

Российская академия наук  
Министерство науки и технической политики Российской Федерации  
Министерство Российской Федерации по атомной энергии  
Объединенный институт ядерных исследований

**XIV СОВЕЩАНИЕ  
ПО УСКОРИТЕЛЯМ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

*Институт физики высоких энергий, Протвино  
25-27 октября 1994 года*

**Сборник докладов  
в 4-х томах**

**Том 2**

Протвино 1994

## УПРАВЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-4М

*Ю.В.Заруднев, С.Е.Карнаев, Б.В.Левичев, И.Я.Протопопов, И.Г.Селятин*  
*Институт Ядерной Физики им.Будкера, Новосибирск*

Для успешного проведения экспериментов на накопителе ВЭПП-4М [2,3] требуется высокая стабильность и точность управления магнитными полями (пульсации и отклонения не должны превышать 0.01%). Практика подъема энергии пучка состоит в том, что расчет и настройка магнитной структуры производится в режиме инжекции, а с увеличением энергии пучка требуется сохранять первоначальную пропорциональность полей магнитных элементов.

При увеличении энергии из-за различной намагниченности происходит нарушение пропорциональности полей в элементах накопителя, что вызывает искажение магнитной структуры. Кроме того, в процессе перестройки энергии к изменению магнитной структуры приводит различная скорость 'прорастания' магнитного поля в железо магнитных элементов. Это естественным образом ограничивает скорость подъема энергии пучка не более 15 МэВ в секунду.

В дальнейшем для накопления тока планируется обеспечить возможность не только подъема, но и спуска по энергии с циркулирующими пучками. Это налагает дополнительные требования на учет зависимости 'ток - поле' в элементах накопителя ввиду значительной величины гистерезиса магнитов и линз.

В данной работе исследуются возможности коррекции полей магнитных элементов при изменении энергии пучка заряженных частиц от 1.8 до 5.5 ГэВ, а также приводятся результаты измерений и коррекций магнитных полей в элементах магнитной структуры при подъеме энергии до 5.0 ГэВ.

Основную структуру магнитной системы накопителя [3] образуют элементы периодичности полуколец (по 16.5 элементов периодичности на каждое полукольцо, всего 66 магнитов), квадрупольные линзы и поворотные магниты во вставках полуколец и в прямолинейных промежутках, два магнита-затухателя в техническом промежутке, две магнитные 'змейки' и сверхпроводящий магнитный детектор 'КЕДР' в экспериментальном промежутке. Для коррекций орбиты, градиентов магнитного поля в линзах, введения секступольной и октупольной компонент поля, регулировки связи бетатронных колебаний имеется большой набор корректоров с индивидуальным питанием. Всего задействовано 180 источников силового питания.

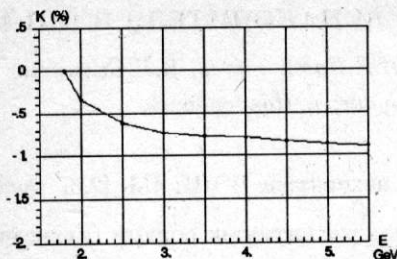


Рис.2. Отклонение магнитного поля от пропорциональности току для элемента периодичности. Диапазон изменения поля 1.7 ÷ 5.3 кГс.

Зависимость на рис.2 можно описать следующим образом. Ток в обмотки элементов периодичности задается пропорционально энергии:

$$E = a * I \quad (2)$$

Поле в зазоре пропорционально току (в предположении отсутствия насыщения, что можно сделать в случае элемента периодичности):

$$H = b * I + H_{ост} \quad (3)$$

где  $H_{ост}$  - остаточное поле при  $I=0$ .

Подставив (2) и (3) в (1), получим зависимость коэффициента отклонения от тока:

$$K = \frac{H_{ост}}{H_{инж}} * (I_{инж} / I - 1) \quad (4)$$

где  $H_{инж}$ ,  $I_{инж}$  - поле и ток в режиме инжекции.

Остаточные поля в различных типах элементов ВЭПП-4М равны 20 ÷ 40 Гс.

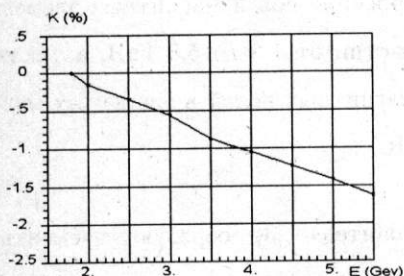


Рис.4. Отклонение магнитного поля от пропорциональности току для магнита экспериментального промежутка nEM1. Диапазон изменения поля 2.2 ÷ 6.6 кГс.

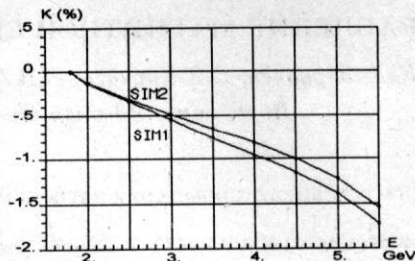


Рис.3. Отклонения магнитного поля от пропорциональности току для поворотных магнитов южной 'вставки' sIM1 и sIM2. Диапазон изменения поля магнитов 3.1 ÷ 9.3 кГс.

