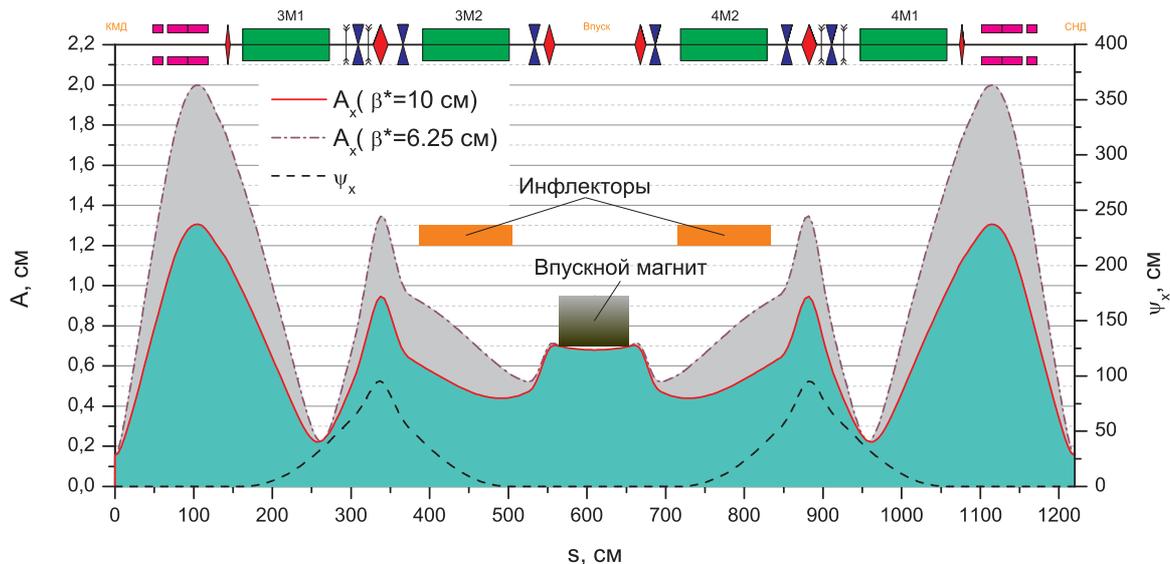


Рис. 1.9. Геометрическая апертура половины кольца ВЭПП-2000.  $\beta^* = 10$  см. Ограничение связано с апертурой в месте впуска – 0.7 см

ному распределению полей (рисунок 1.4). Магнитное поле корректора, моделирующего на первом обороте влияние инфлектора, выражается следующей формулой:

$$H_z + iH_x = HZ + iHX + P4(x + iz) + P6 \frac{(x + iz)^2}{2} + P8 \frac{(x + iz)^3}{3!} + P10 \frac{(x + iz)^4}{4!} + \dots, \quad (1.6)$$

где  $P4$ ,  $P6$ , ... — мультиполи, причем  $P4$  соответствует квадруполю,  $P6$  — секступолю,  $P8$  — октуполю, и т.д. В таблице 1.3 представлено разложение поля инфлектора (см. рисунок 1.4) при напряжении на пластине 50 кВ.

Таблица 1.3. Разложение поля инфлектора по мультиполям.  $U = 50$  кВ.

Мультиполь	$H_z$	$P4(Q)$	$P6(S)$	$P8$	$P10$	$P12$	$P14$	$P16$
Значение	0.1361	-0.0708	-0.0195	0.2857	-0.57	-1.0054	5.5737	-3.6219

Ансамбль частиц, моделирующих геометрический аксептанс пучка запускался в направлении, противоположном реальной инжекции пучка. Т.н. процедура трекинга была проведена в программе *RING* [12]. После прохождения нелинейного корректора, имитирующего инфлектор, вычислялись координаты на фазовой плоскости всего ансамбля частиц в месте предполагаемой инжекции, при этом угловая координата —  $x'$  — инвертировалась для перехода к нормальному направлению впуска. Схематически данный подход представлен на рисунке 1.10.

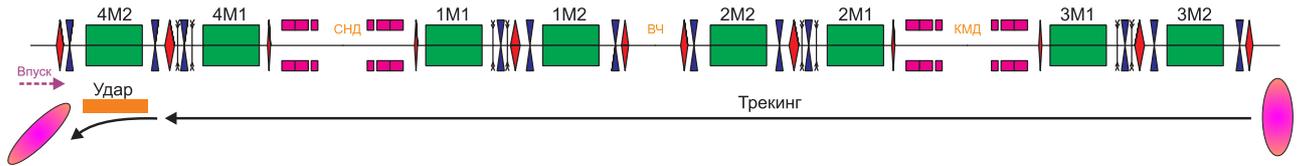
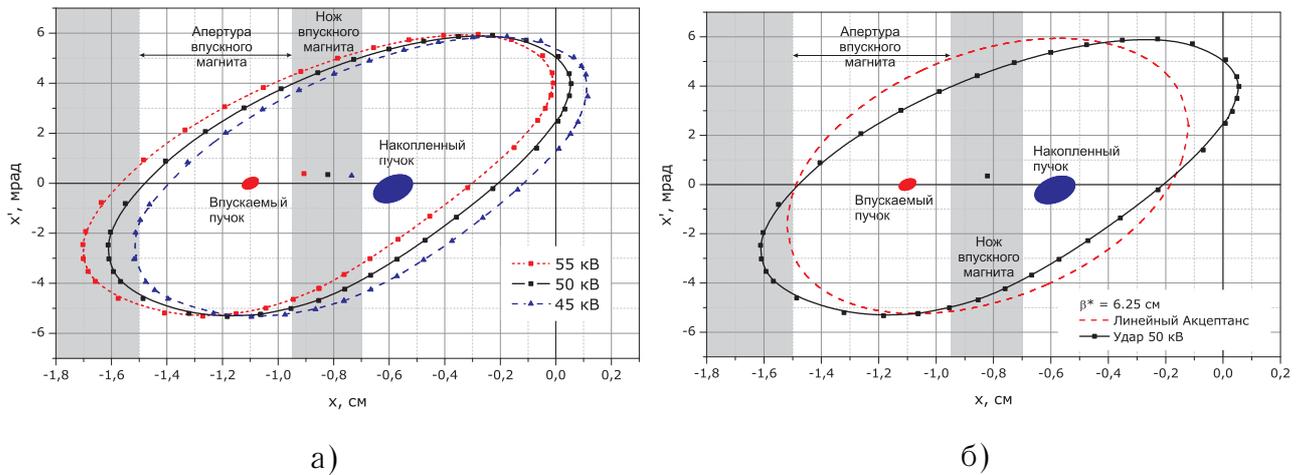
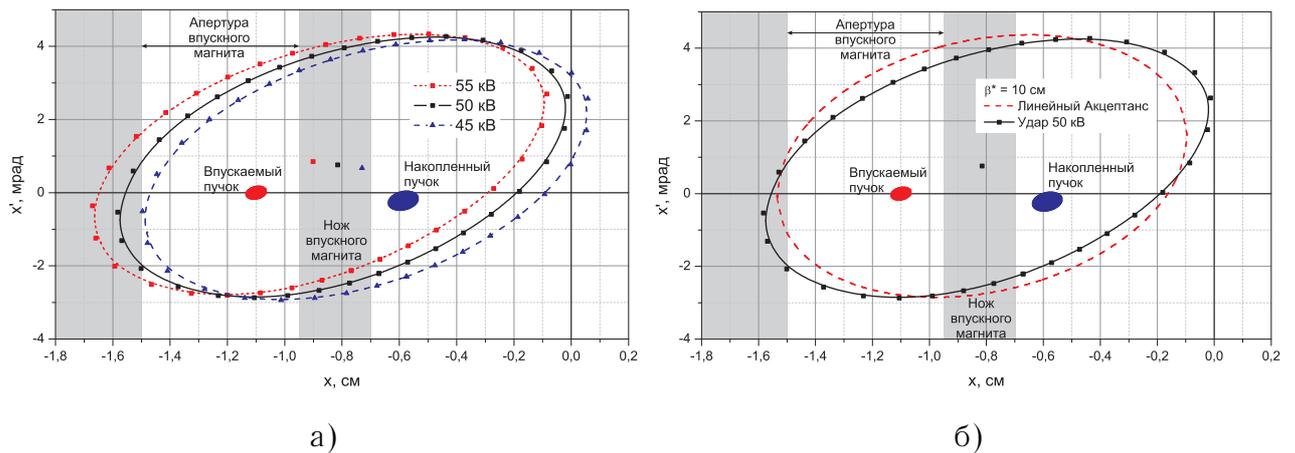


Рис. 1.10. Схема расчета акцептанса.

Результатом такой процедуры явился акцептанс кольца ВЭПП-2000 *в месте инжекции*.

Рис. 1.11. Акцептанс ВЭПП-2000 для структуры с  $\beta^* = 6.25$  см в месте инжекции.Рис. 1.12. Акцептанс ВЭПП-2000 для структуры с  $\beta^* = 10$  см в месте инжекции.

На рисунках 1.11 и 1.12 представлены акцептансы структуры ВЭПП-2000 в месте инжекции, т.е. на выходе из впускного магнита, рассчитанные для различных оптических схем с  $\beta^*$  равными 6.25 и 10 см соответственно. Накопленный пучок испытывает предудар 35 кВ

и имеет координаты как указано в (1.2), а оптические функции (1.4) и (1.5).

Как видно из рисунков 1.11а и 1.12а, при размере ножа впускного магнита 2.5 мм оптимальным ударом для обеспечения устойчивого накопления (т.е. обеспечения как сохранения уже накопленного в коллайдере пучка, так и захвата впускаемого) является напряжение инфлектора 50 кВ. При этом “центр” акцептанса (точка в центре графика) приходится на середину ножа впускного магнита, открывая, тем самым, максимальное пространство для движения обоих пучков.

На рисунках 1.11б и 1.12б приведено сравнение линейных акцептансов, рассчитанных в соответствии с оптическими функциями (1.4) и (1.5), и акцептансов с учетом нелинейности инфлектора. Основное различие связано с некоторым дефокусирующим влиянием инфлектора — коэффициент  $Q$  в таблице 1.3 разложения поля по мультиполям.

Однако, поскольку основная задача инжекции в ВЭПП-2000 — захват впускаемого пучка и сохранение уже накопленного, т.е. минимизация их совместных колебаний, то связанное с нелинейностью инфлектора различие акцептансов представляется несущественным. Это означает, что для дальнейшего расчета согласования оптических функций канала и кольца ВЭПП-2000 достаточно использовать линейные оптические функции кольца в месте инжекции.

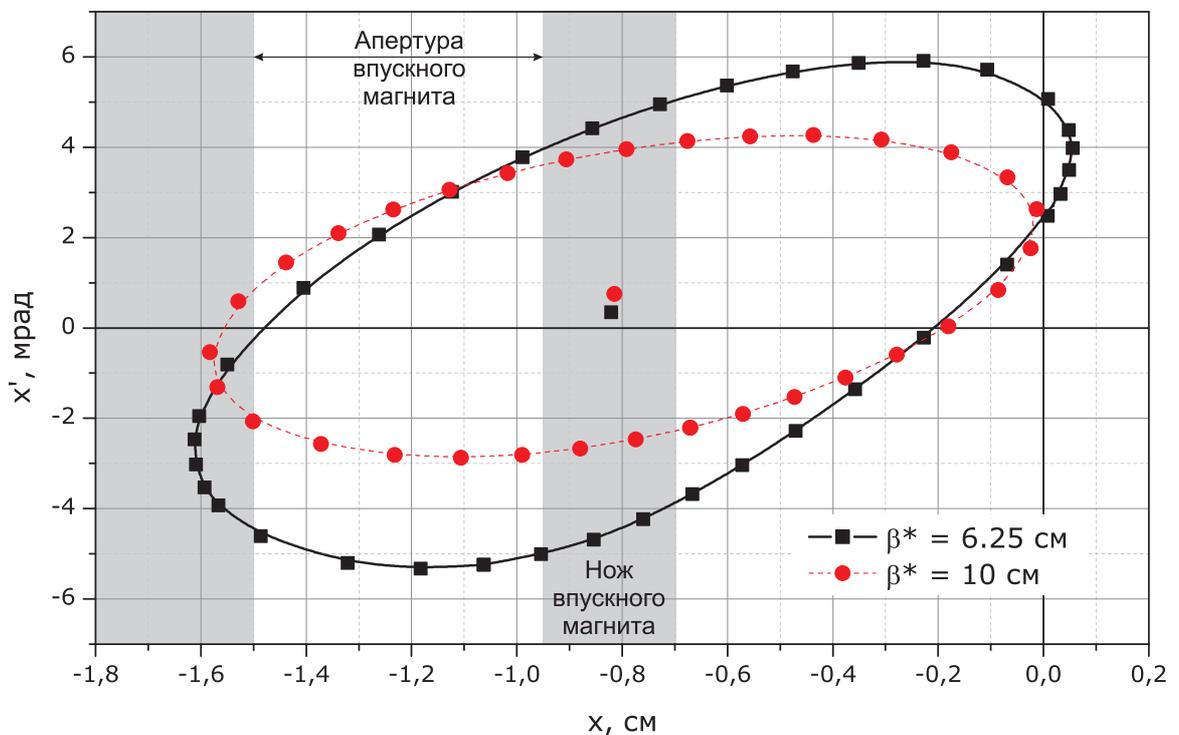


Рис. 1.13. Сравнение акцептансов ВЭПП-2000 в месте инжекции для структур с различными  $\beta^*$ .

Как видно из рисунка 1.13, структура с  $\beta^* = 6.25$  см является более предпочтительной с точки зрения инъекции и накопления пучков, так как “предоставляет” больший фазовый объем для движения пучков. Однако, стоит отметить, что выбор оптической структуры для инъекции не может быть сделан без учета других факторов, влияющих на движение пучков в коллайдере. Наиболее важными из них, могут являться динамическое движение частиц с учетом нелинейных полей, а также т.н. эффекты встречных пучков. По-видимому, окончательный выбор может быть сделан с помощью экспериментов на коллайдере ВЭПП-2000.

## Физический проект каналов инжекции частиц в коллайдер ВЭПП-2000

Для инжектирования в кольцо ВЭПП-2000 пучок должен пройти из бустерного накопителя БЭП на энергии 900 МэВ, с эмиттансами  $\varepsilon_x = 6.48 \cdot 10^{-6}$  см·рад,  $\varepsilon_z = 1.6 \cdot 10^{-8}$  см·рад, энергетическим разбросом  $\sigma = 5.6 \cdot 10^{-6}$  во впускной промежуток ВЭПП-2000, имея координаты на впуске  $x = -1.1$  см,  $x' = 0$ . При этом впускаемый пучок должен подняться на 760 мм — расстояние между плоскостями орбит БЭП и ВЭПП-2000. Также, путем подбора фокусирующих элементов необходимо обеспечить согласование оптических функций канала и впускного промежутка [13].

### 2.1. Геометрия каналов инжекции

В основе расчета геометрии каналов перепуска лежит неправильный четырехгранник (тетраэдр), образованный из прямых отрезков траектории пучков (Рис. 2.1).

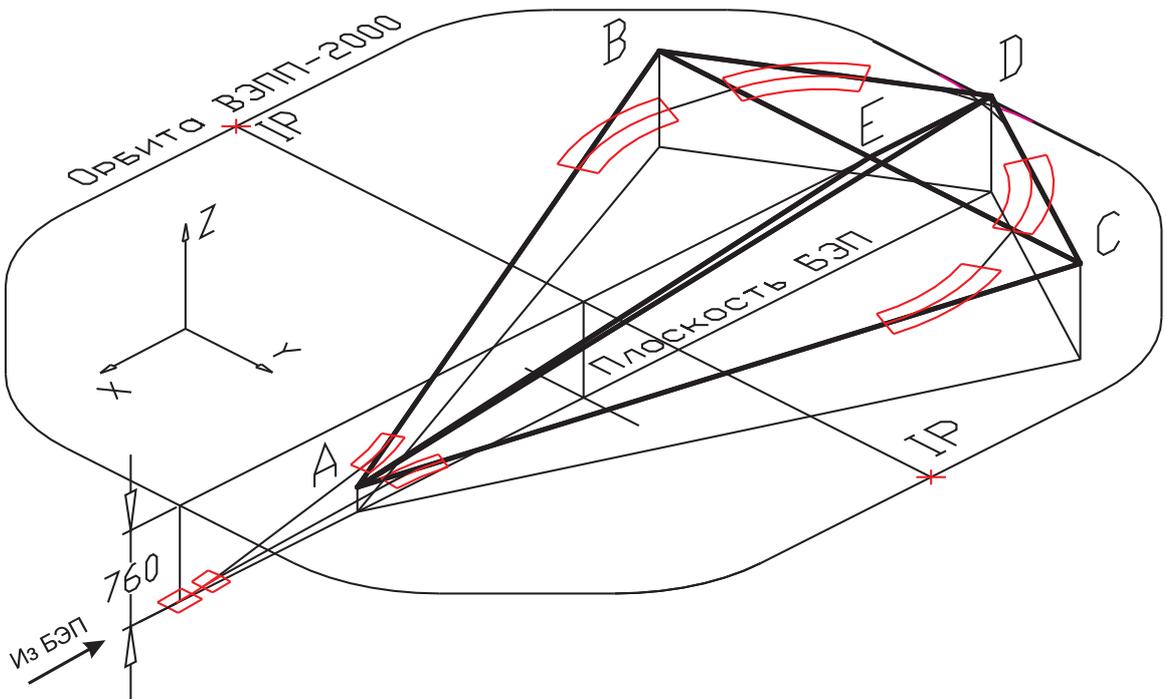


Рис. 2.1. Тетраэдр ABCD — расположение каналов инжекции в пространстве.

После выпускного магнита БЭП пучок должен повернуться на угол  $34.4^\circ$ , чтобы оказаться напротив середины впускного промежутка кольца ВЭПП-2000, находясь в плоскости БЭП. Затем, импульсным магнитом пучок выбивается из нее и оказывается в плоскости ABC (рисунок 2.1). В этой плоскости электронный и позитронный пучки разделяются импульсным магнитом и, пройдя некоторое расстояние, окончательно разводятся  $17.2^\circ$  магнитами. В целях уменьшения количества различных типов элементов каналов поворот на  $34.4^\circ$  и окончательное разведение пучков выполняется одинаковыми  $17.2^\circ$  магнитами.

Теперь рассмотрим тетраэдр  $ABCD$  (рисунок 2.1). Плоскость  $z = 0$  — это плоскость орбиты БЭП, точки  $B, C, D$  и  $E$  лежат в плоскости орбиты ВЭПП-2000 ( $z = 760$  мм). Точка  $A$  имеет координату  $z = 195.5$  мм. Отрезки  $BD$  и  $CD$  содержат траекторию, по которой пучки влетают в доворачивающий и затем во впускной импульсные магниты с общим углом поворота  $30^\circ$ . Длина этих отрезков фиксирована. После всего вышесказанного определяется единственный неизвестный параметр —  $\angle ABD = \angle ACD$ .

Теперь, зная координаты вершин тетраэдра, находятся углы между плоскостями:

$$\angle(ABC, ABD) = 3.31^\circ; \angle(ABD, BDC) = 6.13^\circ; \angle(ABC, BDC) = 6.57^\circ.$$

## 2.2. Общий вид каналов инжекции

Общий вид каналов инжекции в накопительное кольцо ВЭПП-2000 представлен на рис. 2.2

Пучок проходит канал в следующей последовательности. Магнитом  $M1$  (не показан на рисунке) пучок выводится из БЭП и, находясь в плоскости его орбиты, магнитами  $M2$  и  $M3$  в сумме поворачивается на угол  $34.4^\circ$ . Затем импульсным магнитом  $MZ$  пучок отклоняется вверх на угол  $6.57^\circ$  и выводится в плоскость  $ABC$  (рис. 2.1). Затем электронный и позитронный пучки отклоняются в этой плоскости импульсным магнитом  $MX$  на  $\pm 5^\circ$  каждый и в дальнейшем разводятся магнитами  $MP1$  и  $ME1$  еще на угол  $\pm 17.2^\circ$ . После этого частицы влетают в поворотные магниты  $MP2$  ( $ME2$ ) и  $MP3$  ( $ME3$ ), лежащие в плоскости  $ABD$  ( $ACD$ ). Угол между плоскостями  $ABC$  и  $ABD$  составляет  $3.31^\circ$ , следовательно происходит поворот системы координат на угол  $\Delta\phi = -3.31^\circ$ . Эти магниты выводят пучки в плоскость орбиты ВЭПП-2000. Здесь также происходит поворот системы координат на  $\Delta\phi = 6.13^\circ$ . Далее пучки проходят импульсный доворот на  $17.5^\circ$  ( $MP4$  и  $ME4$ ) и вводятся в вакуумную камеру  $12.5^\circ$  импульсными впускными магнитами ( $MP5$  и  $ME5$ ).