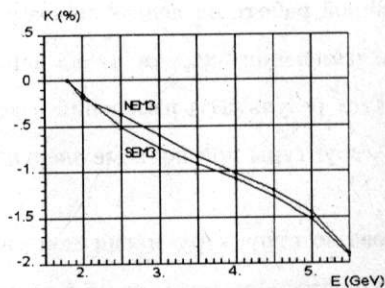


Рис.5. Отклонение магнитного поля от пропорциональности току для доворотных магнитов в экспериментальном промежутке sEM3 и nEM3. Диапазон изменения поля для этих магнитов 4.8 ÷ 14.7 кГс.

На рис.4,5 приводятся графики отклонений для дипольных магнитов экспериментального промежутка.

Доворотные магниты экспериментального промежутка sEM3 и nEM3 были разработаны для проекта ВЭПП-4М, то есть рассчитаны на максимальную энергию равную 6 ГэВ. По сравнению с другими магнитными элементами они характеризуются наибольшим значением максимального рабочего поля (до 15 кГс). При таком значении поля заметен эффект насыщения железа (рис.5).

Другой причиной сложностей при настройке процесса изменения энергии пучка является искажение оптики кольца, возникающее из-за различного поведения квадрупольных прямолинейных промежутков.

Отклонения магнитных полей квадрупольных линз EL1 и EL2, расположенных около места встречи (см. рис.1), от пропорциональности току оказывают значительное влияние на поведение  $\beta$ -функций в экспериментальном промежутке (например, 'отставание' линзы EL1 на 0.3% увеличивает вертикальную  $\beta$ -функцию в 2 раза).

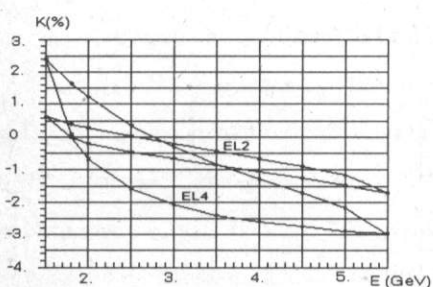


Рис.6. Отклонения магнитного поля от пропорциональности току для квадрупольных линз экспериментального промежутка EL2 и EL4.

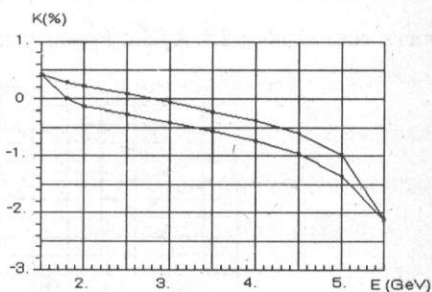


Рис.7. Отклонение магнитного поля от пропорциональности току для квадрупольной линзы экспериментального промежутка EL1.

На рис.6,7 показаны гистерезисные зависимости отклонения магнитного поля от пропорциональности току для трех различных типов квадрупольных линз экспериментального промежутка (рис.1) при полном рабочем цикле изменения поля. При снятии зависимости энергия менялась следующим образом: сначала увеличение от энергии инжекции 1.8 ГэВ до 5.5 ГэВ, затем снижение до 1.5 ГэВ, и снова переход к режиму инжекции. Диапазоны изменения полей в точках замера: 1.9 - 6.8 кГс для линзы EL1, 2. ÷ 7.3 кГс для линзы EL2, 0.6 ÷ 2. кГс для линзы EL4.

Поведение поля в линзе EL4 на начальном участке (2 ÷ 4 ГэВ) объясняется влиянием остаточных магнитных полей и отсутствием насыщения железа и сходна с зави-



симостью для элемента периодичности (см.рис.2). У линзы EL1 в диапазоне энергии  $4.5 \div 5.5$  ГэВ заметно проявляется эффект насыщения железа.

Изучение поведения магнитных элементов при полном рабочем цикле изменения поля делается для того, чтобы в дальнейшем на ВЭПП-4М для накопления пучков можно было не только подниматься, но и опускаться по энергии с уже циркулирующими пучками.

Благодаря внесению коррекций, компенсирующих 'расхождение' магнитных полей различных элементов, значительно упростилась процедура настройки подъема энергии пучка. Попутно был выявлен ряд неисправностей у некоторых элементов магнитной структуры накопителя ВЭПП-4М.

Динамика изменения полей в магнитных элементах и возможности по динамической коррекции показаны на примере магнита sEM3 (см.рис.1). Опытным путем установлено, что допустимое отклонение поля от пропорциональности току для этого элемента не должно превышать 0.2%. При этом скорость изменения тока в шинах магнита составляет 2.5 А/сек (темп ускорения 15 МэВ/сек).

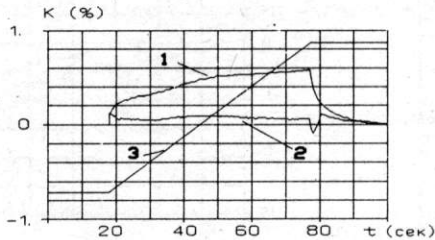


Рис.8. Отклонение магнитного поля в процессе изменения тока от расчетного значения, пропорционального току, для магнита sEM3.  
 На графике: 1 - отклонение при линейном увеличении сигнала ЦАПИ, 2 - отклонение в случае скорректированного изменения сигнала, 3 - линейное изменение тока в диапазоне  $370 \div 700$  А.