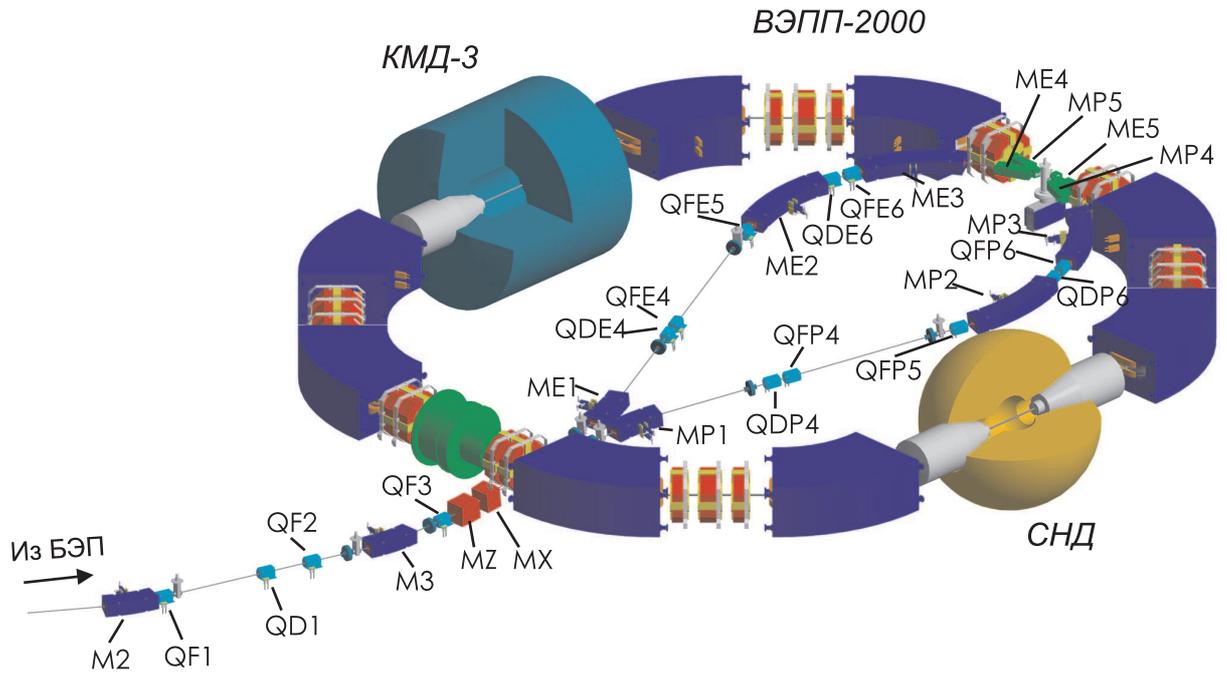


Рис. 2.2. Канал перепуска БЭП–ВЭПП-2000.

Магниты М2, М3, МР1 (МЕ1), МР2 (МЕ2), МР3 (МЕ3) запитываются постоянным током последовательно с БЭП, остальные поворотные магниты канала — импульсные с независимым питанием. Основные параметры поворотных магнитов канала, необходимые для расчета оптической фокусировки, перечислены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Поворотные магниты канала.

Элемент	Угол	Радиус поворота, см	Длина, см	Поле, кГс	Градиент, кГс/см
М1	28°	96	47.89	30.62	-0.7
М2	17.2°	144.5	43.38	20.78	0
М3	17.2°	144.5	43.38	20.78	0
МZ	6.57°	200	229	15	0
МX	5°	262	229	11.4	0
МР1,МЕ1	17.2°	144.5	43.38	20.78	0
МР2,МЕ2	41.2°	128	92.02	23.46	0
МР3,МЕ3	41.2°	128	92.02	23.46	0
МР4,МЕ4	17.5°	100	30.54	30	0.007
МР5,МЕ5	12.5°	151	32.94	19.9	0.007

В основе построения каналов заложены принципы симметрии и модульности исполнения. Благодаря этому уменьшается число различных типов элементов и упрощается настройка. В частности, последовательное питание основных магнитов канала с магнитами БЭП, позволяет автоматически компенсировать возможные отклонения энергии пучка, связанные с нестабильностью источника питания основного поля БЭП. Каналы спроектированы в виде двух ахроматических поворотов. Один на участке от выпускного магнита БЭП (M1) до магнита M3<sup>1</sup>, другой — от MP2 (ME2) до впускного магнита ВЭПП-2000 MP5 (ME5). Это позволяет не выдвигать жестких требований к стабильности отдельных элементов канала.

### 2.3. Оптика каналов инжекции

Оптическая фокусировка в каналах производится с помощью импульсных квадрупольных линз, поскольку они способны обеспечивать высокие градиенты поля при малых габаритах. Расчет оптики канала сводится к подбору градиентов линз и расстояний между ними с заданными начальными условиями (1.1) и условиями на ахроматичность после магнита M3:

$$\psi_x = 0, \quad \psi'_x = 0.$$

Последнее условие необходимо для того, чтобы электронный и позитронный каналы имели симметричную друг другу структуру.

Желательно, чтобы  $\beta$ -функции канала не достигали больших значений, хотя из-за малости эмиттансов выпускаемых из БЭП пучков это ограничение не носит жесткий характер.

Поскольку, основным режимом работы коллайдера является режим с  $\beta^* = 10$  см, то в конце канала, на выходе из впускного магнита оптические функции канала должны приобретать значения (1.5).

Программа *RING*, с помощью которой проводились расчеты оптики каналов, позволяет решать задачи оптимизации структуры. При этом происходит многомерное варьирование градиентов линз, длин промежутков и прочих т.н. свободных параметров задачи для достижения требуемых параметров канала. На рисунках 2.3 и 2.4 представлены оптические функции и дисперсия канала соответственно, после оптимизации данным методом.

---

<sup>1</sup> Вообще говоря, это не “чистый” ахромат — дисперсия, имея ненулевое значение в начале участка, зануляется на его конце.

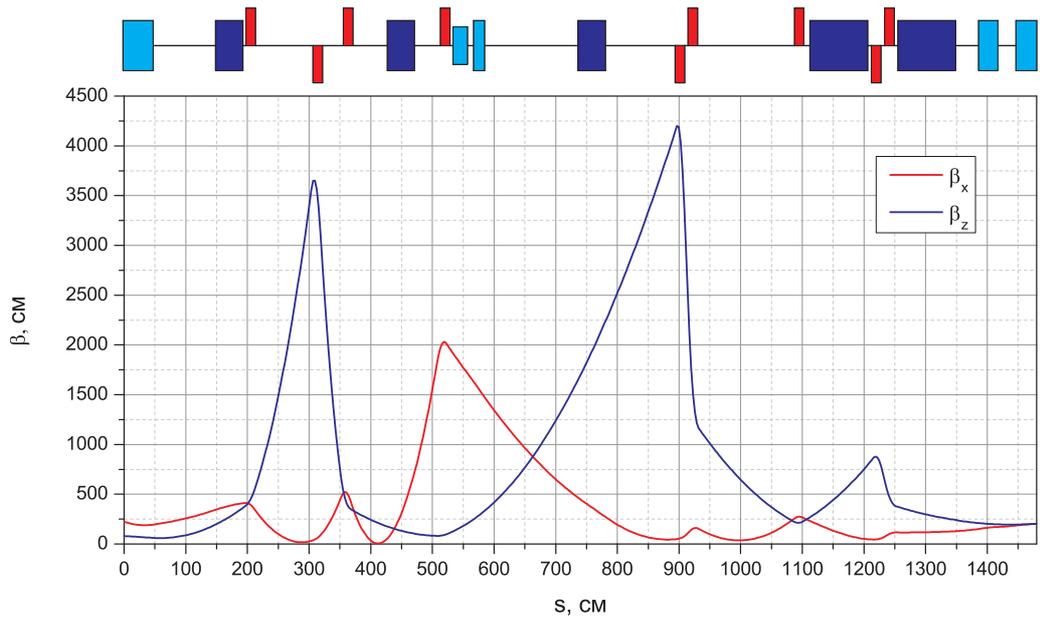


Рис. 2.3. Оптические функции канала БЭП–ВЭПП-2000.

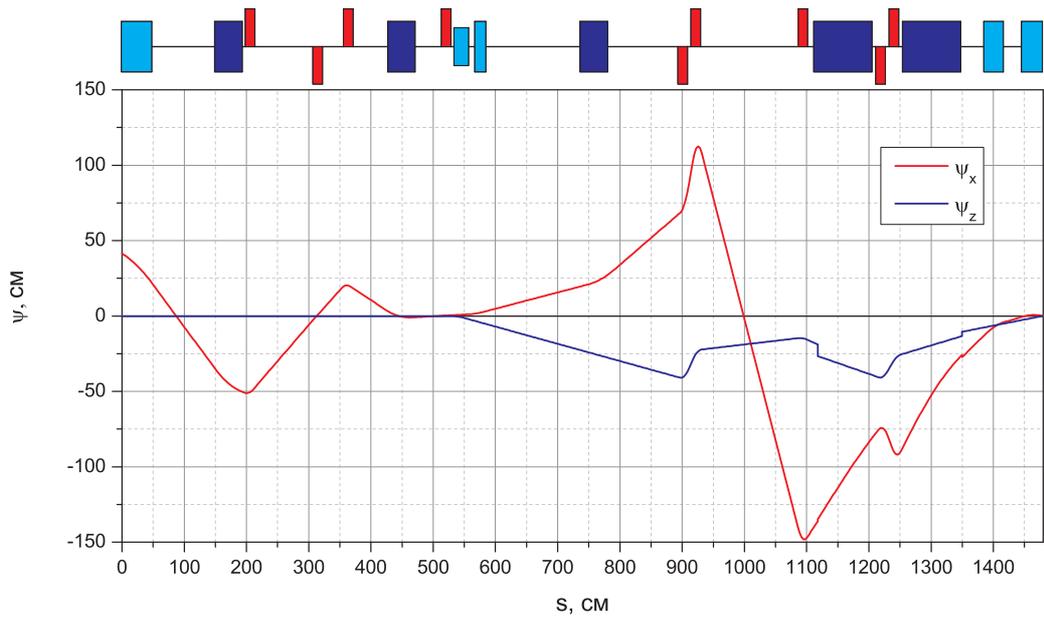


Рис. 2.4. Дисперсия канала БЭП–ВЭПП-2000.

Из рисунка 2.4 видно, что требование ахроматичности поворота на участке М1–М3 приводит к необходимости обратить знак  $\psi_x$ -функции между магнитами М2–М3 с помощью сильного триплета квадрупольных линз, что приводит к большим всплескам  $\beta$ -функций на этом участке. К сожалению, также нельзя избежать нарастания отрицательной дисперсии на первоначальном участке канала, так как в этом месте вакуумная камера канала проходит внутри железа магнита БЭП.

Достаточное количество квадрупольных линз на участке канала от магнита  $MZ$  до впуска позволяет скомпенсировать вертикальную  $\psi$ -функцию, возникающую из-за подъема пучка и вращений системы координат.

Величины градиентов линз канала представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Квадрупольные линзы электронного канала.

Элемент	Длина, см	Градиент, кГс/см
QF1	15	2.57
QD1	15	-4.35
QF2	15	7.47
QF3	15	2.41
QDE4	15	-5.54
QFE4	15	7.43
QFE5	15	3.07
QDE6	15	-4.43
QFE6	15	4.35

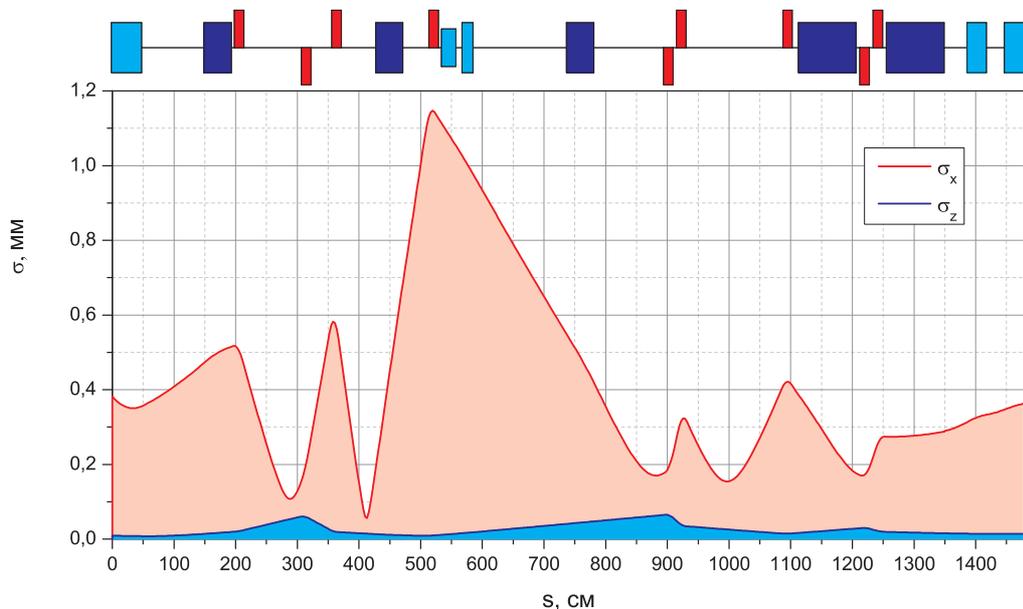


Рис. 2.5. Размер пучков в канале БЭП–ВЭПП-2000

На рисунке 2.5 приведены вертикальный и горизонтальный размеры пучка вдоль кана-

ла с учётом вклада энергетического разброса:

$$\sigma_x = \sqrt{\beta_x \cdot \varepsilon_x + \psi_x^2 \cdot \sigma^2}, \quad \sigma_z = \sqrt{\beta_z \cdot \varepsilon_z + \psi_z^2 \cdot \sigma^2},$$

где  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_z$  и  $\sigma$  отвечают параметрам выпускаемого из БЭП пучка (таблица 1.1).

Полная структура каналов инжекции приведена в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Структура электронного (левого) канала.

№	s, см	H, кГс	G, кГс/см	Название	Примечания
1	47.89	-30.62	-0.7	M1	Импульсный
2	100				
3	43.38	20.78		M2	
4	5				
5	15		2.5722	QF1	
6	92.4				
7	15		-4.35394	QD1	
8	33.35				
9	15		7.46904	QF2	
10	54.97				
11	43.38	20.78		M3	
12	41.63				
13	15		2.41146	QF3	
14	5				
15	22.92	-15.011		MZ	Импульсный, Нх
16	7.29				
17	22.84	11.42		MX	Импульсный
18	168.47				
19	43.38	20.78		MP1	
20	104.731				
21	15		-5.54417	QDP4	
22	5				
23	15		7.42544	QFP4	
24	154.149				
25	15		3.07309	QFP5	
26	17				
27	0				Поворот С.К. на угол -3.31°
28	92.02	-23.455		MP2	
29	6				
30	15		-4.43073	QDP6	
31	6				
32	15		4.35733	QFP6	
33	6				
34	92.02	-23.455		MP3	
35	0				Поворот С.К. на угол 6.13°
36	36.9				
37	30.54	-30.02	0.007	MP4	Импульсный
38	29.16				
39	32.94	-19.88	0.007	MP5	Импульсный

Благодаря тому, что оптика коллайдера в режимах с различными  $\beta$ -функциями в местах встречи имеет практически одинаковую структура впускного промежутка, т.е. близкий к  $\pi/2$  набег фаз между инфлекторами и местом инжекции, а также и идентичность оптических функций, приведенный расчет согласования оптики каналов и кольца ВЭПП-2000 может быть легко модифицирован для другой структуры коллайдера.

## 2.4. Магнитные элементы каналов инжекции

### 2.4.1. Магниты 17.2° и 41.2°

Как уже было сказано (таблица 2.1), в канале используется два типа магнитов, питающихся постоянным током. МР2 (МЕ2), МР3 (МЕ3) — с радиусом поворота 128 см, и М2, М3, МР1 (МЕ1) — с радиусом поворота 144.5 см. Поля этих магнитов в пересчете на энергию 900 МэВ составляют 23.455 кГс и 20.78 кГс соответственно. Питание этих магнитов осуществляется последовательно с магнитами и линзами БЭП, поэтому данные магниты, несмотря на свои по возможности маленькие размеры должны иметь ту же кривую насыщения, что и большой магнит БЭП во всем диапазоне энергий до 900 МэВ.

При проектировании первого типа магнитов (рисунок 2.6а) за основу был взят уменьшенный в линейных размерах в пять раз магнит БЭП [5], запитываемый одним витком с током (вместо пяти, как в магнитах БЭП). При этом, как показывают расчеты, произведенные программой *MERMAID*, удается достичь всех требуемых параметров.

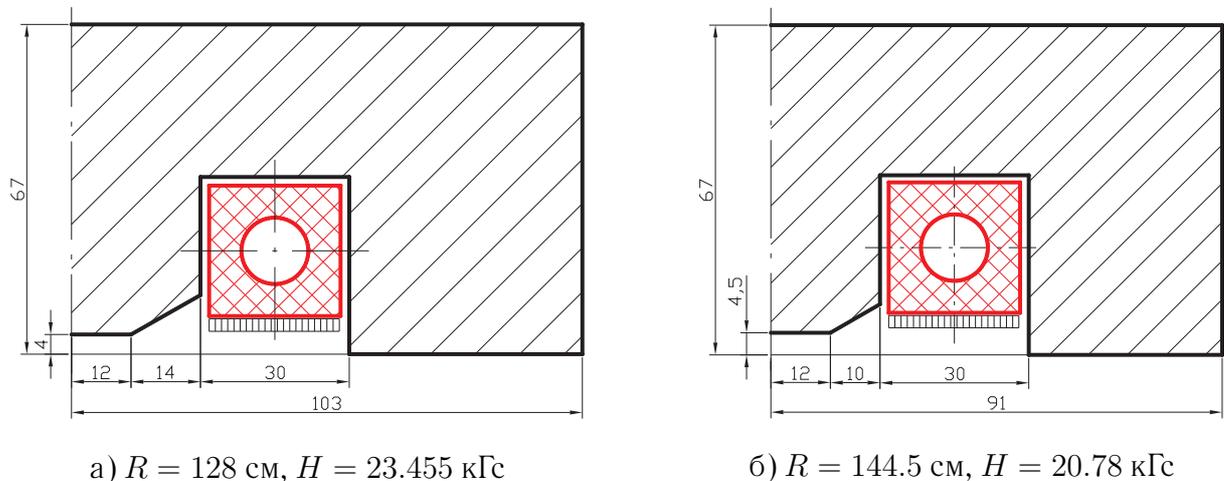


Рис. 2.6. Магниты 17.2° и 41.2°. Значения полей приведены в пересчете на энергию 900 МэВ.

Второй тип магнитов (рисунок 2.6б) получается из первого путем увеличения магнитно-

го зазора с 8 до 9 мм. В результате чего, при том же токе в обмотке достигается меньшее поле, что соответствует большему радиусу поворота при той же энергии. Однако, при этом кривая насыщения такого магнита “уходит” вверх по сравнению с аналогичной кривой БЭП. Для того, чтобы вернуть ее на место необходимо уменьшить размер ярма магнита, чтобы магнитное ярмо начинало насыщаться при меньшем токе.

Все вышесказанное можно проиллюстрировать следующим графиком (рисунок 2.7). Поле магнита с зазором 9 мм перенормировано на коэффициент ( $9/8 = 1.125$  — отношение магнитных зазоров) чтобы иметь возможность сравнивать графики полей различных магнитов. Из расчетов и рисунка 2.7 следует, что максимальное отличие полей магнитов канала от магнитов БЭП составляет не более  $0.2 \text{ кГс}$  или  $10^{-3}$  при токе в обмотках  $9 \text{ кА}$ .

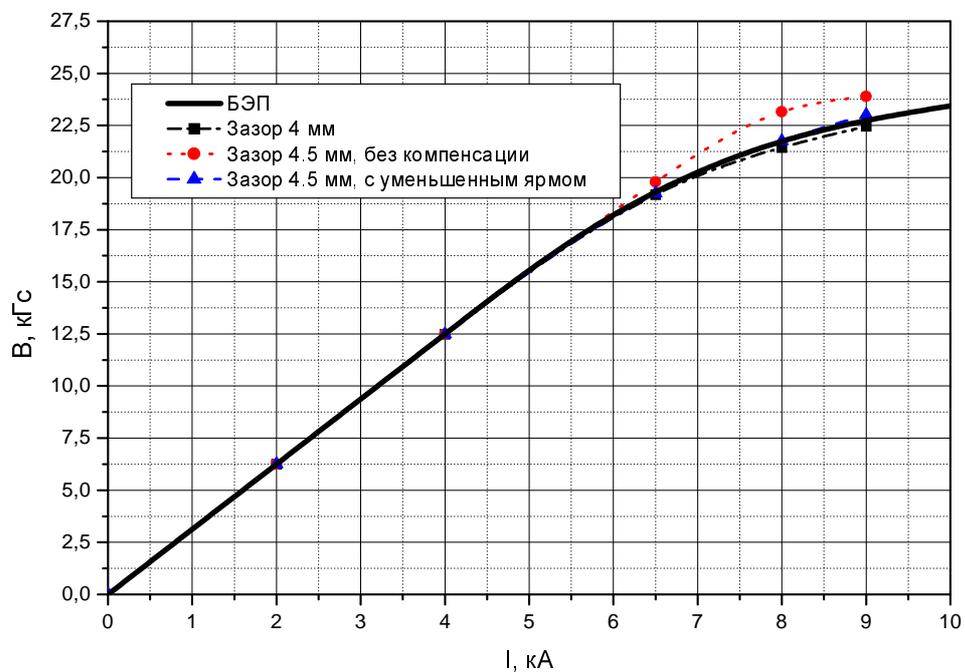


Рис. 2.7. Кривая намагничивания для различных магнитов канала и БЭП. Поле магнитов с зазором 9 мм перенормировано на коэффициент 1.125.

Поскольку питание данных типов магнитов осуществляется последовательно с источником питания БЭП, в каждый из магнитов заложена корректирующая обмотка, состоящая из 17 витков/полюс. При питании этих коррекций от независимых 20 А-источников величина корректирующего поля составит 1% от основного поля, что является достаточным для компенсации возможных отклонений поля от заданного.