На рис.8 приведено отклонение поля от пропорциональности току для скорости изменения тока 5.6 А/сек (кривая (1)). После внесения в ЦАПИ соответствующей коррекции отклонение удается скомпенсировать до величины, значительно меньшей допустимой (кривая (2)).

Таким образом, имеются возможности по ускорению процесса подъема энергии пучка в накопителе ВЭПП-4М. Решение этой задачи имеет важное значение для использования накопителя в проведении экспериментов, так как на сегодняшний день процесс перестройки от энергии инжекции (1.8 ГэВ) до энергии эксперимента (5 ГэВ) занимает до 10 - 15% от времени проведения эксперимента.

Для управления источниками питания элементов магнитной структуры накопителя ВЭПП-4М используются ЦАП'ы с интерполяцией выходного сигнала (ЦАПИ) [4], позволяющие задавать любую сложную форму изменения тока. Зависимость изменения тока от времени загружается в память ЦАПИ в табличном виде. Между строками таблицы происходит линейная интерполяция с частотой обновления управляющего сигнала 250 Гц.

В ходе работы были проделаны измерения поведения магнитных полей во всех типах основных элементов магнитной системы накопителя ВЭПП-4М (рис.1): элемента периодичности, магнитов-сепараторов sEM1, sEM2 и nEM1, nEM2, доворотных магнитов EM3, 'змеек' EZM, квадрупольных линз EL1, EL2, EL3, EL4, EL5, поворотных магнитов и квадрупольных линз 'вставок'.

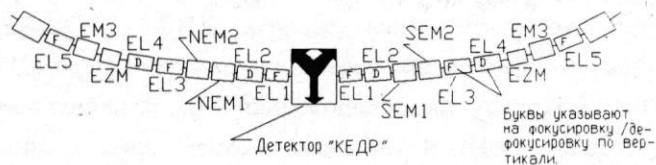


Рис.1. Схема экспериментального промежутка ВЭПП-4М.

Магнитные измерения проводились с помощью датчика Холла [1], который был предварительно прокалиброван на специальном магнитном стенде с использованием ЯМР-датчика. Сигнал с датчика Холла поступал на вход интегрирующего двадцатирядного АЦП (АЦПИ-20) [5]. Общая погрешность измерений поля при минимальном измеряемом сигнале не превышала 0.3%.

Изучение эффектов, связанных с различной намагниченностью элементов, проводилось следующим образом. Ток в элементах менялся с шагом, соответствующим 0.5 ГэВ по энергии. Магнитное измерение делалось после установления магнитного поля. Отклонение поля от пропорциональности току определялось по формуле:

$$K(\%) = \left( \frac{\frac{H}{E}}{\frac{H_{инж}}{E_{инж}}} - 1 \right) * 100 \quad (1)$$

где  $H_{инж}$ ,  $E_{инж}$  - поле и энергия в режиме инжекции.

Ниже показано поведение магнитных полей при увеличении энергии в основных диполях кольца ВЭПП-4М.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баклаков Б.А. и др. 'Применение датчиков Холла для прецизионных измерений магнитного поля'. 2-е научно-техническое совещание по применению элементов Холла в приборостроении. Москва, 1969 г.
2. Протопопов И.Я.  $e+e-$  встречные пучки в Новосибирске. 'Состояние дел и планы'. Труды 13-й международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий. Новосибирск, 'Наука', 1987 г.
3. В.В.Анашин и др. 'Состояние работ на комплексе ВЭПП-4М'. Труды 12-го всесоюзного совещания по УЗЧ. Дубна, 1992 г.
4. Ю.В.Заруднев и др. 'Интерполирующие цифроаналоговые преобразователи для систем питания электрофизических установок'. Труды 12-го всесоюзного совещания по УЗЧ. Дубна, 1992 г.
5. Ю.И.Голубенко и др. 'Аналоговые модули для прецизионных измерительных и управляющих систем'. Труды 12-го всесоюзного совещания по УЗЧ. Дубна, 1992 г.

## Компьютерное управление и обработка данных в системе диагностики пучков на комплексе ВЭПП-4

А.С.Калинин, Е.А.Симонов, В.В.Смалюк, Д.Н.Шатилов

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера, г.Новосибирск

Для диагностики пучков в накопительных кольцах ВЭПП-3 и ВЭПП-4М используется система электростатических датчиков (пикапов), описанная в [1]. Система полностью автоматизирована, измерительная аппаратура выполнена в стандарте КАМАК, все управление и обработка данных осуществляется через микроЭВМ "Одренок", входящую в компьютерную сеть, обслуживающую комплекс ВЭПП-4 [2].

Пикап состоит из четырех электродов, подключаемых к пикап-станции, включающей в себя ФНЧ, формирующий импульсный сигнал, и кабельный усилитель. Сигнал с пикап-станции через коммутатор поступает в измерительный канал, включающий в себя широкополосный усилитель (ШУ) с программно регулируемым коэффициентом усиления и блок выборки-хранения (В/Х). Выборки делаются на максимуме импульсов с частотой обращения пучка. Таким образом система, при использовании АЦП с необходимым быстродействием, позволяет регистрировать сигнал от пучка на каждом обороте и получать максимум информации о пучке, извлекаемой посредством компьютерной обработки данных.

Для управления системой, сбора и обработки данных создан комплект прикладных программ. Программы используются для измерения и коррекции равновесной орбиты пучка и бета-функций накопителей, измерения параметров впускаемого и циркулирующего пучков, токов сгустков в многосгустковом режиме, а также для контроля и калибровки системы. Информация, необходимая для работы программ - адреса КАМАК-крейтов и блоков, параметры и индивидуальные коэффициенты передачи пикап-электродов и т.д. - содержится в базе данных, что позволяет вносить изменения в систему, не затрагивая программное обеспечение. Все программы работают в реальном времени, синхронизация программ и аппаратуры осуществляется посредством внешних прерываний, генерируемых системой синхронизации комплекса ВЭПП-4, обработка оцифрованных сигналов производится по LAM-запросу от АЦП.

Проверка работоспособности системы осуществляется программой контроля и калибровки путем отображения тестового или пучкового сигналов на графический дисплей и вывода разнообразной числовой информации, получаемой и записанной ранее, на терминал. При этом система работает как стробоскопический



#P1C3 21/07/94 13.03 КАЛИБРОВКА  
TOK=0 МА УСИЛЕНИЕ : 10 ДБ  
<U>--81.89 НВ ПЛ. 0 1 2 3 4

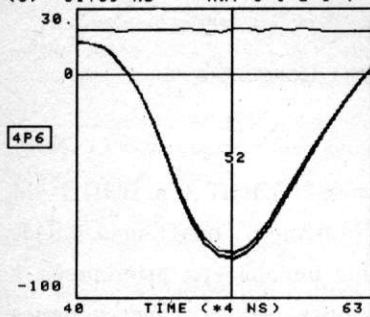


Рис.1 Тестовый сигнал с пикапа

осциллограф. Сигнал с выбранного пикап-электрода измеряется при различных значениях задержки синхронизирующих импульсов, сканируемой в заданном диапазоне с шагом 4 нс с помощью программно управляемого блока задержки.

Для каждого сгустка (на ВЭПП-4М 2-х электронных и 2-х позитронных) и тестового сигнала программно определяется величина задержки, соответствующая максимуму сканируемого сигнала. Для калибровки пикапа на

каждый пикап-электрод через малую емкость (много меньше емкости самого электрода) подается калибровочный сигнал, имитирующий пучок и измеряются индивидуальные коэффициенты передачи каждого пикап-электрода. Измеренные оптимальные значения задержек и коэффициенты передачи пикап-электродов записываются в базу данных для дальнейшего использования программами измерения орбиты, бета-функции и параметров впускаемого пучка.

Картина сигналов весьма информативна и дает возможность определить ряд неисправностей аппаратуры. На рис.1 представлены сигналы с электродов в области максимального значения (отрицательные импульсы) и сдвиг нуля В/Х (горизонтальная линия), программно вычитаемый из всех сигналов.

Программа контроля и калибровки измеряет с задаваемым числом усреднения и выводит на дисплей калибровочную "орбиту", что позволяет измерить как шумовой предел точности измерений, так и долговременный уход электрического нуля системы. На рис.2а показана калибровочная "орбита", измеренная сразу после калибровки пикап-станций, а на рис.2б - спустя два месяца после калибровки.

Для измерения орбиты и бета-функций на всех пикапах используется один измерительный канал, к которому поочередно подключаются пикап-электроды, что позволяет избавиться от погрешности, вносимой разбросом параметров аппаратуры. Для измерения параметров впускаемого пучка и бетатронных частот используются четыре одинаковых измерительных канала, подключенных к электродам "впускного" пикапа. Это необходимо для того, чтобы одновременно измерить сигналы со всех четырех пикап-электродов, хотя в этом случае динамический разброс параметров аппаратуры каждого канала влияет на точность измерения.

Измерение орбиты пучка производится поочередным подключением каждого пикап-электрода к измерительному каналу с помощью программно управляемого



пикап-электроду и т.д., таким же образом, как при измерении орбиты. Математическая обработка сигналов включает в себя вычисление массивов координат пучка на каждом обороте и их спектральный анализ. Квадрат амплитуды основной гармоники бетатронных колебаний пропорционален бета-функции в месте расположения пикапа.