Основные параметры  $17.2^\circ$  и  $41.2^\circ$  магнитов приведены в таблице 2.4, а внешний вид представлен на рисунке 2.8.

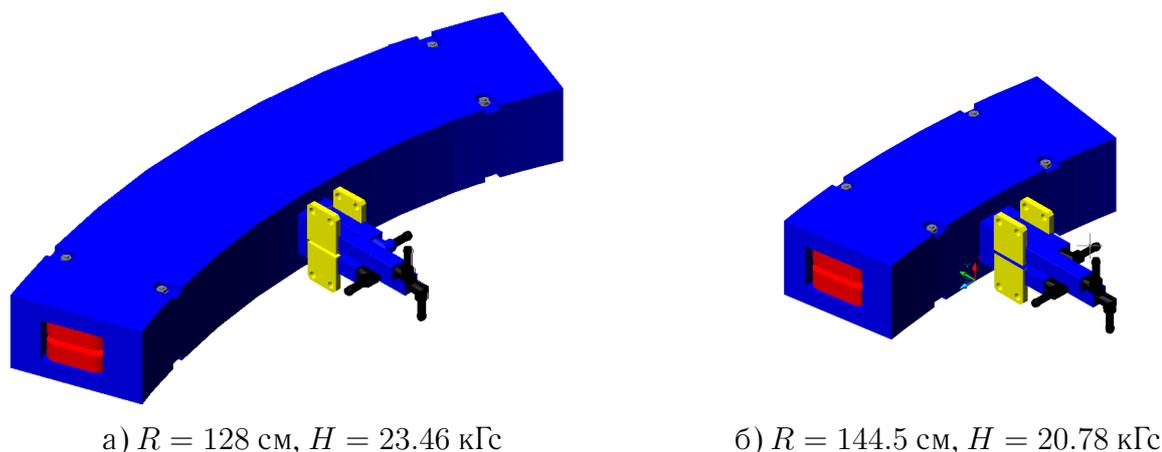


Рис. 2.8. Внешний вид 17.2° и 41.2° магнитов.

Таблица 2.4. Основные параметры 17.2° и 41.2° магнитов.

Параметр		41.2°	17.2°
Поле, кГс	$B$	23.46	20.78
Магнитный зазор, мм	$h$	8	9
Радиус, см	$r$	128	144.5
Угол поворота	$\alpha$	41.2°	17.2°
Длина, см	$l$	92.0	43.38
Ток в шинах, кА	$I$	9.2	
Витков коррекции	$w$	17 × 2	
Ток коррекции, А	$I_{\text{корр}}$	20	

#### 2.4.2. Импульсные квадрупольные линзы

Максимальный градиент линзы в канале составляет 7.47 кГс/см (таблица 2.2). Поэтому, при магнитных расчетах линзы в программе *MERMAID* использовалось данное значение. Поперечное сечение и внешний вид такой линзы представлены на рисунке 2.9. В каждой квадрупольной линзе предусмотрен импульсный дипольный корректор: в фокусирующих — горизонтальный, а дефокусирующих — вертикальный. Основные параметры квадрупольной линзы и корректора в ней представлены в таблице 2.5.

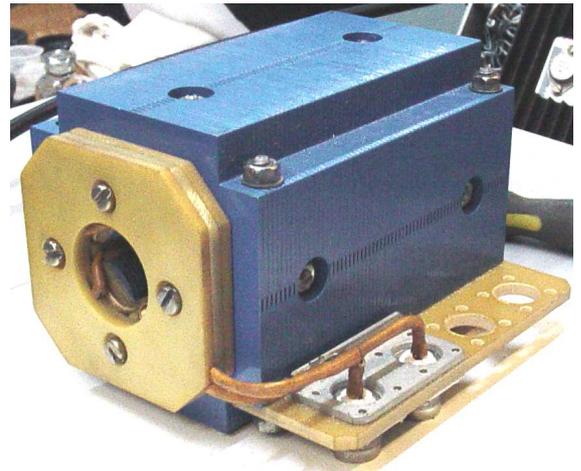
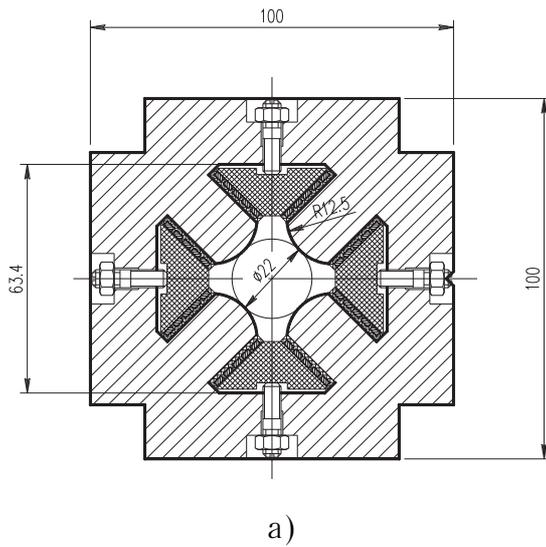


Рис. 2.9. Квадрупольная линза канала. а) Сечение. б) Внешний вид.

Таблица 2.5. Параметры импульсной квадрупольной линзы и дипольной коррекции в ней.

Параметр		Значение
Градиент поля, кГс/см	$G$	7.5
Ток в обмотке, А	$I$	750
Число витков	$w$	5
Диаметр вписанной окружности, мм	$D$	22
Индуктивность, мкГн	$L$	105
Длина, см	$l$	15
Ёмкость источника, мкФ	$C$	300
Время максимума тока, мкс	$T/4$	280
Поле коррекции, кГс	$B$	7.0
Ток коррекции, А	$I_{corr}$	700
Число витков коррекции	$w_{corr}$	6
Индуктивность, мкГн	$L_{corr}$	13
Длина, см	$l_{corr}$	15
Ёмкость источника, мкФ	$C_{corr}$	50
Время максимума тока, мкс	$T_{corr}/4$	180

### 2.4.3. Магнитные измерения квадрупольной линзы

Метод измерения импульсного магнитного поля заключается в следующем. Сигнал с измерительной катушки пропорционален производной потока магнитного поля через нее. Следовательно, интеграл сигнала пропорционален потоку через катушку, а значит — магнитному полю (2.1). Измеряя интеграл сигнала датчика можно определить магнитное поле в измерительной катушке в момент остановки интегрирования.

$$B = \Phi/S_{eff} = \frac{1}{S_{eff}} \int_0^{\tau} \dot{\Phi}(t)dt = \frac{1}{S_{eff}} \int_0^{\tau} U(t)dt, \quad (2.1)$$

где  $B$  — магнитное поле в катушке,  $\Phi$  — магнитный поток,  $S_{eff}$  — эффективная площадь катушки (площадь, умноженная на число витков), а  $U(t)$  — изменяющийся во времени сигнал измерительной катушки.

Схема стенда импульсных магнитных измерений показана на рисунке 2.10. Управляемый с помощью компьютера по протоколу *CAN-Bus* [14] блок ПКС (*Преобразователь Код-Скважность*) задает напряжение и полярность заряда конденсаторной батареи источника импульсного питания «АККОРД». Блок ГВИ (*Генератор Временных Интервалов*), управляемый аналогичным образом, позволяет осуществлять временную синхронизацию измерений. БИИП (*Блок Измерения Импульсных Параметров*) начинает интегрирование входного сигнала по импульсу «Старт» и оканчивает по импульсу «Стоп», подаваемому в момент максимума тока (приблизительно 200 мкс после старта). На выходе БИИП формирует код, про-

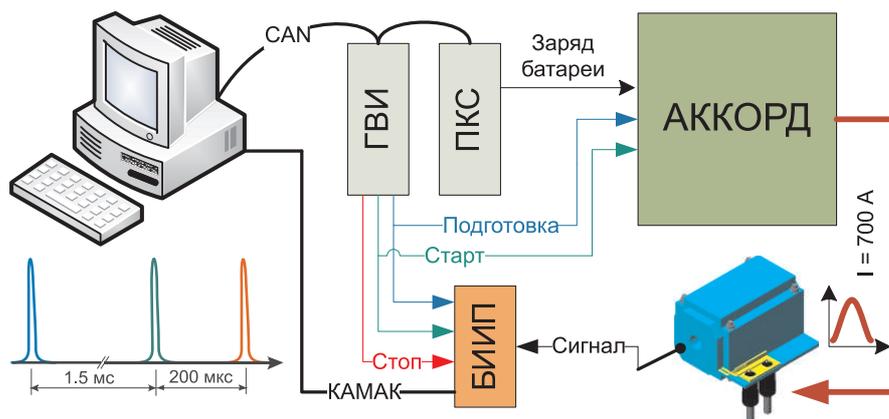


Рис. 2.10. Схема стенда импульсных магнитных измерений.

порциональный проинтегрированному входному сигналу, который вычитывается из блока по

окончании каждого цикла измерений. Получаемый код пропорционален значению магнитного поля в измерительной катушке в момент остановки интегрирования.

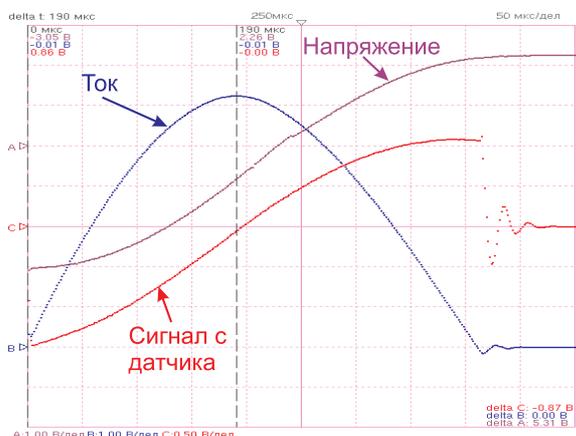
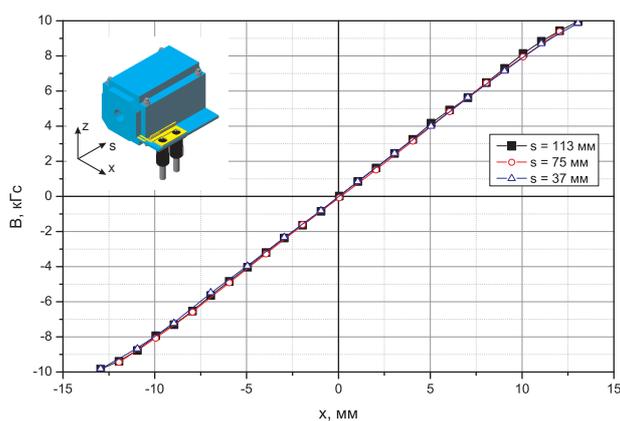


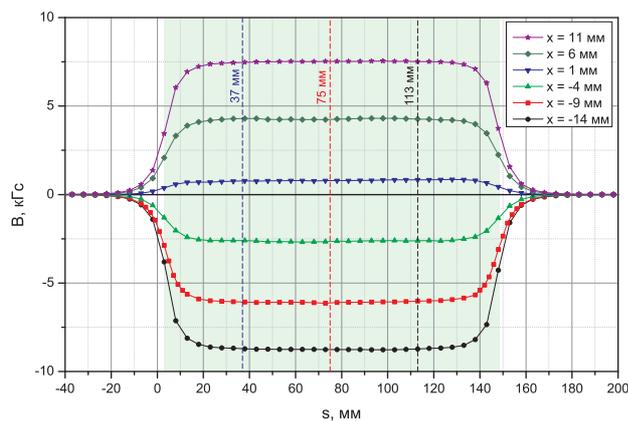
Рис. 2.11. Осциллограммы импульсов тока, на-

Рис. 2.12. Датчик — катушка  $\varnothing 2 \times 3$  мм, 400 витков.

Результаты магнитных измерений полей в импульсной квадрупольной линзе представлены на рисунке 2.13 [15]. Как видно из рисунка, градиент линзы превосходит требуемые 7.5 кГс/см — график а), а магнитная длина равна 145 мм — график б), что хорошо согласуется с проектными параметрами (таблица 2.5).



а)



б)

Рис. 2.13. Магнитные измерения импульсной квадрупольной линзы. а) Зависимость  $B_z(x)$  в различных сечениях линзы, градиент  $G = 8$  кГс/см. б) Зависимость  $B_z(s)$ , магнитная длина  $L_{\text{magn}} = 14.5$  см.

Проведенные аналогичным образом измерения дипольной коррекции, совмещенной с квадрупольной линзой, также дали хорошее согласие с проектными параметрами.

#### 2.4.4. Выпускной магнит БЭП — магнит М1.

Выпускной магнит БЭП в проекте ВЭПП-2М был рассчитан на максимальную энергию 650 МэВ (поле 20 кГс). Для новых каналов БЭП–ВЭПП-2000 потребовалась существенная модификация данного магнита. Для достижения проектной энергии 900 МэВ и, соответственно, поля 31 кГс потребовалось изготовить и установить магнитное ярмо из шихтованного (ламинированного) железа, а также внести связанные с данной модификацией изменения в конструкцию центральной и внешней токоведущих шин. При этом, за счет применения магнитного ярма удалось сохранить энергоёмкость данного магнита на прежнем уровне, что позволило использовать тот же источник импульсного питания.

Новый магнит представлен на рисунках 2.14 и 2.15, а основные его параметры — в таблице 2.6.

Кроме модификации, связанной с увеличением поля магнита в конструкцию были введены т.н. измерительные петли, представляющие из себя медные витки по обе стороны от вакуумной камеры выпускного канала (см. рисунок 2.14). Сигнал с этих измерителей используется для настройки и контроля стабильности импульса магнитного поля.

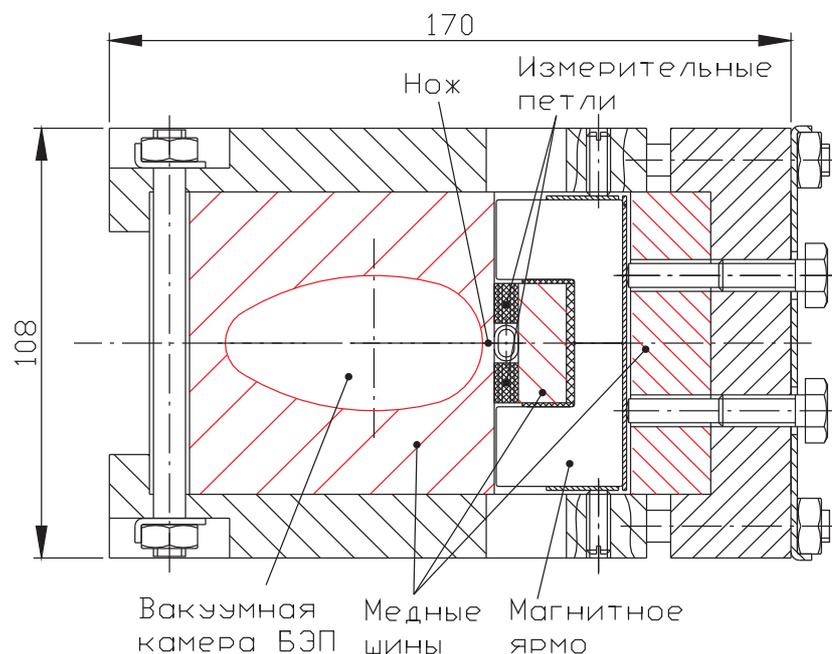


Рис. 2.14. Выпускной магнит БЭП (сечение).

Установка шихтованного ярма в магнит М1 производилась без нарушения вакуума в БЭП и выпускных каналах, поэтому провести серию магнитных измерений не представлялось возможным. Однако, дальнейшая эксплуатация и успешный выпуск электронов и пози-

тронов из БЭП показали хорошее соответствие параметров магнита проектным значениям.

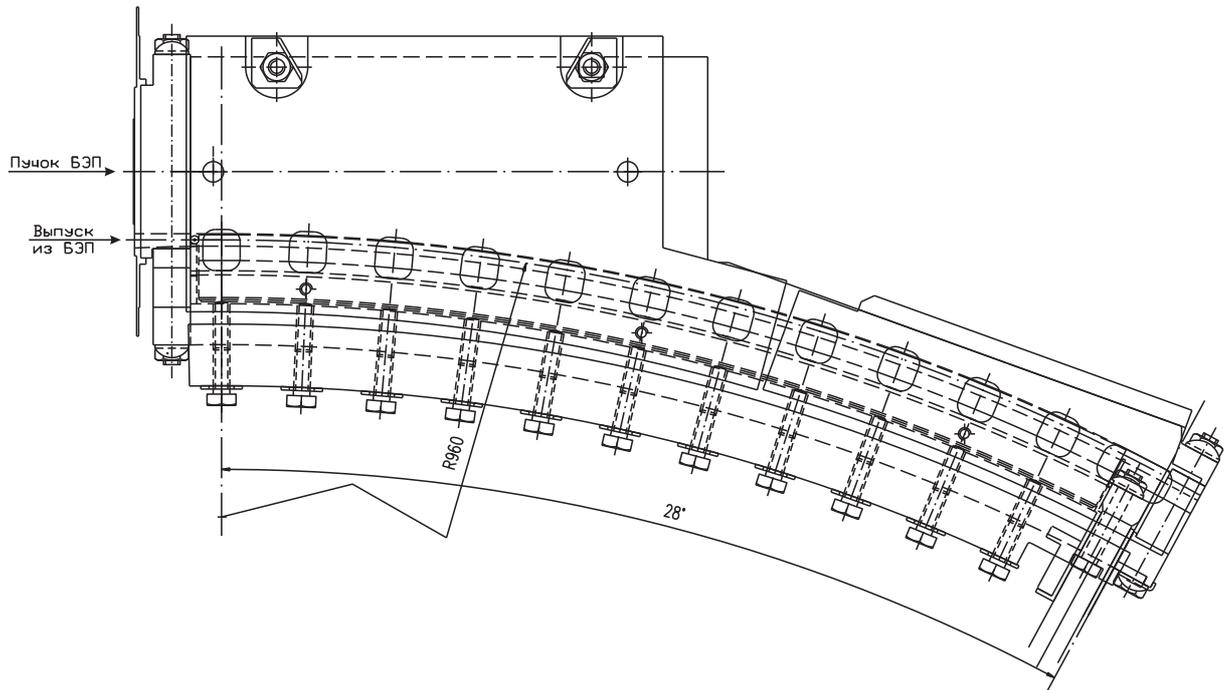


Рис. 2.15. Выпускной магнит БЭП (вид сверху).

Таблица 2.6. Основные параметры выпускного магнита БЭП.

Параметр		Значение
Поле, кГс	$B$	30.62
Магнитный зазор, мм	$d$	32
Радиус, см	$r$	96
Угол поворота	$\alpha$	28°
Длина, см	$l$	47.89
Градиент, кГс/см	$G$	-0.7
Ток в шинах, кА	$I$	55
Индуктивность, мкГн	$L$	0.14
Энергоёмкость, Дж	$W$	244
Ёмкость источника, мкФ	$C$	12
Время максимума, мкс	$T/4$	60

### 2.4.5. Магниты MZ и MX

С целью уменьшения числа различных элементов каналов, решено использовать одинаковые по исполнению импульсные магниты MZ и MX. Конструкция данного типа магнитов показана на рисунке 2.16. Отличие заключается лишь в пространственной ориентации этих магнитов. Назначение магнита MZ — подъем обоих пучков из плоскости БЭП вверх — по направлению к плоскости орбиты ВЭПП-2000. Магнит MX, расположенный после MZ, обеспечивает разведение электронного и позитронного пучков в левый и правый каналы соответственно. Основные параметры магнитов приведены в таблице 2.7.

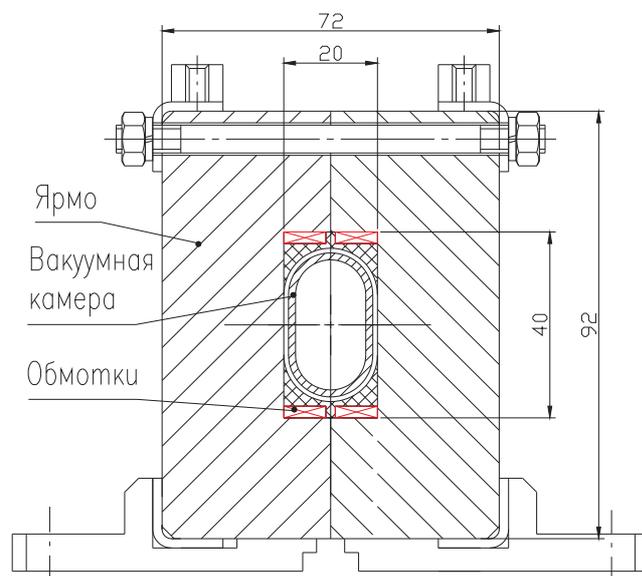


Рис. 2.16. Импульсный магнит MZ. Магнит MX ориентирован в другой плоскости и имеет отличную от MZ конструкцию подставки.

Таблица 2.7. Основные параметры магнитов MZ / MX.

Параметр		Значение
Поле, кГс	$B$	15 / 11.4
Радиус, см	$r$	200 / 262
Угол поворота	$\alpha$	6.57° / 5.0°
Зазор, мм	$h$	20
Длина, см	$l$	29.9
Градиент, кГс/см	$G$	0
Ток в шинах, кА	$I$	2 / 1.52
Число витков	$w$	6 × 2
Индуктивность, мкГн	$L$	83
Энергоёмкость, Дж	$W$	168 / 97
Ёмкость источника, мкФ	$C$	800 / 1600
Время максимума, мкс	$T/4$	430 / 355

#### 2.4.6. Впускной промежуток

Впускной промежуток коллайдера представлен на рисунке 2.17. Как видно из рисунка, впускной участок разделен на *впускной* и *доворачивающий* магниты с пересечением электронной и позитронной траекторий между ними. Такое решение позволяет уменьшить поле впускных магнитов до 20 кГс (для сравнения: 30 кГс в проекте ВЭПП-2М), что значительно снижает требования на механическую прочность его ножа. Доворачивающий магнит с полем 30 кГс не имеет ножа, поэтому нет и жёстких требований на прочность конструкции этого магнита. Оба типа магнитов выполнены по схеме, аналогичной выпускному магниту БЭП (п. 2.4.4) Основные параметры данных магнитов, рассчитанные с помощью программы *MERMAID*<sup>1</sup>, приведены в таблице 2.8.

<sup>1</sup> Специальный модуль программы *MERMAID* позволяет производить расчеты импульсных магнитных полей.

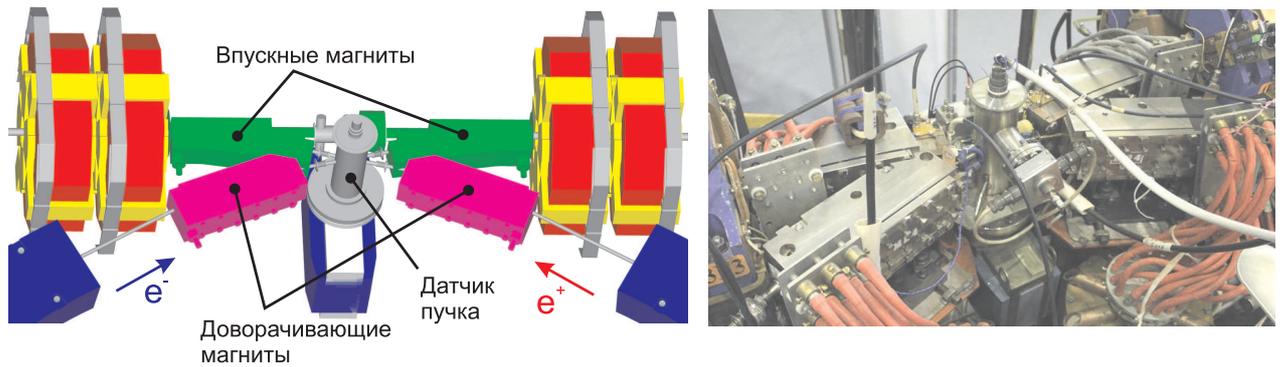


Рис. 2.17. Впускной промежуток коллайдера ВЭПП-2000.

Поперечные сечения впускных и доворачивающих магнитов представлены на рисунках 2.18 и 2.19. В конструкцию этих магнитов включены измерительные петли, аналогичные по исполнению измерительному блоку магнита М1 (рисунок 2.14).

Таблица 2.8. Основные параметры доворачивающих и впускных магнитов.

Параметр		Доворот	Впуск
Поле, кГс	$B$	30	19.9
Магнитный зазор, мм	$d$	22	22
Радиус, см	$r$	100	151
Угол поворота	$\alpha$	17.5°	12.5°
Длина, см	$l$	30.57	32.04
Градиент, кГс/см	$G$	0.01	0.01
Ток в шинах, кА	$I$	54	38
Индуктивность, мкГн	$L$	0.14	0.12
Энергоёмкость, Дж	$W$	205	84
Ёмкость источника, мкФ	$C$	12	12
Время максимума, мкс	$T/4$	70	70

Магнитные измерения, выполненные по методике, аналогичной описанной в п. 2.4.3, показали хорошее соответствие с проектными параметрами этих магнитов. Продольное распределение поля в доворачивающих и впускных магнитах приведены на рисунке 2.20. Как видно из этих графиков, в эксперименте получены проектные значения полей 30 кГс и 20 кГс [15].

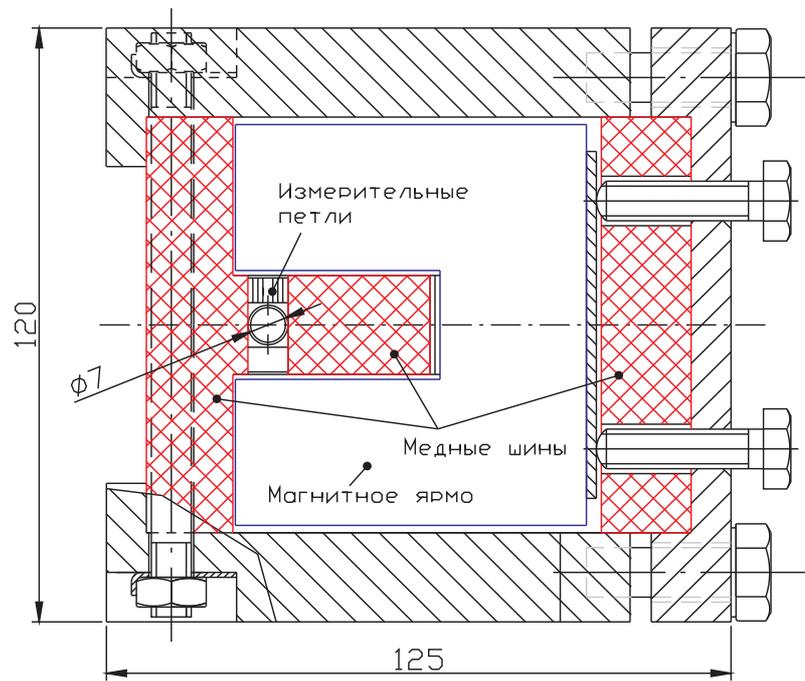


Рис. 2.18. Сечение доворачивающего магнита.

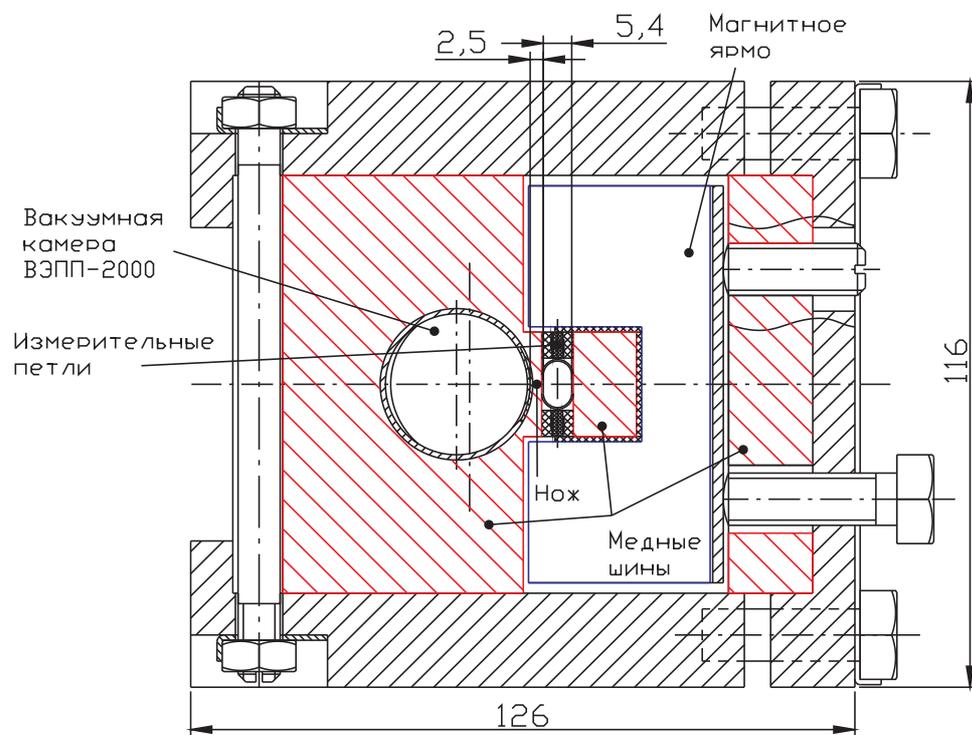


Рис. 2.19. Сечение впускного магнита.

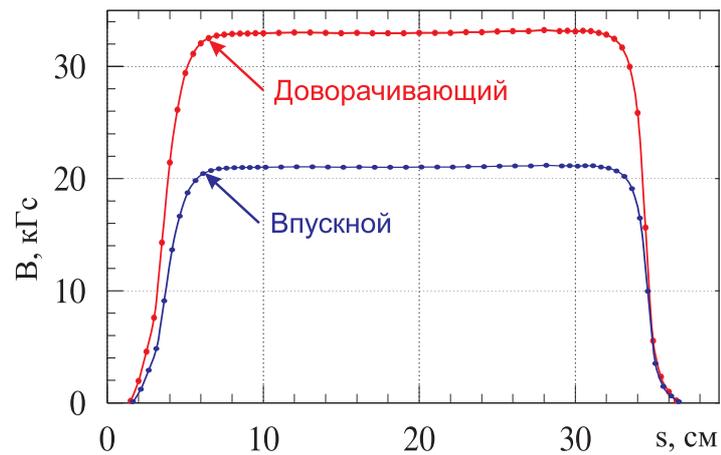


Рис. 2.20. Продольное распределение полей в доворачивающем и впускном магнитах.

### 2.4.7. Корректирующие магниты

Кроме корректирующих обмоток в основных магнитах канала (п. 2.4.1) и импульсных дипольных корректоров, совмещенных с квадрупольями (п. 2.4.2), в каналах предусмотрены дополнительные корректирующие дипольные магниты двух типов: импульсные и питаемые постоянным током. (рисунок 2.21). Назначение и параметры дополнительных корректоров приведены в таблицах 2.9, 2.11 и 2.10.

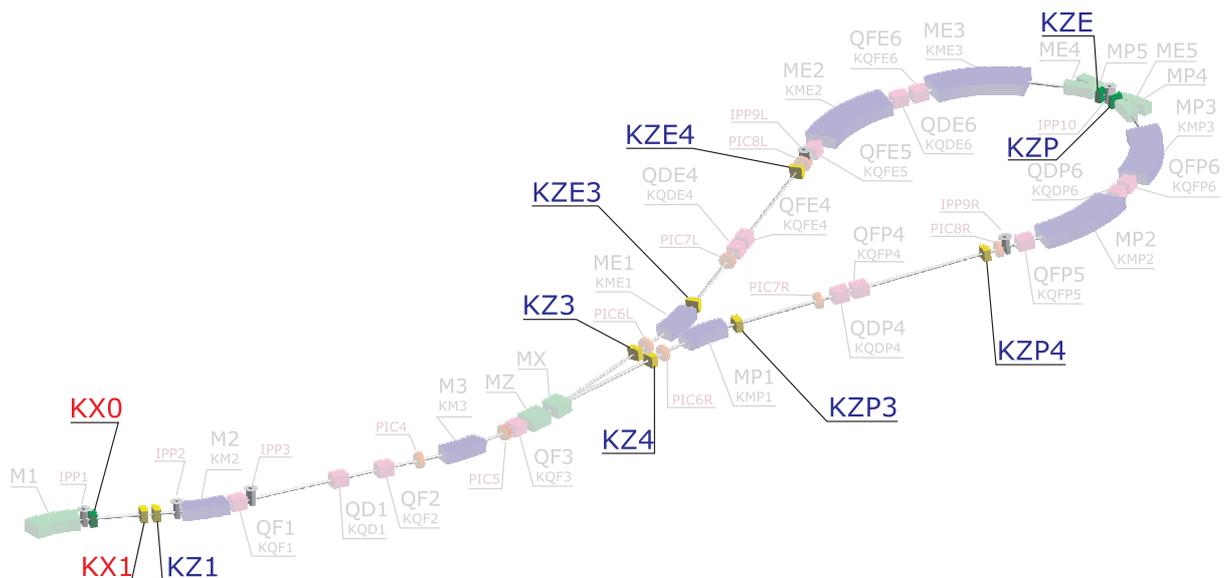


Рис. 2.21. Расположение дополнительных корректоров в каналах (выделены более интенсивным цветом). Импульсные — зеленые, питаемые постоянным током — желтые.

Таблица 2.9. Дополнительные корректирующие магниты каналов.

Название	Ориентация	Тип и питание
KX0	Горизонтальный	Импульсный, с ярмом
KX1	Горизонтальный	Постоянный
KZ1	Вертикальный	Постоянный
KZ3, KZ4	Вертикальный	Постоянный
KZE3, KZP3	Вертикальный	Постоянный
KZE4, KZP4	Вертикальный	Постоянный
KZE, KZP	Вертикальный	Импульсный, безжелезный

Таблица 2.10. Основные параметры импульсных корректоров.

Параметр		С ярмом	Безжелезный
Поле, кГс	$H$	9.5	6.0
Длина, см	$l$	4.5	4.0
Угол, мрад	$\alpha$	14	8
Зазор, мм	$d$	17	—
Ток, кА	$I$	0.3	1.0
Индук-сть, мкГн	$L$	380	12
Число витков	$w$	43	10 × 2
Ёмкость ист., мкФ	$C$	50	50
Время макс., мкс	$T/4$	180	50

Таблица 2.11. Основные параметры корректоров, питаемых постоянным током.

Параметр		Значение
Поле, кГс	$H$	1.0
Длина, см	$l$	10
Угол, мрад	$\alpha$	3.3
Зазор, мм	$d$	30
Ток, А	$I$	5.0

## Система измерения параметров пучка в транспортных каналах

Система измерения параметров пучков в каналах инжекции комплекса ВЭПП-2000 состоит из 14 датчиков положения пучка двух типов: шесть вторично-эмиссионных датчиков и восемь датчиков тока изображения [16]. Система предназначена для работы во всем диапазоне рабочих энергий и рассчитана на число частиц  $10^8 - 10^{11}$  в пучке.

Расположение датчиков вдоль каналов инжекции показано на рисунке 3.1. Как видно из рисунка, на пути каждого пучка расположено по 10 измерительных датчиков: пять вторично-эмиссионного типа и столько же датчиков тока изображения. Оба типа датчиков имеют свои преимущества и недостатки, совместное их использование взаимно дополняет друг друга.

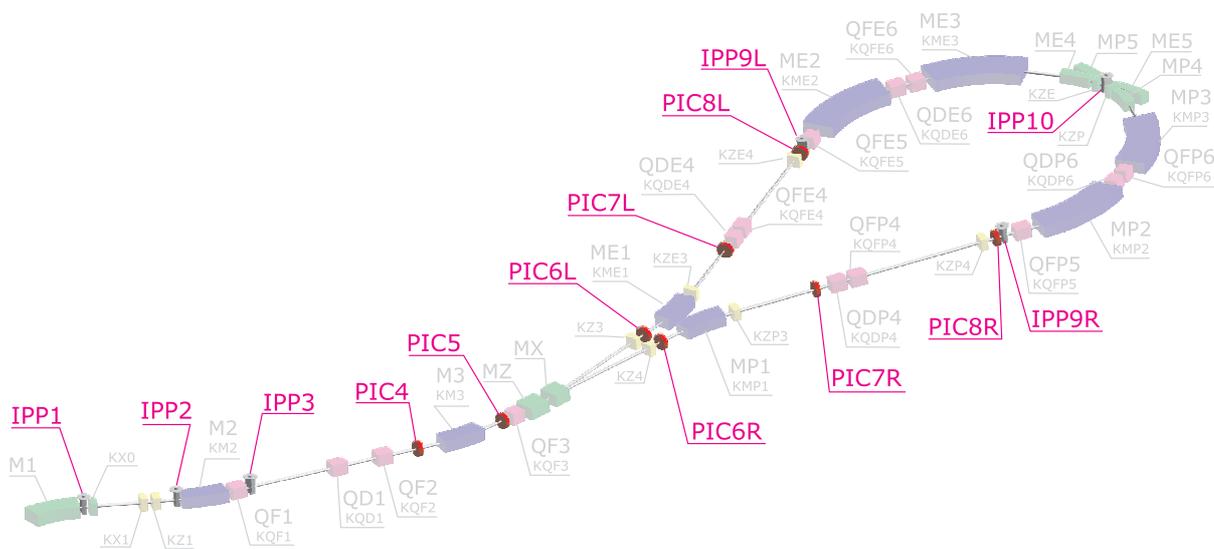


Рис. 3.1. Расположение вторично-эмиссионных датчиков (IPP) и датчиков тока изображения (PIC) в каналах БЭП–ВЭПП-2000.

### 3.1. Вторично-эмиссионные датчики

Вторично-эмиссионный датчик представляет собой систему проволочек (эммитеров), расположенных с некоторым шагом в апертуре канала в плоскости, перпендикулярной тра-

ектории пучка. Пучок, пролетая сквозь проволочки выбивает из них электроны (т.н. процесс вторичной эмиссии) и на проволочках появляется положительный заряд. По распределению измеренного заряда можно судить о плотности и положении пучка в апертуре канала.

Точность такого типа датчиков существенным образом зависит от характерных размеров пучка по сравнению с шагом проволочек. В случае больших размеров по обеим осям (вертикальной и горизонтальной) можно изучать как положение пучка так и его поперечное распределение (рисунок 3.2, а). Однако, как видно из рисунка 2.5, типичной является ситуация, когда пучок имеет малый вертикальный размер. В таких случаях используются датчики с так называемыми “косыми” сетками (примеры: рисунок 3.2, б и в), которые позволяют определить вертикальное положение пучка даже в том случае, когда вертикальный размер пучка меньше, чем шаг проволочек в датчике. Стоит заметить, что при использовании датчиков с косыми сетками теряется возможность измерять вертикальный и горизонтальный размеры пучка независимо друг от друга. Более того, в случаях, когда оба размера пучка приближаются или даже становятся меньше шага сетки датчика точность определения координат центра масс резко падает.

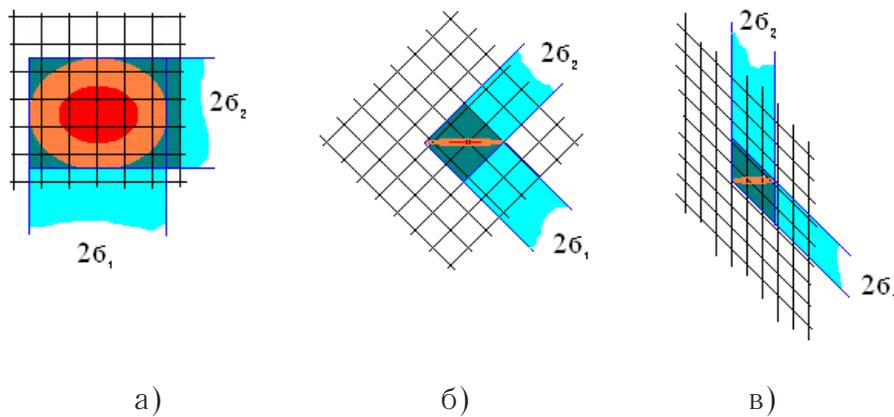


Рис. 3.2. Рабочая область вторично-эмиссионного датчика.

Другим существенным недостатком данного типа датчиков является их неполная прозрачность для пучка. Частица, пролетевшая через проволочку, с вероятностью  $\simeq 10^{-2}$  излучает тормозной квант и не попадает в акцептанс ВЭПП-2000. С учётом геометрического фактора (т.е. размера пучка в канале и сечения проволочек и их шага) можно определить коэффициент непрозрачности для используемого в данных каналах типа вторично-эмиссионных датчиков. Он составляет около 2% [16, 17].

Ввиду малого размера пучка в каналах БЭП–ВЭПП-2000 используются вторично-эмиссионные датчики с сетками проволок из позолоченного вольфрама диаметром 28 мкм с шагом 0.7 мм, повернутыми на угол  $45^\circ$  (рисунок 3.3). Исключение составляет первый датчик (IPP1 на рисунке 3.1), который имеет одну “прямую” сетку в горизонтальном направлении, а другую — наклонную под углом  $45^\circ$  и шаг 0.5 мм. Кроме этого, из-за уникального расположения последнего по ходу пучка датчика на пересечении траекторий электронного и позитронного пучков (IPP-10 на рисунке 3.1), эффективный шаг сетки этого датчика составляет  $0.7 \cdot \cos(12.5^\circ) = 0.68$  мм. Более того, при смене режима работы канала с электронов на позитроны  $x$ -координата этого датчика меняет знак. Все вторично-эмиссионные датчики имеют по 15 проволок в каждом направлении — итого 30 каналов АЦП на один датчик такого типа. Основные параметры датчиков приведены в таблице 3.1.

В хорошей ситуации, т.е. в случае, когда размер пучка составляет несколько шагов сетки — так, что он “цепляет” несколько проволок — точность измерения координат положения пучка датчиков этого типа составляет 100–200 мкм [16].

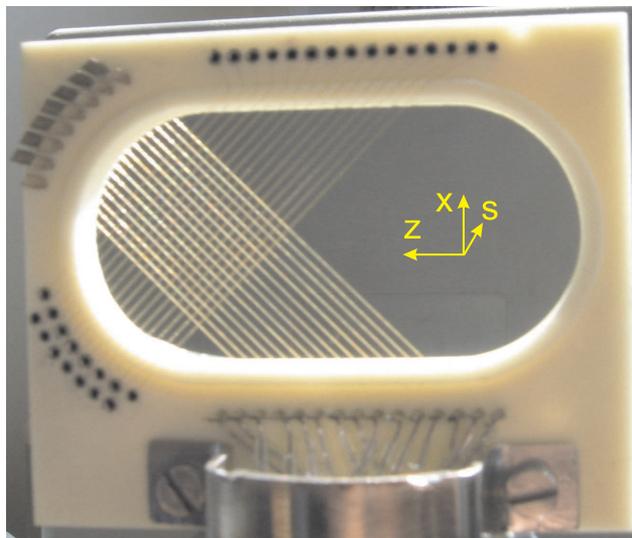


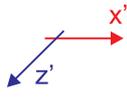
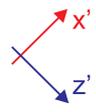
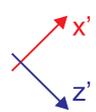
Рис. 3.3. Проволочки (эмиттеры) вторично-эмиссионных датчиков канала БЭП–ВЭПП-2000.