Для достижения требуемой точности измерения амплитуды и фазы бетатронных колебаний был применен алгоритм, позволяющий вычислять частоту с точностью, на порядок выше той, что дают общепринятые алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ). Известно, что БПФ позволяет определить частоту гармонического сигнала с точностью  $\frac{1}{N}$  где  $N$  - число выборок. Если частота бетатронных колебаний лежит между двумя дискретами БПФ, то при определении амплитуды по максимуму кривой спектра возникает большая погрешность из-за того, что максимум "размазывается" между двумя соседними дискретами. В реальном эксперименте такая ситуация имеет место почти всегда. Поэтому БПФ применяется лишь для первого приближения к бетатронной частоте  $\nu$  с точностью  $1/N$ , после чего на участке спектра от  $\nu(1-1/N)$  до  $\nu(1+1/N)$  вычисляется дискретное Фурье-преобразование с шагом  $1/kN$ , где  $k = 2 - 16$ . Применение данного алгоритма с  $N = 1024$  и  $k = 16$  позволяет измерить бетатронную частоту с точностью лучше чем  $10^{-4}$ , точность измерения амплитуды и фазы в этом случае определяется разрядностью АЦП и составляет несколько процентов.

При большом числе пикапов (на ВЭПП-4М - 54) для измерения бета-функции необходимо произвести значительный объем вычислений, поэтому маломощная микроЭВМ "Одренок" используется только для управления аппаратурой и сбора данных, а для спектрального анализа используется транспьютер, что позволяет значительно ускорить процесс измерения [3].

Измерение параметров колебаний впускаемого и циркулирующего пучков производится с помощью отдельного комплекта аппаратуры, состоящего из четырех одинаковых измерительных каналов, аналогичных тому, что используется для измерения бета-функции. Программа работает в оверлейном режиме: часть программы, постоянно находящаяся в памяти, запускается внешним прерыванием, генерируемым системой синхронизации перепуска за некоторое время до инжекции пучка, достаточное для подготовки аппаратуры к измерению. АЦП запускаются чуть раньше инжекции пучка и на каждом обороте запоминают сигналы со всех четырех электродов "впускного" пикапа в течение 4096 оборотов. Дальнейшая обработка сигналов производится оверлейной частью программы и аналогична используемой для измерения бета-функции. Ток, координаты и спектры бетатронных и синхротронных колебаний впускаемого пучка, а также их частоты,

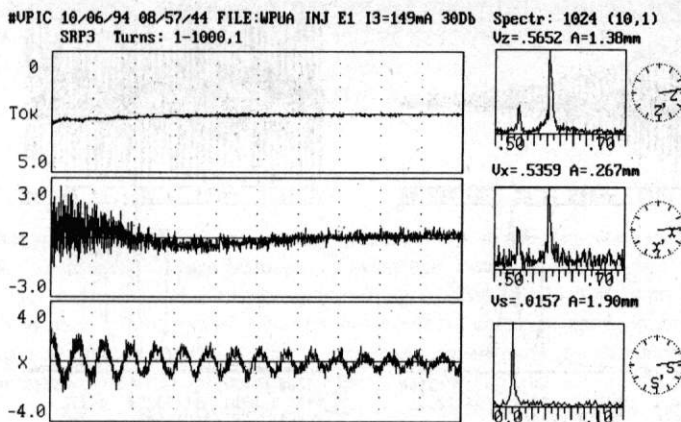


Рис.3. Диагностика впуска в ВЭПП-4М

амплитуды и фазы выводятся на графический дисплей (рис.3). Для измерения бетатронных частот циркулирующего пучка применяется ударное возбуждение колебаний.

Используя измеренные значения амплитуды и фазы бетатронных колебаний на "впускном" пикапе, вычисляются смещение от равновесной орбиты и поперечный импульс инжектируемого пучка, а по амплитуде и фазе синхротронных колебаний - отклонения энергии и фазы перепуска. Полученные данные используются для оптимизации условий инжекции.

Измерение токов сгустков в многосгустковом режиме производится этой же системой. Сигнал с пикап-электродов считывается с программно задаваемой задержкой относительно импульса, привязанного к нулевой сепаратрисе. Суммарный сигнал с пикапа, считанный с задержкой, соответствующей данной сепаратрисе позволяет вычислить ток сгустка при соответствующей нормировке на полный ток пучка.

В экспериментах по изучению синхробетатронных резонансов на ВЭПП-4М и связанной с ними неустойчивости пучка при больших токах возникла необходимость измерения боковых частот спектра вертикальных бетатронных колебаний, возникающих при модуляции бетатронных колебаний синхротронной частотой. В спектре слабые синхробетатронные пики маскируются бетатронным пиком, имеющим большую ширину вследствие затухания, обусловленного разными причинами. Разработан алгоритм, позволяющий в этих условиях выделить синхробетатронные резонансы. Для этого конструируется незатухающее колебание путем умножения элементов массива выборок измеренного колебания на экспоненциальный множитель с инкрементом, равным декременту затухания,



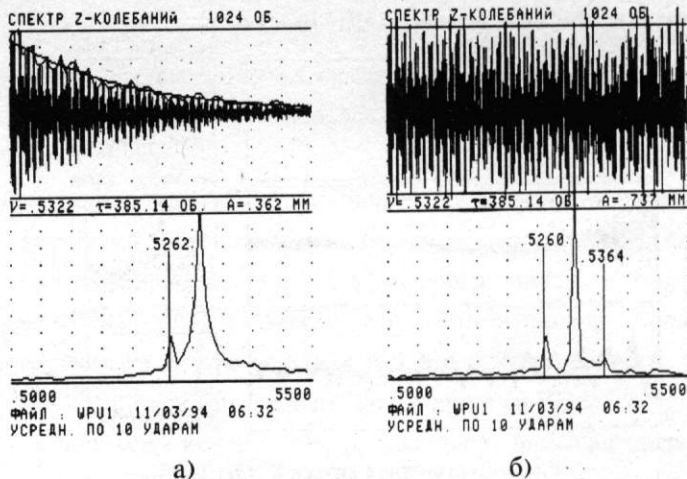


Рис.4. Выделение синхробетатронных гармоник.