Основным достоинством датчиков вторично-эмиссионного типа является их высокая помехозащищенность, и, как следствие, — хорошая чувствительность.

Процедура вычисления параметров пучка для датчиков вторично-эмиссионного типа представляет собой вычисление среднего по распределению сигнала по проволокам для

определения центра масс, а также вычисление среднеквадратичного отклонения для определения размеров.

Таблица 3.1. Разновидности вторично-эмиссионных датчиков в каналах БЭП–ВЭПП-2000.

Датчик	Шаг, мм	Сетка
IPP-1	0.5	
IPP-2, IPP-3, IPP-9L(R)	0.7	
IPP-10	0.68	

### 3.2. Датчики тока изображения

Датчики тока изображения измеряют импульсы тока, наводимого пучком в линиях съема тока изображения, расположенных равномерно по радиусу в керамическом разрыве вакуумной камеры. По соотношению импульсов тока на различных азимутах можно установить положение пучка в вакуумной камере датчика, а при достаточно большом количестве таких линий съема — изучать следующие гармоники азимутального распределения сигналов, т.е. получать представление и о распределении пучка [18].

В каналах инжекции ВЭПП-2000 используются датчики с четырьмя линиями съема тока изображения (рисунок 3.4) на азимутах  $\theta_1 = +\pi/4$ ,  $\theta_2 = +3\pi/4$ ,  $\theta_3 = -3\pi/4$  и  $\theta_4 = -\pi/4$ , которые позволяют реконструировать только координаты центра масс пучка и его заряд (число частиц в пучке).

Более развернутый алгоритм вычисления параметров пучка для датчиков этого типа приведен в приложении А.

Точность измерения координат данного типа датчиков составляет 50 мкм, это превосходит характеристики датчиков вторично-эмиссионного типа [17]. Более того, эта точность не зависит от поперечных размеров пучка. Тем не менее, датчики тока изображения имеют и существенный недостаток. Несмотря на все меры, принятые разработчиками для защиты

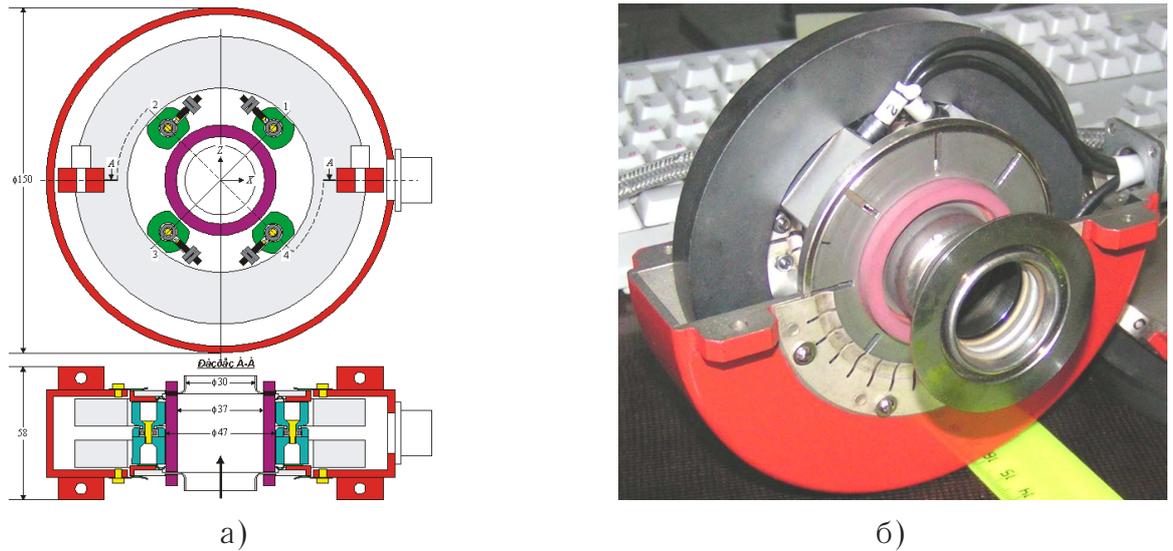


Рис. 3.4. Датчик тока изображения. а) эскиз, б) внешний вид.

датчика от импульсных помех, датчики все же остаются чувствительны к импульсным наводкам в наносекундном диапазоне. Одним из источников таких помех могут являться дефлекторы и инфлекторы — необходимая часть системы инъекции. В случае установки датчика тока изображения рядом с пластинами инфлектора, в его показаниях может возникать большая систематическая ошибка. Таким образом, наиболее естественно использовать вблизи мест выпуска и инъекции более помехозащищенные вторично-эмиссионные датчики, а на остальном протяжении канала — более точные датчики тока изображения.

### 3.3. Аппаратное и программное обеспечение

Сигнал с проволочек вторично-эмиссионных датчиков подается на вход Измерителя Положения Пучка (ИПП), представляющего собой многоканальный 14-разрядный АЦП с разрешающей способностью по заряду 1 фК [19]. По коммуникационной линии собственного стандарта измерители положения пучка, имеющие внутреннюю адресацию, подключаются к специализированному интерфейсу CANIPP-M стандарта CAN-bus, который связывает блоки ИПП с компьютером управления. Для минимизации числа подводящих кабелей питание блоков ИПП осуществляется по этой же самой линии.

Блок обработки сигналов с датчиков тока изображения (станция ДТИ) является модификацией ИПП. Данный блок снабжён специальной аналоговой частью, усиливающей,

детектирующей, и запоминающей при помощи пикового детектора сигналы токовых трансформаторов датчика. Далее эти сигналы подаются на вход цифровой части данного блока, полностью аналогичной блоку ИПП (многоканальный АЦП с возможностью внешнего запуска измерений).

Внешний вид блока ИПП и станции ДТИ представлен на рисунке 3.5.



а)



б)

Рис. 3.5. Блоки измерения положения пучка. а) вторично-эмиссионный, б) датчик тока изображения.

Схема подключения оборудования, обслуживающего систему измерения параметров пучков в каналах БЭП–ВЭПП-2000 представлена на рисунке 3.6. Интерфейс CANIPP-M позволяет обслуживать до 14 блоков ИПП или станций ДТИ, кроме этого он обеспечивает запуски измерений этих блоков. Сигнал запуска измерений формируется системой синхронизации комплекса ВЭПП-2000 и может быть различным для различных типов датчиков, поэтому, как видно из рисунка 3.6, линии ИПП и станций ДТИ подключены к двум независимым CAN-интерфейсам. Как правило, используется один и тот же импульс, обеспечивающий синхронный с моментом пролета пучка запуск измерений, либо задержанный на 200–700 мкс — время, необходимое для окончания всех процессов в цепях питания импульсных элементов канала, которые могут служить источником помех.

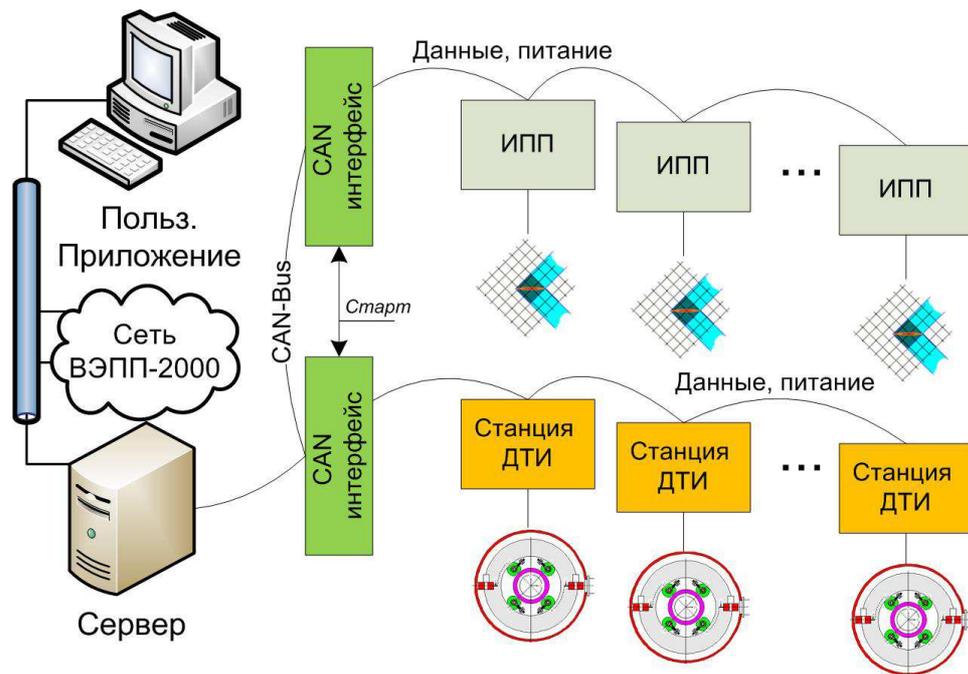


Рис. 3.6. Схема подключения пучковых датчиков канала БЭП–ВЭПП-2000.

В свою очередь, CAN-интерфейсы объединены общей CAN-линией, с помощью которой специальная компьютерная программа — сервер — обеспечивает управление датчиками и доступ к данным АЦП. Компьютер, на котором выполняется данная программа интегрирован в сеть комплекса ВЭПП-2000, что позволяет управляющему комплексом оператору с помощью другой специализированной программы — клиентского приложения — осуществлять управление датчиками и получать информацию о параметрах пучка в каналах БЭП–ВЭПП-2000.

Пример такой клиентской программы с данными о пролете электронного пучка по каналу БЭП–ВЭПП-2000 представлен на рисунке 3.7.

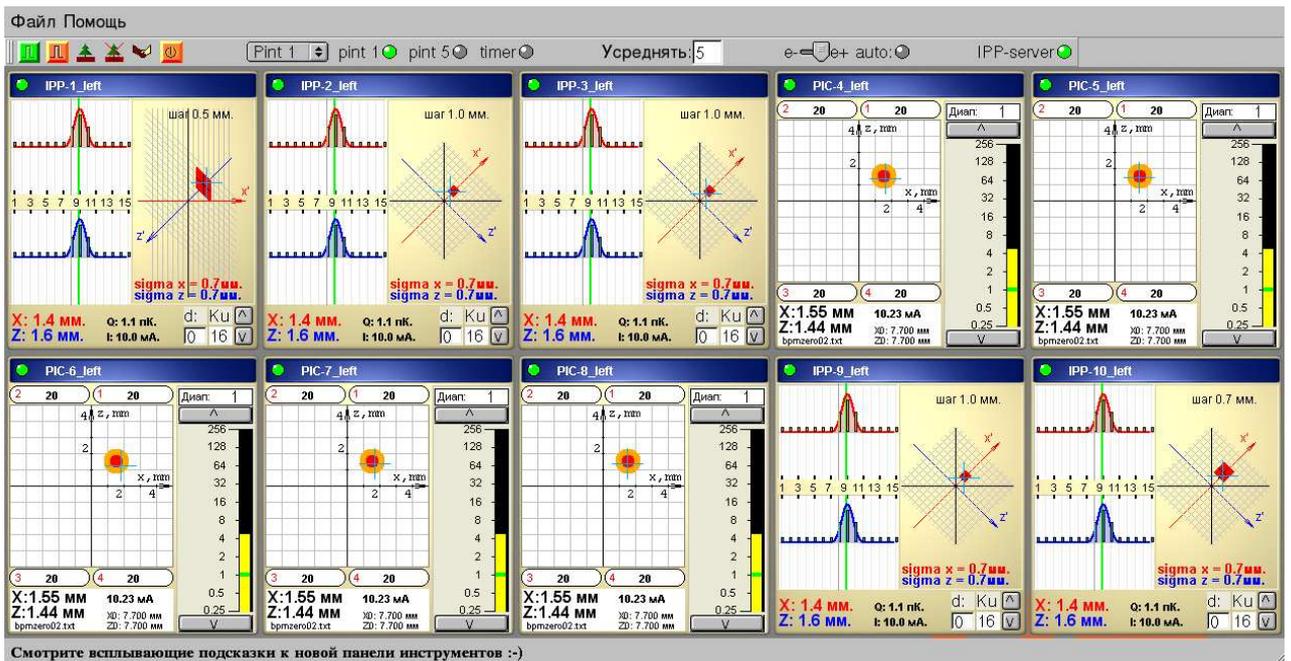


Рис. 3.7. Программа «ИПП» на комплексе ВЭПП-2000. Электронный пучок в канале.

Данная программа предоставляет оператору весь необходимый инструментарий для работы с датчиками положения пучка в каналах БЭП–ВЭПП-2000:

- Установка параметров работы датчиков: коэффициент усиления / диапазон работы, задержка запусков (для ИПП) и сохранение этих настроек.
- Набор, вычитание и сброс фоновых значений сигналов<sup>1</sup>.
- Автоматическое переключение режима работы с электронного на позитронный и в обратную сторону синхронно с системой автоматизации комплекса ВЭПП-2000.
- Расчет параметров пучка на основе первичных данных с АЦП в зависимости от типа датчика: координаты, интенсивность, размеры (для ИПП).
- Возможность усреднения нескольких выстрелов для проведения точных пучковых измерений в каналах.
- Сохранение измеренных параметров пучков в файл для дальнейшего анализа.

<sup>1</sup> Набор фоновых значений осуществляется путем усреднения данных нескольких выстрелов в отсутствие реального пучка в каналах.

### 3.4. Пример измерения с помощью системы ИПП: электронная оптика в начале каналов

В качестве одного из применений системы измерения параметров пучков в каналах транспортировки БЭП–ВЭПП-2000 приведем следующий пример экспериментального измерения оптических функций в начале каналов.

Накопительное кольцо БЭП имеет 12 периодов (таблица 1.1). Благодаря этому, последовательно изменяя при помощи вертикальных и горизонтальных корректоров (одинаковых в каждом периоде) координаты выпуска частиц, можно “описать” фазовый эллипс начальных траекторий вокруг некоторого невозмущенного состояния. Чтобы измерить фазовый портрет пучка, необходимо два измерителя положения — для вычисления координаты и угла (зная расстояние между датчиками). При этом координата и угол должны вычисляться как отклонения от начального положения пучка на этих датчиках.

Каналы БЭП–ВЭПП-2000 предоставляют удобную схему измерений таких фазовых портретов: расстояние между датчиками IPP1 ( $s = 52.89$  см) и IPP2 ( $s = 141.89$  см) составляет 89 см и между ними отсутствуют элементы оптической фокусировки — дипольные магниты и линзы (см. рисунок 3.1).

Эксперимент по измерению фазового портрета пучков на выпуске из БЭП проводился на энергии 135 МэВ. Пучок в БЭП при таких условиях имеет большой по сравнению с шагом сетки вторично-эмиссионных датчиков, размер — 2–3 мм, что позволяет с достаточной точностью  $\sim 50$  мкм измерять положение пучка в канале (п. 3.1).

Результаты измерения фазовых портретов в горизонтальной и вертикальной плоскостях, приведенные к местам с минимальным поперечным сечением пучка, т.е.  $\alpha = 0$ , (разные для  $x$  и  $z$ ) представлены на рисунках 3.8 и 3.9.

Пунктирными линиями на графиках обозначены фазовые эллипсы, соответствующие

$$\beta_x = 61.4 \text{ см}, \quad \alpha_x = 0.3, \quad \beta_z = 51.0 \text{ см}, \quad \alpha_z = -0.82 \quad (3.1)$$

в плоскости, соответствующей выходу из магнита М1 ( $s = 47.89$  см).

Значения, рассчитанные на основе линейной оптики БЭП и проектных параметрах магнита М1 (см. таблицу 2.6) на его выходе равны  $\beta_x = 195$  см,  $\alpha_x = -0.43$  и  $\beta_z = 61.2$  см,  $\alpha_z = 0.19$ . Такое различие, по-видимому, объясняется тем, что пучок, имея значительные отклонения от равновесной траектории при выпуске из БЭП, испытывает сильное влияние

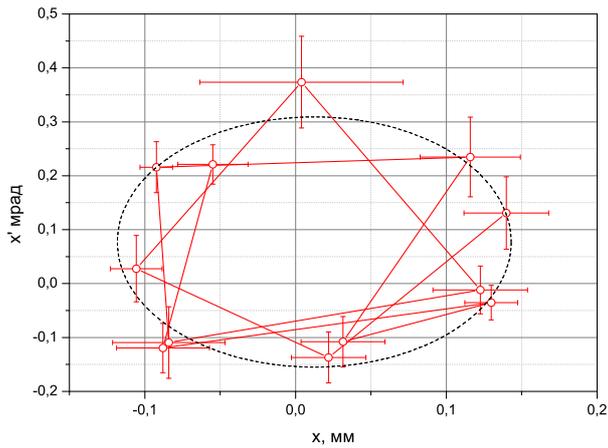


Рис. 3.8. Горизонтальный фазовый портрет,  
 $s = 64.9$  см.

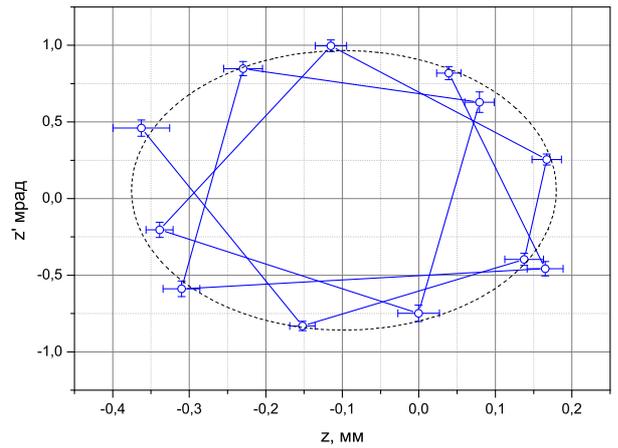


Рис. 3.9. Вертикальный фазовый портрет,  
 $s = 22.9$  см.

нелинейных полей последнего перед выпуском дублета линз (см. рисунок 1.2).

Тем не менее, расчет электронно-оптической фокусировки канала с новыми начальными условиями (3.1), также позволяет добиться хорошего согласования оптических функции каналов и кольца ВЭПП-2000 при незначительных изменениях фокусирующих свойств линз. Данное свойство связано с тем, что на начальном этапе основная задача фокусировки — изменение знака и зануление дисперсионной функции, а изменения, связанные с новыми начальными условиями удастся скомпенсировать набором остальных линз канала.

Таким образом, при работе с каналами инжекции можно использовать начальные значения (3.1), полученные из эксперимента и при этом не учитывать фокусирующие свойства выпускного магнита М1, т.к. фазовые портреты, отвечающие этим начальным условиям, измерены уже на выходе из этого магнита.

## Система автоматизации каналов инжекции

Создание автоматизированной системы управления современным ускорительным комплексом — большой электрофизической установкой — это сложная задача от решения которой в немалой степени зависит успех всего проекта в целом. Основное назначение такой системы — предоставить оператору удобный и гибкий способ управления работой ускорительного комплекса или любой из его частей и подсистем.

Каналы транспортировки инжекции пучков из накопителя БЭП в коллайдер ВЭПП-2000 состоят из двух частей: электронной — левый канал (рисунок 4.1) и позитронной — правый (рисунок 4.2). Оба канала имеют общую часть от выпуска из БЭП (магнит М1) до магнита МХ, который обеспечивает разведение электронного и позитронного пучков в левый и правый каналы соответственно. Всего каналы состоят из 38-ми импульсных магнитных элементов, 15-ти питаемых постоянным током и инфлекторной подсистемы (не показана на рисунках).

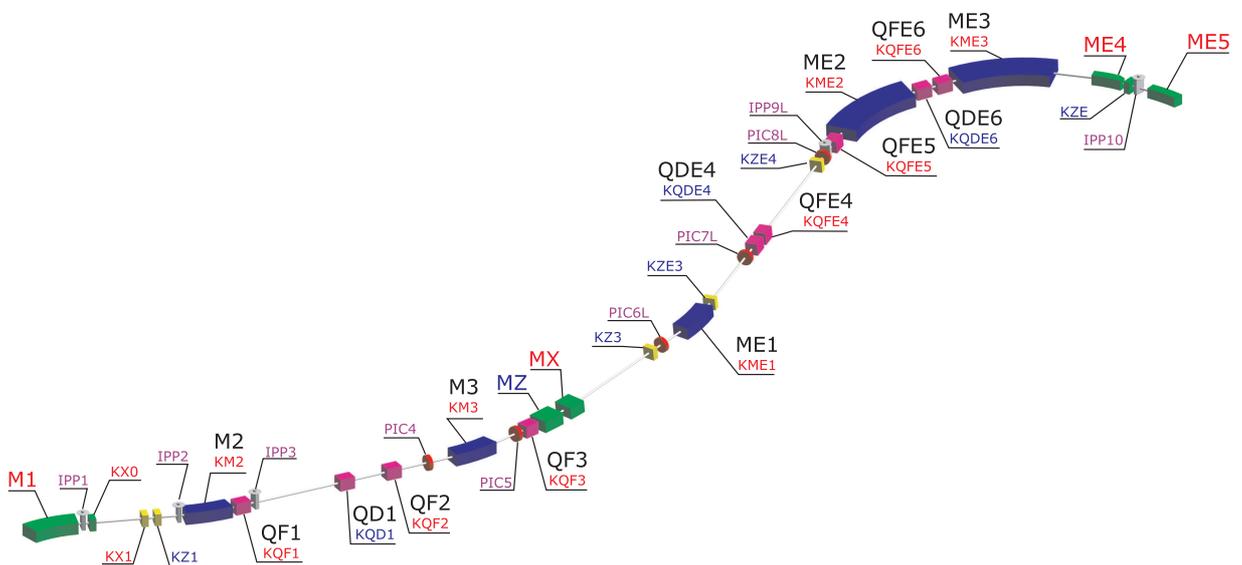


Рис. 4.1. Левый (электронный) канал БЭП–ВЭПП-2000.

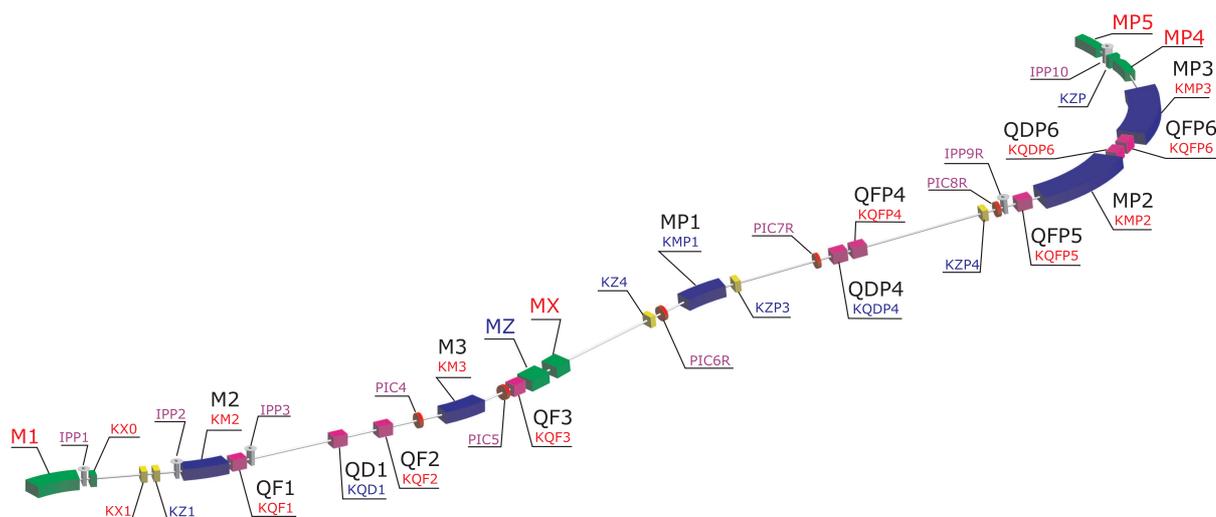


Рис. 4.2. Правый (позитронный) канал БЭП–ВЭПП-2000.

Архитектура системы управления каналов, как и всего комплекса ВЭПП-2000 [20, 21], основывается, в первую очередь, на аппаратном обеспечении, т.е. на источниках питания и блоках управления и контроля [22, 23].

#### 4.1. Управление импульсными элементами каналов

В каналах инжекции для питания импульсных магнитных элементов используется два типа источников питания: высоковольтный блок (ВВ-блок) — для магнитов М1, МЕ4, МР4, МЕ5, МР5 с полями 20 и 30 кГс и источник типа «АККОРД» — для остальных импульсных элементов канала, т.е. квадрупольных линз, корректоров и магнитов МХ и МZ. Оба типа источников предназначены для работы на индуктивную нагрузку и состоят из конденсаторной батареи с управляемым напряжением заряда и цепи запуска “выстрела”. Схемы управления и измерения этих типов источников весьма схожи.

Преобразователь код-скважность (ПКС)<sup>1</sup> управляет зарядом батареи. Время выстрела, или, иными словами, задержка запуска источника после некоторого импульса общего старта, выставляется с помощью кода, задаваемого в генератор временных интервалов (ГВИ). Эта задержка подбирается индивидуально для каждого источника таким образом, чтобы

<sup>1</sup> Описания электронных блоков и устройств, используемых для автоматизации данных каналов, можно найти на сайте отдела автоматизации ИЯФ СО РАН [24]

максимумы токовых импульсов всех источников совпадали с пролетом пучка через магнитный элемент — таким способом достигается наибольшая стабильность работы импульсного элемента. При помощи блока ГВИ можно также блокировать выстрелы определенных элементов, маскируя импульсы запусков соответствующих источников питания.

Измерения параметров работы каждого элемента производятся с помощью блока измерения импульсных параметров (БИИП), представляющего собой интегрирующий АЦП, а также при помощи блока цифрового осциллографа ADC333.

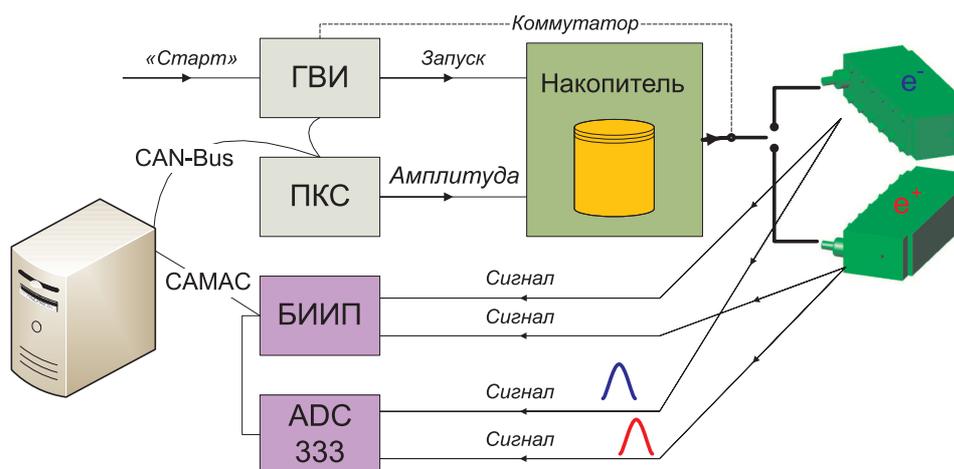


Рис. 4.3. Схема управления источником импульсного питания типа ВВ-Блок.

Все контрольно-измерительные устройства и блоки являются многоканальными, и способны обслуживать несколько источников питания. Более того с целью уменьшения количества высоковольтных источников питания (ВВ-блоков), магнит М1 снабжен управляемым коммутатором для смены полярности при переходе от работы с электронами на позитронный режим, а магниты МЕ4/МР4 и МЕ5/МР5 имеют независимый от первого аналогичный общий на два источника коммутатор, переключающий магниты с электронного на позитронное направление. Управление коммутаторами производится с помощью т.н. выходных регистров блока ГВИ, управляющего данными магнитами. Схема управления источником типа ВВ-блок представлена на рисунке 4.3. Управление «АККОРДами» отличается лишь отсутствием коммутатора. Кроме этого, к ВВ-блокам магниты подключены через понижающие трансформаторы. Длительности импульсов существенным образом зависят от индуктивностей нагрузок и приведены в таблицах параметров импульсных элементов в главе 2 (таблицы 2.5, 2.6, 2.7 и 2.8).

Таблица 4.1. Основные параметры импульсных источников тока.

Тип	$C$ , мкФ	$U$ , кВ	$I_{max}$ , кА	Кол-во
ВВ-блок	12	50	60	3
«АККОРД»	50–900	0.8	2	33

Импульс общего старта формируется системой синхронизации, связывающей ВЧ системы накопительного кольца БЭП и коллайдера ВЭПП-2000 и отвечающей за управление номером сепаратрисы и фазой влета впускаемого пучка в ВЭПП-2000<sup>1</sup>.

## 4.2. Управление источниками постоянного тока

Часть дипольных коррекций каналов инжекции питается управляемыми источниками постоянного тока УМ-20 и УМ-6, рассчитанные на максимальный ток 20 А и 6 А соответственно [25, 26]. Двухамперными источниками питаются корректирующие обмотки 17.2° и 41.2° магнитов (п. 2.4.1), а шестиамперными — дополнительные коррекции, перечисленные в таблице 2.9.

Токи этих источников задаются с помощью выходных напряжений многоканального ЦАП (CANDAC-16), а отработанные значения токов и напряжений измеряются многоканальным АЦП (CANADC-40). Схема питания источников постоянного тока представлена на рисунке 4.4.

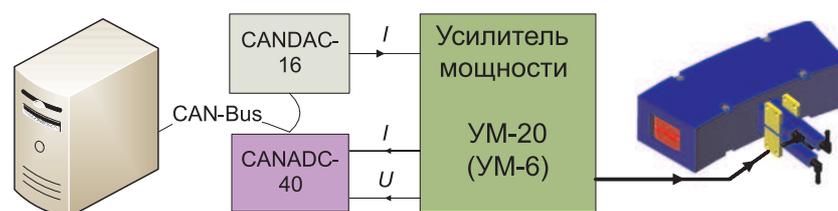


Рис. 4.4. Схема управления источником питания постоянного тока.

Данная подсистема является частью общей системы управления слаботочными коррекциями комплекса ВЭПП-2000, которая насчитывает более 150 магнитных элементов [21].

<sup>1</sup> Подробно система синхронизации описывается в п. 4.4

### 4.3. Управление генераторами инфлекторов

Для питания инфлекторных пластин коллайдера ВЭПП-2000 в ИЯФ СО РАН были созданы два типа генераторов импульсов положительной и отрицательной полярности (электронный и позитронный соответственно) амплитудой 50 кВ и длительностью 20 нс [9]. Схема управления генераторами инфлекторов представлена на рисунке 4.5.

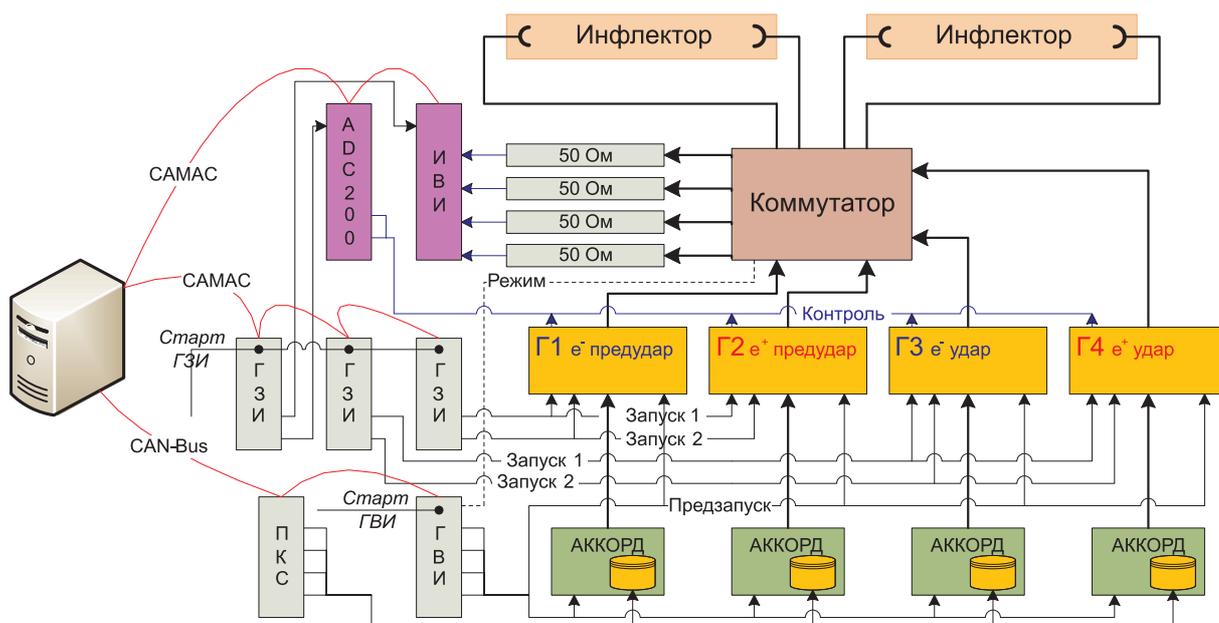


Рис. 4.5. Схема управления генераторами инфлекторов.

Импульсный источник типа «АККОРД» является накопителем энергии для генератора. «АККОРД» каждого из четырех генераторов управляется при помощи независимых каналов ГВИ и ПКС, по схеме аналогичной рисунку 4.3. Для управления временем импульса на инфлекторной пластине в наносекундном диапазоне используются блоки генераторов задержанных импульсов (ГЗИ), имеющих дискретность регулирования выходных импульсов на уровне 100 пс.

Поскольку генераторы инфлекторов работают парами (либо электронные, либо позитронные<sup>1</sup>), то в целях экономии управляющих блоков и подводящих кабелей целесообразно использовать одни и те же импульсы ГЗИ для запуска генераторов, не использующихся одновременно, например, электронный и позитронный удары (генераторы Г3 и Г4 на рисунке 4.5).

<sup>1</sup> Работа другой пары блокируется путём запрещения запусков их ГВИ.

Контроль работы генераторов осуществляется с помощью контрольного сигнала, показывающего процесс зарядки генератора от «АККОРДа» измеряемого цифровым осциллографом ADC200. Кроме этого, сильно ослабленный ( $\sim 1 : 600$ ) сигнал с пластины подается на измеритель временных интервалов (ИВИ), показывающий положение импульса с 0.5 наносекундной точностью.

Поскольку, для инъекции частиц в ВЭПП-2000 применяются инфлекторные пластины работающие на встречной для частиц бегущей волне, то для смены режима инъекции с электронов на позитроны и обратно требуется не только переключение пластин на другой тип генераторов, но и изменение направления распространения волн. Это переключение осуществляется с помощью управляемого коммутатора сигналов высокой частоты.

#### 4.4. Система синхронизации каналов

Для временной синхронизации работы всех элементов каналов перепуска частиц с фазами ВЧ БЭП и ВЭПП-2000 используется разработанный в рамках создания ВЧ-системы комплекса “Блок Принятия Решения” (БПР). При подготовке к перепуску система управления ВЧ комплекса ВЭПП-2000, управляя частотой ВЧ БЭП, приводит её к значению 299:274 частоты ВЧ ВЭПП-2000<sup>1</sup>. Рациональное отношение частот означает, что с некоторым периодом, соответствующем в данном случае частоте  $\approx 44$  кГц, соотношение фаз ВЧ этих ускорительных колец будет повторяться.

Схема синхронизации каналов БЭП–ВЭПП-2000 приведена на рисунке 4.6. Блок генератора тактовых импульсов (ГТИ) задает стартовые импульсы с частотой 0.7 Гц<sup>2</sup>, привязанные фазе сети питания 50 Гц.

Импульс “Разрешение” формируется т.н. ГВИ “длинных” времен с задержкой  $\approx 0.5$  с от тактового импульса ГТИ, необходимой для запуска процессов, имеющих длительность в этом интервале времен, например: импульс БАМПа БЭП<sup>3</sup> ( $\sim 15$  мс), измерения напряжений зарядов конденсаторов «АККОРДов» (0.1–0.3 с), запуск ПЗС-камер для регистрации процессов выпуска и впуска (10–100 мс) и т.п.

<sup>1</sup> Проектная частота ВЧ ВЭПП-2000 12.292 МГц, 299:274 от нее — 13.41353 МГц. Однако, в процессе реальной работы ускорительного комплекса значения частот могут меняться.

<sup>2</sup> 0.7 Гц — частота работы инжекционной части комплекса ВЭПП-2000.

<sup>3</sup> Процедура выпуска из БЭП не изменилась в процессе модификации и строительства новых каналов инъекции и потому не рассматривается в данной работе.

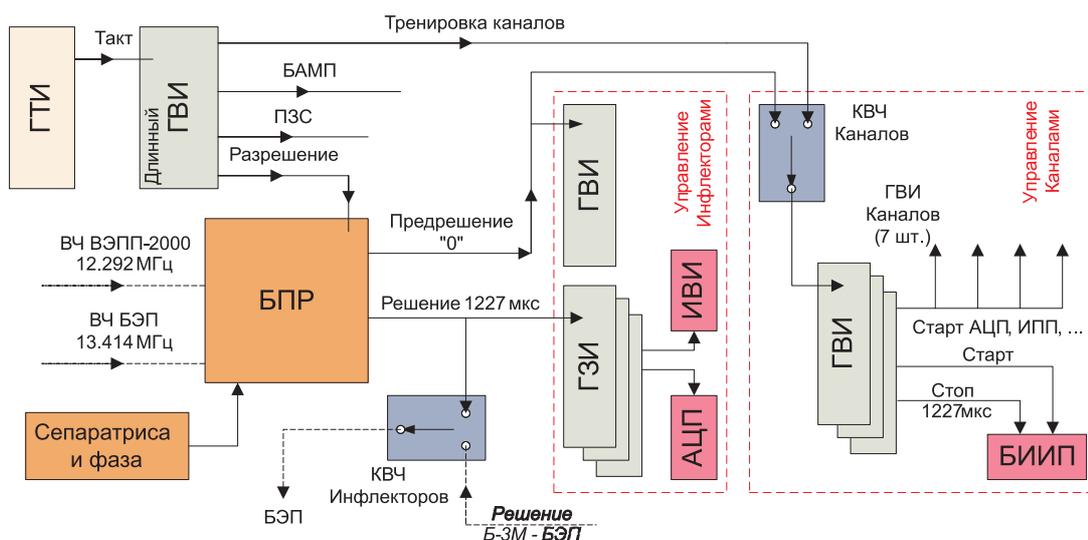


Рис. 4.6. Схема синхронизации каналов БЭП–ВЭПП-2000.

После получения БПРом импульса “Разрешение”, который подается после установки всех необходимых кодов в управляющие блоки, а также перевода коммутаторов ВВ-блоков и инфлекторов в требуемое (электронное или позитронное) положение, БПР генерирует два импульса, привязанных к обеим фазам ВЧ, — т.н. “Предрешение” и “Решение”, отстоящие друг от друга по времени на 1227 мкс. Регулируя задержку от момента совпадения фаз ВЧ до “Решения” (а следовательно и до “Предрешения”), БПР позволяет установить номер сепаратрисы ВЭПП-2000 (одной из 14) и фазу влета частиц в нее.

Временная задержка 1227 мкс определяется максимальным временем разрядки импульсных генераторов питания магнитных элементов, которое может достигать 800 мкс. Первый импульс — “Предрешение” — используется для запуска ГВИ всех «АККОРДов» (в том числе и «АККОРДов» инфлекторов — импульс “Старт ГВИ” на рисунке 4.5), а также для запуска различных процессов, таких, как измерение токовых импульсов генераторов, блокировки работы детекторов коллайдера ВЭПП-2000, а также для запуска системы диагностики пучков. Второй импульс — “Решение” — используется для запуска ГЗИ инфлекторов для синхронизации их импульсов с ВЧ (т.е. с пучком) в диапазоне наносекундных времен (импульс “Старт ГЗИ” на рисунке 4.5). Также, к этому импульсу с помощью аналогичных ГЗИ привязаны запуски измерителей контрольных сигналов генераторов и сигналов с пластин инфлекторов.

Обособленность “длинного” ГВИ связана с особенностями работы данного устрой-

ства. В различных временных диапазонах он имеет различную дискретность регулирования времени, которой недостаточно для синхронизации в микросекундном диапазоне, если блок настроен на работу в секундном.

Наличие ключей высокой частоты (КВЧ) в цепях временной синхронизации позволяет тренировать как инфлекторы, так и импульсные элементы каналов инжекции независимым друг от друга образом. Периодическая тренировка импульсных генераторов во многих случаях приводит к более стабильной их работе, кроме того, она позволяет контролировать работу источников в промежутках между реальными перепусками, которые носят нерегулярный характер и могут достигать десятков минут.

Тренировка каналов инжекции предполагает выстрелы генераторов без реального пролета пучка по каналу, т.е. при тренировке источников питания импульсных элементов не происходит выпуска пучка из БЭП, а запуск системы происходит в обход БПР специальным каналом ГВИ.

В случае тренировки инфлекторной подсистемы коммутатор переключает тренируемые генераторы на балластную нагрузку (рисунок 4.5), минуя тем самым инфлекторные пластины ВЭПП-2000, способные подействовать своим полем на пучок в коллайдере. При этом, подается импульс “*Разрешение*”, запускающий всю инфлекторную подсистему, который, тем не менее не запускает источники каналов инжекции из-за переключенного в тренировочное положение “Коммутатора Каналов” (рисунок 4.6).

В режиме перепуска пучков частиц система управления с помощью “КВЧ Инфлекторов” (см. рисунок 4.6) подает сигналы запуска также и в подсистему выпуска пучков из БЭП. В остальное время, при накоплении пучков в БЭП, эта подсистема запускается от собственного решения на перепуск Б-ЗМ–БЭП.

## 4.5. Структура программного обеспечения

Для управления каналами инжекции пучков в коллайдер ВЭПП-2000 была разработана специальная система программного обеспечения<sup>1</sup>. В основе построения данной системы лежит клиент-серверная архитектура взаимодействия программ и приложений между собой. В качестве основного протокола передачи данных между серверами и клиентами выбран про-

---

<sup>1</sup> Система автоматизации ускорительного комплекса работает под управлением операционной системы Gentoo Linux [27] и состоит из 15-и компьютеров PC-класса, объединенных в одноранговую сеть [20, 21]

токол TCP/IP имеющий повсеместное распространение.