который предварительно вычисляется. При этом в спектре ширина главного бетатронного пика значительно уменьшается, что и облегчает задачу распознавания боковых полос. На рис.4а показан сигнал от пучка и его спектр, в котором видна единственная нижняя боковая полоса. На рис.4б показано колебание, сконструированное на основе пучкового сигнала, в спектре которого видны обе синхробетатронные полосы.

Описанное программное обеспечение успешно используется на комплексе ВЭПП-4 для получения заданной орбиты, оптимизации условий инжекции и выпуска, изучения структуры накопителя и приведения ее к расчетной, а также для других ускорительных задач.

#### Литература.

1. Рутинная диагностика пучков с использованием электростатических датчиков в накопителе ВЭПП-4М. / А.С.Калинин, Е.А.Симонов, Д.Н.Шатилов - В кн. : Труды тринадцатого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1993.
2. Система управления комплексом ВЭПП-3 / А.Н.Алешаев, С.Д.Белов, А.Н.Дубровин и др. - В кн. : Труды одиннадцатого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1989, т.1, с.142.
3. Измерение и коррекция бета-функции на накопителе ВЭПП-4М. / Дубровин А.Н., Калинин А.С., Симонов Е.А., Смалюк В.В., Шатилов Д.Н - Доклад на настоящем совещании.

# Автоматизированная система измерения и коррекции траектории пучка в канале ВЭПП-3 — ВЭПП-4М на основе датчиков тока изображения

В.А. Киселёв, А.И. Науменков, В.В. Смалюк, В.П. Черепанов

*Институт ядерной физики им.Буджера, Новосибирск*

В докладе описывается автоматизированная система для стабилизации траектории пучков электронов и позитронов в канале инжекции из бустерного накопителя ВЭПП-3 в накопительную дорожку ВЭПП-4М. Система включает в себя датчики для измерения параметров пучка, аппаратуру съёма и обработки информации, управляющую ЭВМ, замыкающую обратную связь по пучку.

Трасса канала достаточно сложна и определяется 15-ю горизонтальными и вертикальными импульсными поворотными магнитами, часть из которых осуществляет поворот одновременно в двух плоскостях. Суммарный угол поворота  $\sim 200^\circ$ . Протяжённость трассы  $\sim 75$  м. Энергия инжекции 1,8 ГэВ. Пучки электронов и позитронов в канале представляют собой однократные импульсы тока с длительностью порядка 1 нс. Частота циклов инжекции определяется условиями эксперимента и составляет  $0,01 \div 0,001$  Гц.

Для поддержания эффективности разовой инжекции и накопления близкими к 100 %, необходима стабильность положения пучка на входе в ВЭПП-4:  $\Delta Z \leq 0,5$  мм;  $\Delta Z' \leq 0,05$  мрад. Это однозначно подразумевает такого же порядка стабильность орбиты на выпуске из ВЭПП-3 и траектории пучка в канале.

Коррекция, с необходимой точностью ( $\approx 0,25$  мм), траектории пучка в канале предполагает решение ряда частных задач.

1. Выбор типа датчиков, необходимого их количества и азимутальное распределение по трассе канала.
2. Выбор необходимого количества корректоров.
3. Вычисление корректирующих воздействий.

В качестве датчика положения пучков электронов и позитронов применяется датчик тока изображения, впервые описанный в работе [1]. Датчик регистрирует азимутальное

распределение тока изображения, наводимого пучком в проводящих стенках вакуумной камеры канала. На рис.1 представлен эскиз конструкции датчика третьего поколения датчиков данного типа, разработанных в ИЯФ.