Низкоуровневые (серверные) программы ответственны за предоставление доступа к управляющим и измерительным блокам (аппаратному обеспечению) в стандартах CAN-bus и САМАС. Из-за особенностей аппаратного обеспечения, выражающихся в различии назначения блоков, а также в различии стандартов связи с ними, нижний уровень программного обеспечения был разделен на три независимые части: сервер управления источниками постоянного тока (*um-server*<sup>1</sup>), сервер управления импульсными источниками (*pulse-server*) и сервер, обслуживающий разнообразную управляющую и измерительную аппаратуру в стандарте САМАС (*camac-server*).

Данные программы получают начальную информацию (данные о соответствии адресов блоков и номеров управляющих и измерительных каналов именам элементов) из соответствующих конфигурационных баз данных. Структуры этих баз данных разработаны в соответствии с особенностями функционирования каждой из подсистем.

Назначение клиентских приложений:

- предоставлять оператору удобный и понятный интерфейс управления всеми элементами каналов инжекции;
- осуществлять контроль за работой генераторов и источников питания;
- выполнять функции записи, просмотра и чтения истории режимов работы;
- автоматически переключать режимы работы каналов (электроны/позитроны или тренировка/выстрел) по командам общей системы автоматизации комплекса ВЭПП-2000.

Схема автоматизации каналов инжекции в ВЭПП-2000 и потоков данных между программами представлена на рисунке 4.7. В качестве примеров клиентских приложений на данной схеме приведены программы управления каналами (а), управления инфлекторами (б) и контроля импульсных источников питания (в), описанные ниже.

Одной из ключевых особенностей системы автоматизации каналов инжекции, да и всего комплекса ВЭПП-2000 в целом является наличие службы общесистемных сообщений — *MessageServer*. Посредством этой службы распространяются сообщения, имеющие глобальный характер для всей системы управления комплексом: смена режимов работы, уведомления о критических ситуациях, сообщения о событиях типа “выпуск пучка”, “перепуск”,

<sup>1</sup> *um-server* — от названия источников питания — УМ-20 и УМ-6.

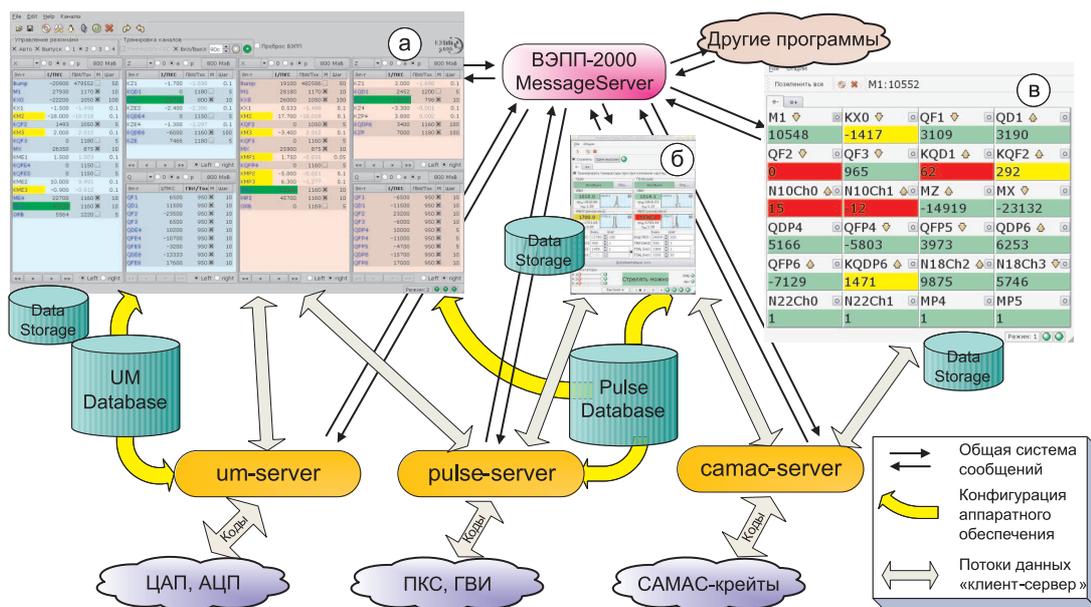


Рис. 4.7. Схема работы программного обеспечения управления каналами.

и т.д. Данный механизм обеспечивает четкую и слаженную работу всего пакета программ управления и диагностики ускорительного комплекса ВЭПП-2000.

#### 4.6. Программы управления и контроля

Основное назначение клиентских программ — удобный и простой интерфейс управления каналами инъекции. При разработке этого типа приложений учитывались как особенности самих каналов инъекции, так и традиции создания программного обеспечения, принятые в коллективе, работающем на ускорительном комплексе ВЭПП-2000 и в ИЯФ СО РАН.

Созданные в рамках работы и представленные в данном разделе программы написаны на языке C++ с использованием графической библиотеки Qt [28, 29].

В соответствии с общей системой автоматизации ВЭПП-2000 существует 4 режима работы ускорительного комплекса, описанные в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Режимы работы комплекса ВЭПП-2000.

	Система		ИЛУ–Б-3М	БЭП	Каналы и Инфлекторы	ВЭПП-2000
	№					
Электроны $e^-$	1	Производство электронов	Производство электронов	Накопление электронов	Тренировка электронных генераторов	Светимость
	2	Блокировка работы	Блокировка работы	Подъем энергии и выпуск электронов	Перепуск электронов	Инжекция электронов
Позитроны $e^+$	3	Производство позитронов	Производство позитронов	Накопление позитронов	Тренировка позитронных генераторов	Светимость
	4	Блокировка работы	Блокировка работы	Подъем энергии и выпуск позитронов	Перепуск позитронов	Инжекция позитронов

#### 4.6.1. Управление каналами инжекции в ВЭПП-2000

Программа “Каналы ВЭПП-2000”, основное окно которой представлено на рисунке 4.8, предназначена для управления магнитными элементами и задания режимов работы каналов инжекции БЭП–ВЭПП-2000.

При старте программы происходит ее инициализация, из конфигурационных баз данных систем импульсного питания и источников УМ-6(20) читается список элементов каналов инжекции, их свойства и параметры.

Группа “Управление режимами” в верхней части программы предназначена для управления поведением программы при переходах комплекса в различные режимы работы. Флажок “Авто” включает работу программы в автоматическом режиме, а флажок “Выпуск” разрешает программе производить выпуск частиц из БЭП по командам автоматики<sup>1</sup>. Кроме этого, в данной группе сосредоточены кнопки ручного переключения режимов работы этой программы.

В памяти программы хранится *два* текущих массива работы: электронный и позитронный, которые инициализируются при старте программы из собственного хранилища массивов. Массивом называется совокупность всех элементов с их кодами и настройками. При переходе в 1-й или 2-й режимы реализуется электронный массив, а при переходе в 3-й или

<sup>1</sup> Такое разделение функций бывает полезно в тестовых целях, когда нужно выполнять переходы в режимы не делая при этом выпуска из БЭП



Рис. 4.8. Программа “Каналы ВЭПП-2000”.

4-й — позитронный.

Группа “Тренировка каналов” предназначена для управления параметрами тренировки импульсных магнитных элементов. В ней задается интервал производства тренировочных выстрелов, минимальное значение которого составляет 10 с. Меньшие интервалы при длительной работе могут привести к перегреву и выходу из строя как магнитных элементов, так и их источников питания.

Флажок “Уменьшать ПКС” означает 10%-е снижение кода ПКС всех импульсных элементов при переходе в 1-й и 3-й режим по сравнению с электронным и позитронным массивами соответственно. Таким образом, при включенном режиме тренировки, магнитные элементы обрабатывают меньший, чем записано в массиве, код. Такая необходимость возникает в связи с особенностью источников питания типа «АККОРД» — при переходе с большего кода ПКС на меньший по абсолютному значению, источнику требуется время на разрядку конденсаторной батареи, либо один цикл разряда-заряда, т.е. выстрел. На практике этот режим применяется только при интенсивной настройке работы каналов. В штатном режиме работы, при настроенных каналах, для повышения стабильности рекомендуется убирать эту отметку и тренировать генераторы на кодах ПКС “из массива”.

Кнопка  в группе “Тренировка каналов” при нажатии производит один тренировочный выстрел.

Флажок “Проброс ВЭПП” выключает на время  $\approx 100$  мс генератор ВЧ ВЭПП-2000, что приводит к сбросу пучка в кольцо. Данный флажок используется при настройке т.н. однократной инжекции в ВЭПП-2000.

Основное управление массивами сосредоточено в шести сгруппированных вкладках, отображающих списки элементов, их свойства и настройки различных параметров. Группа элементов в каждой вкладке выбирается при помощи выпадающего списка в верхней её части, содержащего следующие типы элементов: X — горизонтальные магниты и корректоры; Z — вертикальные магниты и корректоры; Q — квадрупольные линзы, GVI — независимые каналы ГВИ, управляющие различными уставками времён; PULSE — только импульсные элементы; UM — только магниты и корректоры, питаемые постоянным током.

В верхней же части осуществляется выбор массива для редактирования. Кнопки “e” и “p” осуществляют выбор электронного или позитронного массивов. Редактирование электронного массива дополнительно индицируется голубым фоном вкладки, позитронного — розовым. При редактировании свойств элементов в этих режимах изменения запоминаются в памяти программы и реализуются, т.е. заданные коды отрабатываются аппаратным обеспечением, только при переходах программы в соответствующий режим. Изменения в массиве “0” реализуются в аппаратном обеспечении сразу и не запоминаются ни в одном из текущих массивов. Данная возможность используется, в основном, для поиска и устранения неисправностей в работе каналов, а также в тестовых целях.

Кнопка, отвечающая за значение энергии массива позволяет осуществить одно из двух действий: сопоставить текущему массиву, электронному или позитронному, новое значение энергии пучка, либо пересчитать коды ПКС и токи элементов канала пропорционально на другую энергию. Последнее бывает необходимо при значительных перестройках энергии перепуска и инжекции. Выбор действия осуществляется в дополнительном окне, возникающем после нажатия этой кнопки.

В списке элементов отображаются следующие параметры, соответствующие каждому из них. Для импульсных элементов: название, код ПКС, время запуска ГВИ в мкс, маска ГВИ (флажок означает разрешение работы элемента или канала ГВИ), шаг изменения. Для элементов, питающихся от источников постоянного тока: название, заданный ток, из-

меренный в данный момент ток<sup>1</sup> и точно также шаг изменения. Кроме этого, для большей наглядности, импульсные элементы имеют названия, отображаемые синим цветом, и более темный фон всей строки таблицы. Для непосредственного редактирования доступны колонки “Ток/ПКС” и шаг, а в случае импульсных элементов еще колонки “ГВИ” и “М”.

В системе автоматизации каналов предусмотрены “чистые” каналы ГВИ (группа GVI в списке), не относящиеся к конкретному источнику питания и не имеющие соответствующего канала ПКС. Такие каналы используются для запусков различных подсистем и процессов: измерения БИИП, запуск датчиков положения пучка, и т.п.

В каждой вкладке для текущего регулирования может быть выбран один элемент, причем для импульсных одна из колонок: ПКС или ГВИ. При этом становится доступной группа кнопок “больше-меньше” внизу вкладки. Внутренние кнопки при нажатии делают один шаг, заданный в соответствующей колонке, внешние — шаг×10.

В случае определения программой каких-либо неисправностей в работе элемента канала, его название подсвечивается красным фоном, а в строке состояния внизу окна программы в этом случае периодически возникают сообщения с описанием неисправностей. Как правило, это может быть связано с отключением управляющего блока (ГВИ, ПКС, ЦАП или АЦП) или неполадками в связи с ним. Данная ситуация не мешает корректной работе программы с другими элементами, однако, для работы с пучками необходимо устранение неисправностей.

Поскольку массив — это совокупность *всех* элементов каналов, то, например, в электронном массиве присутствуют элементы, относящиеся к правому, позитронному, каналу. Выбор того, какие элементы представлены на вкладке в данный момент, производится кнопками “Left” и “Right” внизу вкладки. Как правило, коды ПКС и токи “противоположных” элементов равны аналогичным параметрам другого массива, а запуски импульсных элементов заблокированы. Однако следить за “скрытыми” элементами и устанавливать им нужные значения — обязанность оператора. По-умолчанию, при выборе электронного массива отображаются элементы левого канала, при выборе позитронного — правого, а выбор массива “0” отображает весь список. Следует помнить, что магниты ME4/MP4 и ME5/MP5 имея различные названия питаются одним коммутируемым источником на каждую пару.

Коммутаторы, переключающие полярность магнита M1 и ветви инжекционного участ-

---

<sup>1</sup> Это означает, что напротив элемента в позитронном режиме редактирования может отображаться измеренный “электронный” ток, если электронный массив был реализован последним.

ка между собой управляются автоматически при переходах из режима в режим (если активирован флажок “Авто”). Тем не менее, посмотреть текущее состояние коммутаторов можно в окне “Управление регистрами”, которое появляется при нажатии кнопки  на панели инструментов вверху окна программы, либо при активации соответствующего пункта меню. В данном окне также собрана информация о блокировках в системе безопасности каналов инжекции, и есть возможность вручную управлять положением коммутаторов и осуществлять включение–выключение элементов, питаемых от ВВ-блоков.

Программа имеет возможность сохранять настроенные массивы в собственном хранилище — базе данных и считывать их оттуда (кнопки и пункты меню “Сохранить”, и “Прочитать”). Кроме этого программа автоматически сохраняет любые изменения, сделанные в массивах, в момент реализации соответствующего режима работы. Факт изменения массива отображается звездочкой рядом с номером режима в группе “Управление режимами” — (2\* или 4\*). После перехода программы в один из этих режимов массив сохраняется автоматически.

Процедура чтения массива из хранилища предлагает выбрать дату, способ сохранения (ручной или автоматический) и тип массива, после чего отображает список запомненных массивов с датой и временем его записи. При выборе нужного массива происходит замена текущего массива (электронного или позитронного) в памяти программы на выбранный.

Еще одно назначение этой программы — блокировать работу детекторов по сигналам автоматики. Это, как правило, требуется при производстве тренировочных выстрелов и перепусках частиц в коллайдер ВЭПП-2000.

В строке состояния программы в правом нижнем углу окна “лампочками” обозначается состояние подключений к серверам нижнего уровня и службе сообщений ВЭПП-2000. При обрыве соединения лампочка окрашивается в красный цвет, а программа с некоторым периодом пытается восстановить соединение. Без установленных соединений с этими серверами программа может работать некорректно и не выполнять часть возложенных на неё задач. Для попытки принудительного восстановления соединений, а также обновления конфигурации программы “с нуля” следует пользоваться кнопкой или пунктом меню “Reconnect” (спасательный круг)<sup>1</sup>.

В целом, несмотря на некоторую перегруженность программы различными задачами и функциями, она предоставляет оператору полноценные средства управления каналами транс-

---

<sup>1</sup> Это же относится и к другим программам, представленным в данном разделе.

портировки и инъекции частиц в коллайдер ВЭПП-2000. Безусловно, программа не лишена недостатков, тем не менее, она будет иметь дальнейшее развитие при сохранении основных ее свойств и решений.

#### 4.6.2. Контроль импульсных источников питания

Программа “БИИП” предназначена для контроля работы импульсных источников питания типа ВВ-блок и “АКККОРД” (п. 4.1). Как следует из названия, программа объединяет измерения различных источников, производимые блоками БИИП (см. также п. 2.4.3). В качестве источников сигнала для данных измерителей служат измерительные петли выпускных, доворачивающих и впускных магнитов (пп. 2.4.4, 2.4.6) и датчики на основе токовых трансформаторов<sup>1</sup> для остальных импульсных элементов каналов.

Внешний вид основного окна программы представлен на рисунке 4.9а. При работе, программа автоматически переходит из электронного в позитронный режим и обратно, переключая вкладки “e-” и “e+”.

Для каждого из элементов, есть возможность указать оптимальное значение измерения БИИП (кнопка справа от названия элемента , либо пункт меню “Позеленить все” вверху окна программы — установка текущих значений в качестве оптимальных для всех элементов). При наведении указателя мыши на элемент, вверху окна программы отображается его оптимальное значение. Эти значения свои для электронов и позитронов.

Стрелка, расположенная рядом с названием элемента, говорит о направлении отклонения измеренного значения от оптимального: вверх — значение больше оптимального по абсолютной величине (элемент сильнее воздействует на пучок), вниз — значение меньше оптимального, отсутствие стрелки означает точное соответствие оптимальному значению.

В зависимости от отклонения текущего измерения от оптимального, элемент для удобства оператора может подсвечиваться различными цветами:

- **зеленым**, если отклонение  $< 1\%$ ;
- **желтым** — отклонение  $> 1\%$ ;
- **красным** — отклонение  $> 10\%$ ;
- **синим** — значение имеет противоположный знак.

<sup>1</sup> Токовый датчик позволяет измерять значение тока в магнитном элементе в момент пролета пучка.

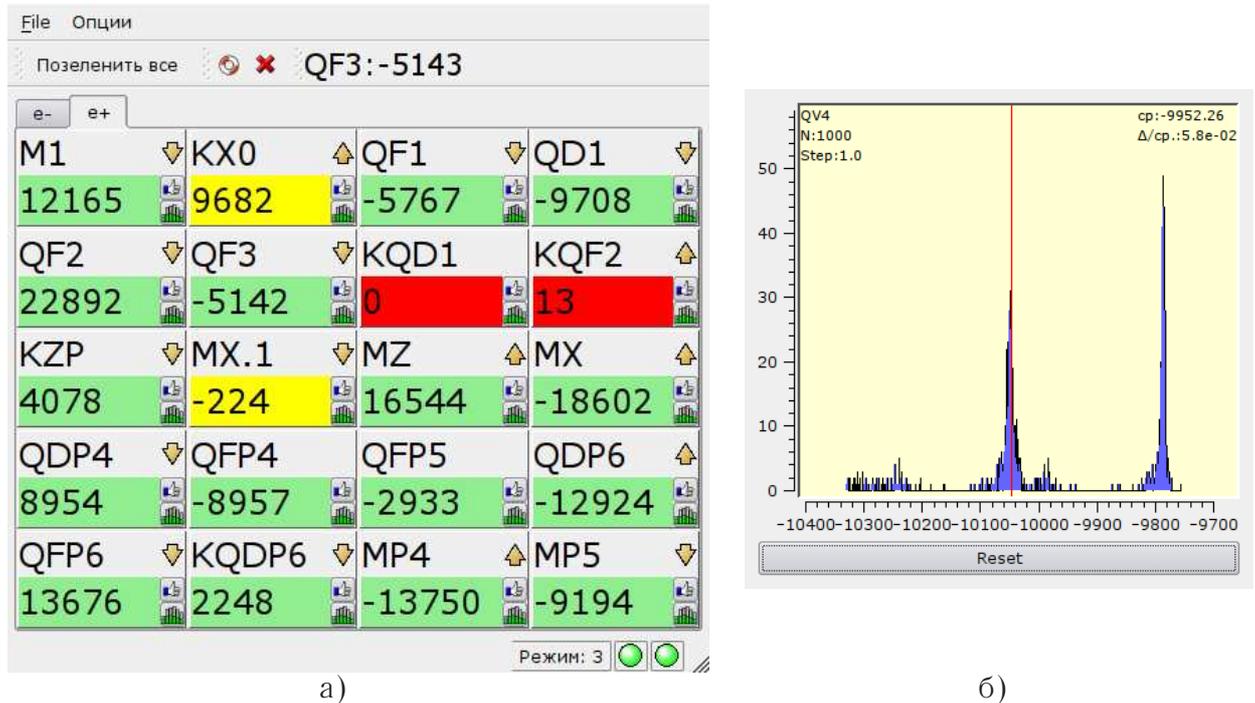


Рис. 4.9. “БИИП” — программа контроля работы импульсных источников питания.

Для более детального анализа стабильности работы импульсных источников питания, программа имеет возможность отображать гистограммы распределения измерений по элементам (кнопка  справа от имени элемента). Пример такого распределения приведен на рисунке 4.9б.

Кроме этого, в программе есть возможность вести историю измерений для последующего анализа работы каналов инжекции, например — для анализа, совместного с измерениями положения пучка (п. 3.3).

#### 4.6.3. Управление генераторами инфлекторов

Генераторы инфлекторов ВЭПП-2000 — одна из самых сложных подсистем комплекса. Поэтому, управление этой подсистемой и контроль за ее работой были объединены между собой и вынесены в отдельную программу — “Инфлекторы”. Основное окно программы представлено на рисунке 4.10.

Основное управление генераторами сосредоточено в группах “Удар” и “Предудар”. Кнопка “Вкл/Выкл” — разрешает или запрещает работу генератора путем управления мас-

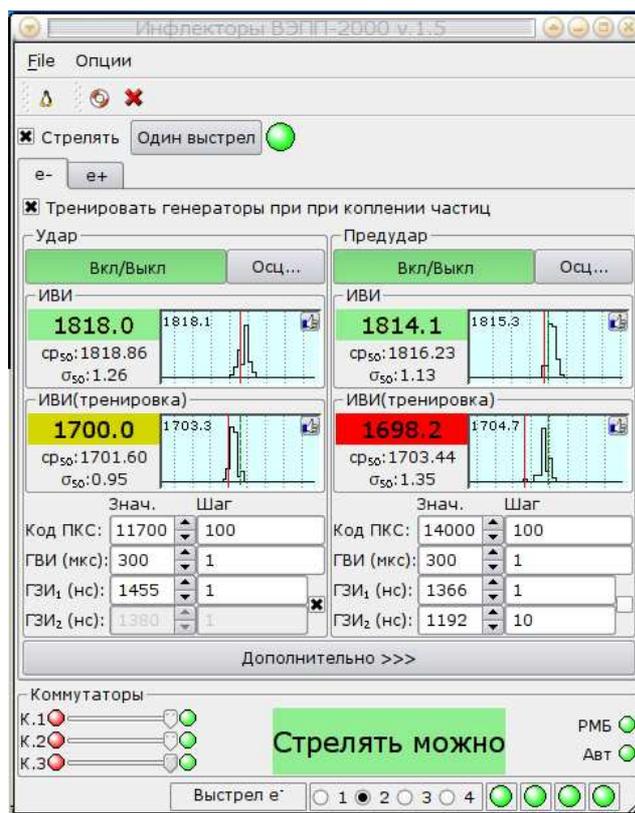


Рис. 4.10. Инфлекторы — основное окно программы.

кированием канала ГВИ запуска соответствующего “АККОРДА”<sup>1</sup>. Кнопка “Осц...” открывает новое окно с осциллограммой контрольного импульса генератора. Контрольный импульс обычно используется при настройке работы генераторов. Он представляет собой процесс зарядки формирующей линии генератора. Его длительность влияет на амплитуду выходного высоковольтного импульса генератора и его временную стабильность. Примеры таких импульсов приведены на рисунках 4.11 а и б. Типичное время между началом заряда и его окончанием составляет 360–400 нс.

“Код ПКС” управляет амплитудой импульса на инфлекторной пластине. Значение кода 22000 примерно соответствует 50 кВ напряжения, однако точная калибровка зависит от текущей настройки и особенностей каждого генератора и подбирается индивидуально.

“ГВИ” устанавливает время запуска “АККОРДА”, а “ГЗИ<sub>1</sub>” и “ГЗИ<sub>2</sub>” — времена запусков самих генераторов (импульсы “Запуск 1” и “Запуск 2” на рисунке 4.3). Эти импульсы отвечают за начало и конец заряда формирующей линии генератора. Момент окончания

<sup>1</sup> Подробная схема управления генераторами инфлекторов описана в п. 4.3.

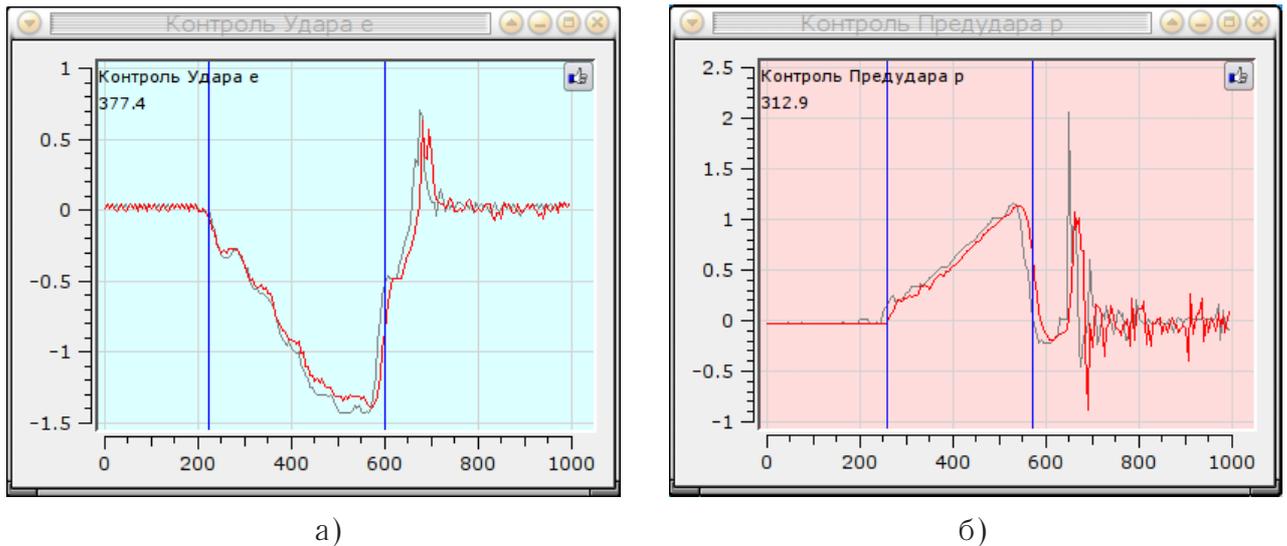


Рис. 4.11. Контрольные импульсы генераторов инфлекторов: а) — электронный удар, б) — позитронный предудар.

заряда соответствует появлению высоковольтного импульса на выходе генератора. Для регулирования времени этого импульса существует возможность одновременного изменения значений обоих каналов ГЗИ — их нужно “связать” соответствующей отметкой справа.

Группы “ИВИ” и “ИВИ(тренировка)” представляют измеренные времена срабатывания генераторов. По ним производится окончательный контроль работы генераторов. Гистограммы в правой части группы показывают стабильность работы генераторов. Шаг сетки — 5 нс, а фон гистограммы, как и в программе “Каналы ВЭПП-2000”, указывает на текущий режим работы: голубой — электроны, розовый — позитроны<sup>1</sup>. Текущее значение может быть запомнено как оптимальное (кнопка ). При отклонениях измеренного значения от оптимального не более, чем на 2 нс текущее измерение подсвечивается зеленым, не более, чем на 5 нс — желтым, а если отклонение превышает 5 нс — красным.

Режим тренировки генераторов (соответствующий флажок вверху окна программы) означает регулярные выстрелы тренируемых генераторов в балластную нагрузку, минуя пластины инфлекторов, чтобы не оказывать влияния на пучки в кольце коллайдера. Это достигается переводом коммутатора (управление коммутатором происходит автоматически) в соответствующее положение. Измеренные с помощью ИВИ импульсы в данном режиме отображаются в группе “ИВИ(тренировка)”. Различие измеренных времен в этих группах связано с разностью длин кабельных трасс при стрельбе с использованием пластин инфлекторов и

<sup>1</sup> Это же относится и графикам контрольных импульсов.

без них.

По кнопке “Дополнительно” открывается окно, в котором можно произвести настройку таких параметров как: времена импульсов “Предзапуск” и “Разрешение” или времена запусков измерителей ИВИ и ADC200 (см. рисунок 4.5). Эти настройки, как правило, изменяются очень редко и потому скрыты при обычной работе с программой.

В целях безопасности и повышения надежности и стабильности работы генераторов происходит общее блокирование работы генератора путем запрета импульсов запуска, если коммутатор занимает какое-либо промежуточное положение, которое отображается в нижней части окна программы. Запрет запусков происходит также и при срабатывании каких-либо блокировок, заложенных в схему безопасности всей подсистемы.

Программа имеет возможность автоматического или ручного (кнопки в строке состояния программы) переключения режимов работы:

1. Накопление электронов в БЭП — тренировка электронных генераторов.
2. Перепуск электронов в ВЭПП-2000 — выстрел электронных генераторов.
3. Накопление позитронов в БЭП — тренировка позитронных генераторов.
4. Перепуск позитронов в ВЭПП-2000 — выстрел позитронных генераторов.

При переключении режимов вкладки “e-” и “e+” меняются автоматически. Кроме этого, при внесении изменений в текущий режим работы, например если установлен 1-й режим и изменяется код ПКС электронного удара, эти изменения отрабатываются сразу, чтобы иметь возможность оттренировать генератор при новых настройках. Если изменения вносятся в параметры неактивных генераторов, то эти изменения запоминаются и отрабатываются только при переходе в соответствующий режим.

## Заключение

В данной работе представлены разработка проекта и создание каналов транспортировки и инжекции электронов и позитронов из бустерного накопителя БЭП в новый коллайдер ВЭПП-2000. Канал способен перепускать пучки  $10^8 - 10^{11}$  частиц с энергией до 900 МэВ.

В результате моделирования однооборотной инжекции в структуру ВЭПП-2000 с предударом накопленного пучка с учетом нелинейного поля инфлекторов бегущей волны рассчитан аксептанс структуры коллайдера ВЭПП-2000. Определены основные параметры впуска: оптические функции, координата и угол влета частиц, силы удара и предудара. Оптимальное напряжение предудара — 35 кВ, удара — 50 кВ. Показано, что влияние нелинейностей инфлектора незначительно, и для расчетов согласования оптических функций каналов инжекции и оптики коллайдера достаточно учитывать линейные оптические функции.

В основе построения каналов лежат принципы модульности и симметрии. Благодаря этому удастся уменьшить число различных типов магнитных элементов. Существенной особенностью каналов является трехмерная пространственная геометрия, поскольку плоскость орбиты кольца БЭП располагается на 760 мм ниже плоскости ВЭПП-2000, а длина каждого из каналов от выпуска до точки инжекции составляет 14.8 м.

Оптическая схема фокусировки, построенная на основе двух ахроматических поворотов позволяет достигнуть требуемого согласования оптических функций двух колец — БЭП и ВЭПП-2000, а также скомпенсировать вертикальную дисперсию, возникающую из-за подъёма пучков и вращений системы координат.

Поскольку оптическая структура впускного промежутка ВЭПП-2000 (набег фаз и значения оптических функций) идентична для разных настроек оптики коллайдера, переход канала от одного режима работы к другому не представляет практических затруднений.

В рамках представленного проекта сделаны расчеты конструкций всех элементов каналов, эти элементы спроектированы и изготовлены. Проведенные импульсные магнитные измерения показали хорошее соответствие полученных параметров проектным значениям.

Разработана и создана система диагностики пучков, объединяющая два взаимно дополняющих друг друга типа датчиков: измерители параметров пучков, основанные на эффекте вторичной эмиссии, и датчики токов изображения. Созданное в рамках проекта программное обеспечение системы диагностики, является частью системы автоматизации всего ускорительного комплекса ВЭПП-2000 и позволяет с хорошей эффективностью настраи-

вать прохождение пучков по каналам и их захват в коллайдер ВЭПП-2000.

Разработанная для управления каналами инжекции в коллайдер ВЭПП-2000 система автоматизации является одним из ключевых моментов работы каналов инжекции и всего ускорительного комплекса в целом. Система конфигурации и хранения режимов работы с использованием структурированных баз данных, а также программы контроля работы источников питания и генераторов позволяют оперативно решать задачи перенастройки системы на новый режим работы или при поиске и устранении неизбежных поломок и неисправностей. Удобство и простота настройки системы транспортировки и инжекции частиц в значительной мере обеспечили успех данного проекта.

Принципы, лежащие в основе построения системы управления представленными каналами инжекции (клиент-серверные решения, специализация и оптимизация “под задачу” низкоуровневых программ), успешно применяются для построения и совершенствования общей системы автоматизации ускорительного комплекса ВЭПП-2000.

Низкоуровневые программы, такие как `im-server` и `camac-server` являются общесистемными серверами используемыми для управления и другими подсистемами комплекса: инжектором ИЛУ–Б–ЗМ, накопителем БЭП, кольцом коллайдера ВЭПП-2000, и другими.

Основной набор программного обеспечения включает в себя программы управления каналами, контроля импульсных источников питания и управления системой инфлекторов и контроля наносекундных импульсов. Некоторые приложения, например программа работы с цифровыми осциллографами ADC333 [22, 23] не вошли в рамки данной работы. Некоторым программам еще только предстоит быть созданными. Однако, несмотря на такую незавершенность, комплекс программ для управления каналами транспортировки и инжекции предоставляет оператору все возможности для работы по настройке каналов и проводке пучка в коллайдер ВЭПП-2000 без потерь.

В настоящее время, построенные каналы транспортировки позволяют инжектировать пучки электронов и позитронов в коллайдер ВЭПП-2000 с близкой к 100% эффективностью.

Используя представившуюся возможность, автор выражает благодарность Ю.М. Шатунову и И.А. Коопу за общее руководство работой и постоянное внимание; П.Ю. Шатунову, Д.Б. Шварцу и Ю.А. Роговскому за многочисленные обсуждения и помощь в процессе работы над диссертацией; И.М. Землянскому за полезные замечания в процессе подготовки рукописи.

Автор благодарен коллективу лаборатории 6 ИЯФ СО РАН и лично В.Р. Козаку за помощь в создании системы автоматизации каналов инъекции и всего комплекса ВЭПП-2000.

Хотелось бы, также, выразить признательность всем сотрудникам Института, совместно с которыми автор работал на комплексе ВЭПП-2000, в том числе Е.А. Переведенцеву, В.П. Просветову, О.А. Проскуриной, М.И. Непомнящих, В.С. Селезневу, Д.Б. Буренкову, А.С. Касаеву, А.П. Лысенко, И.А. Останину, А.С. Станкевичу и многим другим.

## Приложение А

### Датчик тока изображения

Датчик имеет четыре элемента съема тока изображения. Станция ДТИ состоит из усилителя, формирователя импульсов, пикового детектора и многоканального АЦП. Формирователь преобразует входной сигнал с элемента съема в *пару* сигналов противоположной полярности (в идеальной ситуации — равных по амплитуде). Пиковый детектор запоминает импульсы для последующей их оцифровки с помощью АЦП (итого восемь сигналов на датчик). Станция ДТИ имеет семь диапазонов измерений, перекрывающих весь диапазон  $10^8 - 10^{11}$  частиц в пучке.

Константы, используемые для определения положения и заряда пучка определены в процессе калибровки датчика на стенде и из пучковых измерений [16].

#### А.1. Вычисление заряда и числа частиц в пучке

1. Вычитание фоновых значений. Поскольку датчик имеет семь диапазонов измерений, то фоновые значения различны для каждого диапазона.  $B_i = ADC_i - Bg_i(D)$ ,  $D = 1 \dots 8$ ,  $ADC_i$  — сигнал АЦП.
2. Формирование чисел, соответствующих 4 линиям.  $D_n = |B_{2n-1} - B_{2n}|$ ,  $n = 1 \dots 4$ , т.е.  $D_1 = |B_1 - B_2|$ ,  $D_2 = |B_3 - B_4|$ ,  $D_3 = |B_5 - B_6|$ ,  $D_4 = |B_7 - B_8|$ .

3. Безразмерный заряд

$$\xi_n = (D_n + S) \frac{\Delta u C}{16 Q_0},$$

где  $S = 400$  — Смещение 400 разрядов АЦП,

$\Delta u = 0.5$  мВ — цена разряда АЦП,

16 — коэффициент усиления АЦП,

$C = 2$  нФ — ёмкость нагрузки диода пикового детектора,

$Q_0 = 5.0$  нК — пороговый заряд.

4. Заряд пролетевшего пучка.

$$Q = \sum_4^{n=1} Q_n, \quad Q_n = \frac{8 Q_0}{1.5 K} \xi_n, \quad K = 2^{6-D},$$

где  $D$  — текущий диапазон измерений.

5. Число частиц  $N = Q/q_0$ ,  $q_0 = 1.6 \cdot 10^{-19}$  К — заряд электрона.

## А.2. Вычисление координат

1. Положение пучка в системе датчика.

$$x' = \frac{1}{2} \frac{\xi_1 - \xi_3}{\xi_1 + \xi_3}, \quad z' = \frac{1}{2} \frac{\xi_2 - \xi_4}{\xi_2 + \xi_4}$$

2. Поворот системы координат на  $\pi/4$  по часовой стрелке

$$x' \rightarrow \frac{x' - z'}{\sqrt{2}}, \quad z' \rightarrow \frac{x' + z'}{\sqrt{2}}$$

3. Радиальное смещение с коррекцией нелинейности сетки

$$\rho'^2 = x'^2 + z'^2, \quad \rho = \frac{1}{2\rho'} \left[ 1 - \sqrt{1 - 4\rho'^2} \right]$$

4. Положение пучка в миллиметрах

$$x = x'(1 + \rho^2) \times R_e, \quad z = z'(1 + \rho^2) \times R_e,$$

где  $R_e = 37.5$  мм — радиус электрической апертуры датчика.

5. Вычитание нулей датчика

$$x_{fin} = x - x_0(D), \quad z_{fin} = z - z_0(D),$$

где  $x_0(D)$  и  $z_0(D)$  — электрические нули датчика в каждом диапазоне измерений.

## Литература

- [1] *Berkaev D. et al.* First commissioning results of VEPP-2000 // *ICFA Beam Dyn. Newslett.* — 2009. — Vol. 48. — Pp. 235–242.
- [2] *Berkaev D. E., Shatunov Y. M. et al.* VEPP-2000 Electron-Positron Collider Commissioning and First Results of Round Colliding Beam Tests. — EPAC'08, 11th European Particle Accelerator Conference, 23- 27 June 2008, Genoa, Italy.
- [3] *Danilov V. V. et al.* The concept of round colliding beams. — Prepared for 5th European Particle Accelerator Conference (EPAC 96), Sitges, Spain, 10-14 Jun 1996.
- [4] *Валишев А. А.* Исследование когерентных эффектов взаимодействия встречных пучков и динамической апертуры на накопителе ВЭПП-2М: Дисс. к.ф.-м.н. / ИЯФ СО РАН. — Новосибирск, 2000.
- [5] Накопительное кольцо БЭП. Рабочие материалы: Препринт 83-98. — Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1983.
- [6] *Berkaev D. E., Shatunov P. Y. et al.* Magnet structure of the VEPP-2000 electron positron collider. — Prepared for European Particle Accelerator Conference (EPAC 06), Edinburgh, Scotland, 26-30 Jun 2006.
- [7] *Беркаев Д. Е., Шатунов Ю. М. и др.* — Проект коллайдера ВЭПП-2000 [Электронный ресурс]. — ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2010. <http://vega.inp.nsk.su/vepp2000/>.
- [8] *Дубровин А. Н.* — Mermaid User's Guide, Novosibirsk, 2006. — ИЯФ СО РАН, Новосибирск.
- [9] *Grishanov B. I., Podgorny F. V.* Injection in the storage ring vepp-2000 // Proceedings of The 18th International Conference On High Energy Accelerators, March 26 – 30, 2001 / Epochal Tsukuba International Congress Hall. — Tsukuba: 2001.
- [10] *Shatunov Y. M. et al.* Project of a new electron positron collider VEPP-2000. — Prepared for 7th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2000), Vienna, Austria, 26-30 Jun 2000.

- [11] Beam-beam simulations for VEPP-2000 / I. Koop, E. Perevedentsev, Y. Shatunov, A. Valishev // *ICFA Beam Dyn. Newslett.* — 2003. — Vol. 31. — Pp. 10–13.
- [12] *Лысенко А. П.* — Программа численного моделирования ускорителей и каналов *RING*. — ИЯФ СО РАН, Новосибирск.
- [13] *Berkaev D. E. et al.* Beams injection system for e+ e- collider VEPP-2000. — Prepared for European Particle Accelerator Conference (EPAC 06), Edinburgh, Scotland, 26–30 Jun 2006.
- [14] CAN in Automation [Электронный ресурс], 2010. <http://www.can-cia.org/>.
- [15] *Дружинин В. В.* — Импульсные элементы канала перепуска БЭП – ВЭПП-2000. — Дисс. на соискание степени магистра, НГУ, Новосибирск, 2006.
- [16] *Останин И. А.* — Система измерения положения пучка на комплексе ВЭПП-2000. — Дисс. на соискание степени магистра, НГТУ, Новосибирск, 2008.
- [17] *Berkaev D. E. et al.* BEAM MEASUREMENT SYSTEM OF VEPP-2000 INJECTION CHANNELS. — Prepared for ICALEPCS'09, Kobe, Japan, 10-17 Oct 2009.
- [18] *Cherepanov V. P.* Image current monitor for bunched beam parameters measurements: Preprint 95-39. — Novosibirsk: BINP, 1995.
- [19] Система мониторинга пучков заряженных частиц в каналах транспортировки / В. А. Киселев, В. Р. Козак, Э. А. Купер и др. — 17-е Совещание по ускорителям заряженных частиц. ГИЦ РФ, Ин-т физ. высоких энергий, 17-20 октября 2000, Протвино, т.1, с.208-211.
- [20] *Berkaev D. et al.* Vepp-2000 collider control system. — Prepared for ICALEPCS'09, Kobe, Japan, 10-17 Oct, 2009.
- [21] *Berkaev D. E., Shatunov P. et al.* The automation system of the electron-positron collider vepp-2000. — Prepared for 13th ISTC SAC Seminar "New Perspectives of High Energy Physics Novosibirsk, Russia, 1-5 Sep, 2010.
- [22] *Berkaev D. et al.* Control system for injection channels of vepp-2000 collider. — Prepared for ICALEPCS'09, Kobe, Japan, 10-17 Oct, 2009.

- [23] *Berkaev D. et al.* Control system for injection channels of vepp-2000 collider. — Prepared for 13th ISTC SAC Seminar "New Perspectives of High Energy Physics Novosibirsk, Russia, 1-5 Sep, 2010.
- [24] Автоматизация ияф со ран, новосибирск. [электронный ресурс]. — 2010. <http://www.inp.nsk.su/activity/automation/>.
- [25] Усилители мощности УМ-6 и УМ-20 для питания корректоров комплекса ВЭПП-2000: Препринт 2007-14 / О. В. Беликов, Д. Е. Беркаев, В. Р. Козак, А. С. Медведко. — Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2007. <http://www.inp.nsk.su/publications>.
- [26] *Беликов О. В.* Источники стабилизированного тока для корректирующих магнитов в ускорителях и накопителях заряженных частиц: Дисс. к.т.н. / ИЯФ СО РАН. — Новосибирск, 2010.
- [27] Gentoo community [электронный ресурс]. — 2010. <http://www.gentoo.org>.
- [28] Qt online reference documentation [электронный ресурс]. — 2010. <http://doc.trolltech.com/>.
- [29] *Шлее М.* Qt4. Профессиональное программирование на C++. — СПб.:БХВ-Петербург, 2007. — С. 880.