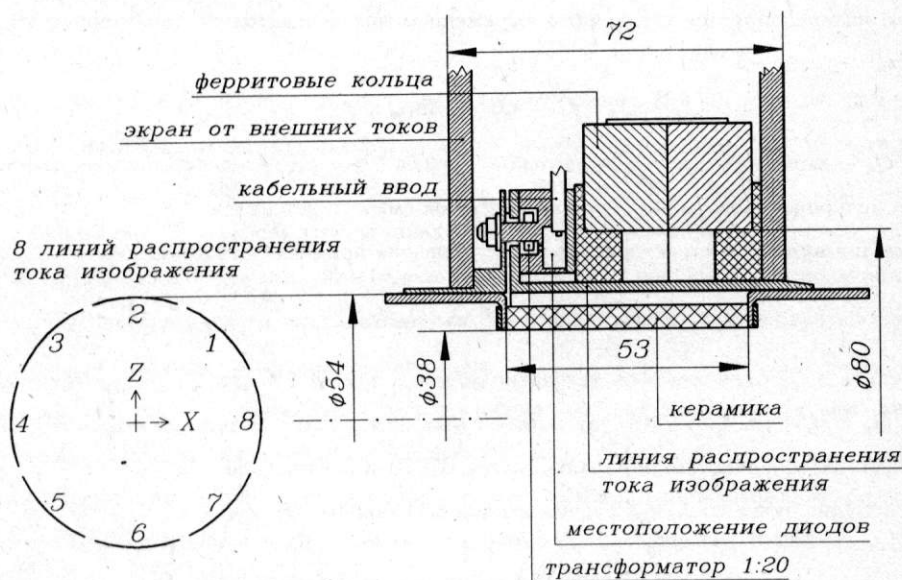


Схема одного канала

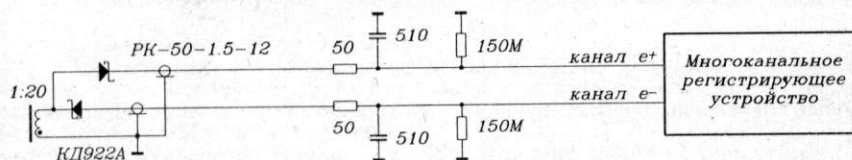


Рис. 1: Эскиз конструкции датчика тока изображения.

Датчик имеет 8 линий распространения тока изображения, расположенных в разрыве вакуумной камеры (на рис.1 — область керамики; длина линий 53 мм). Линии расположены равномерно по азимуту камеры с зазорами порядка 2 мм. Нагрузкими линий являются первичные обмотки трансформаторов 1 : 20 на ферритовых кольцах (d7xd4x2 мм, M1000). Вторичные обмотки трансформаторов нагружены на диоды и далее на согласованные отрезки радиочастотных кабелей (РК-50-1.5-12, 1 м). В результате детектирования заряды  $\dot{Q}_k$ , пропорциональные соответствующим токам изображения, запоминаются на входных ёмкостях многоканального регистрирующего устройства ИПП-32Р (разработка ИЯФ, [2]), к которым подключены видимые на рис.1 буферные ёмкости, служащие для согласования динамических диапазонов пучков и электроники.

Информация о положении пучка по  $X$  и  $Z$  (а также о величине заряда пучка) извлекается из азимутального распределения зарядов  $\tilde{Q}_k$ . Прежде учитывается нелинейность характеристик детектирования короткого импульса диодным детектором, которая в нашем случае хорошо интерполируется следующим выражением для передаточной характеристики детектора:

$$\tilde{Q}_k = Q_k - Q_p [1 + \ln(Q_k/Q_p)] ,$$

здесь:  $Q_k$  — заряд на входе  $k$ -го детектора;  $Q_p = 0,54 \pm 0,05$  рК — пороговый заряд, который можно интерпретировать как заряд на шунтовой ёмкости детектора.

Для линейризации характеристик детектирования применяется выражение:

$$Q_k^* = \tilde{Q}_k + 2,16 Q_p (\tilde{Q}_k/Q_p)^{0,22}$$

В результате  $Q_k^*$  отличается от исходных  $Q_k$  менее чем на 1% при  $Q_k > 2Q_p$  (пороговый заряд  $Q_p = 0,54$  рК соответствует заряду пучка 86,4 рК или, в терминах тока ВЭПП-3, току 0,35 мА, при том, что номинальный ток ВЭПП-3 порядка 100 мА).

Положение пучка по  $X$  и  $Z$  рассчитывается следующим образом:

$$X = MR \frac{\sum_{k=1}^8 Q_k^* \cos(\Theta_k)}{\sum_{k=1}^8 Q_k^*} , \quad Z = MR \frac{\sum_{k=1}^8 Q_k^* \sin(\Theta_k)}{\sum_{k=1}^8 Q_k^*} ,$$

здесь:  $\Theta_k = \frac{2\pi}{8}k$  — азимут  $k$ -той линии распространения тока изображения;  $M = \frac{\pi/8}{\sin(\pi/8)}$  — масштабный множитель, корректирующий фильтрацию азимутальных гармоник из-за конечного азимутального размера линий;  $R = 27$  мм — радиус расположения последних.

Теоретическая точность вычисляемых таким образом  $X$  и  $Z$  при восьми линиях распространения тока изображения лучше 0,5 мм при смещениях пучка в пределах половины апертуры их расположения, т.е. в пределах  $\pm 13,5$  мм.

Следующее выражение является оценкой точности предложенного метода (замены интегралов суммами):

$$\left| M_n^m \frac{\sum_{k=1}^n Q_k^* \begin{Bmatrix} \cos(m\Theta_k) \\ \sin(m\Theta_k) \end{Bmatrix}}{\sum_{k=1}^n Q_k^*} - \rho^m \begin{Bmatrix} \cos(m\varphi) \\ \sin(m\varphi) \end{Bmatrix} \right| < M_n^m \frac{\rho^{n-m} + \rho^{n+m}}{1 - \rho^n} ,$$

здесь:  $M_n^m = \frac{\pi m/n}{\sin(\pi m/n)}$ ;  $\rho$  — нормированное на  $R$  радиальное смещение пучка;  $\varphi$  — азимутальное смещение пучка;  $m$  — номер азимутальной гармоники;  $n$  — число линий распространения тока изображения.

Важнейшей характеристикой датчика является постоянная времени растекания тока изображения: вносимое нагрузками линий сопротивление приводит к тому, что, спустя



некоторое время, ток изображения выравнивается по азимуту и информация о положении пучка пропадает. Для данной конфигурации датчика эта постоянная времени составляет величину порядка 300 нс и рассчитывается согласно выражению:

$$\tau_p = \frac{\mu_0}{4\pi r_l} ,$$

здесь:  $r_l$  — вносимое на единицу длины камеры сопротивление. В нашем случае  $\tau_p$  много больше длительности пучка, что и обуславливает простоту выражений для расчета его параметров.

Датчики распределены вдоль трассы канала так, чтобы на полволны бетатронных колебаний их приходилось не менее двух. В начале канала и в его конце, число датчиков по три на полволны для однозначного восстановления угла и координаты пучка. Всего установлено 14 шт., по 12 в каждом из направлений инжекции.

Достигнутая точность координатного разрешения для датчиков в диапазоне токов  $4 \div 150$  ма ВЭПП-3 составила величину порядка 0,25 мм.

Задача коррекции ставилась следующим образом: по измерениям положения траектории частиц в канале найти отклонение её от некоторой «идеальной», соответствующей оптимально настроенному режиму инжекции, и рассчитать корректирующее воздействие, компенсирующее как параметрические уходы магнитного поля в элементах канала, так и тепловые уходы равновесной орбиты в ВЭПП-3.

Результаты измерений орбиты можно выразить вектором  $\vec{X}_0$ , где  $X_{0i}$  — отклонение траектории от «идеальной» на  $i$ -ом датчике.

Корректирующее воздействие аналогично можно записать в векторной виде  $\vec{H}$ , где  $H_k$  — величина воздействия  $k$ -го корректора или магнита на  $i$ -м датчике. В силу линейности преобразования траектории, связь между  $\vec{X}$  и  $\vec{H}$  будет линейной:

$$\vec{X} = M\vec{H} ,$$

где  $M_{ik}$  — матрица откликов калиброванных отклонений  $k$ -го элемента на  $i$ -м датчике;  $X_i$  — отклонение траектории на  $i$ -м датчике, вызванное набором корректирующих воздействий  $H_k$ , выраженных в долях калиброванных отклонений.

В качестве меры калиброванных отклонений выбирались  $\Delta H/H = 1\%$  для магнитов и  $\varphi = 10^{-3}$  рад для корректоров. Матрица калиброванных отклонений  $M$  измерялась экспериментально, с учётом имеющейся в канале связи колебаний, и имеет размерность  $2ik$ .

Корректирующее воздействие в условиях  $k \geq i$  ищется с использованием метода наименьших квадратов. Минимизация функционала  $F = \|\vec{X} - \vec{X}_0\|^2$  приводит к системе линейных уравнений:

$$M_{ij}M_{ik}H = M_{ij}X_i ,$$

решение которой и позволяет получить набор необходимых корректирующих воздействий.

Как правило, бывает достаточно одной итерации для восстановления траектории пучка в канале. Вызвано это следующим упрощающим, по сравнению с коррекцией орбиты в накопителе, обстоятельством. Если бы количество датчиков в точности равнялось количеству корректоров, то матрица откликов была строго треугольной. Детерминант такой матрицы равен произведению диагональных элементов  $\|M\| = m_{11}m_{22}m_{33} \dots m_{ii}$ , где  $m_{ii}$  — смещение траектории пучка на  $i$ -м датчике, вызванное калиброванным изменением поля в ближайшем к нему корректоре. Поэтому, достаточно разместить датчики т.о., чтобы величина отклонения от ближайшего к нему корректора не была мала и тогда значение детерминанта матрицы  $M$  будет велико, а следовательно решение системы уравнений хорошо обусловлено. Придерживаясь этого правила и для случая  $k \geq i$ , мы также должны получить хорошо обусловленную матрицу, что наблюдалось и на практике. В действительности, хорошо обусловленной должна быть матрица  $A = M^T M$ , но т.к.  $A$  — симметрическая и квадратная, то  $\|A\| = \|M\|^2$ .

Автоматизация измерения орбиты, с последующей её коррекцией, осуществлена по традиционной для ИЯФ схеме. Сигналы с описанных датчиков тока изображения, преобразованные блоком ИПП-32Р в цифровой эквивалент, поступают через магистральную станцию  $S_6$  в блок связи Б0634 [3], выполненный в стандарте КАМАК и связанный через магистраль крейта с ЭВМ «Одрёнок» [4]. Результатом обработки полученных данных является вектор корректирующих воздействий, на основании которого рассчитываются добавки к уставкам напряжений для генераторов, питающих магниты и корректора канала инжекции. Эти значения передаются через центральную ЭВМ в аналогичную ЭВМ «Одрёнок», управляющую импульсной системой питания магнитных элементов и замыкающую обратную связь по пучку.

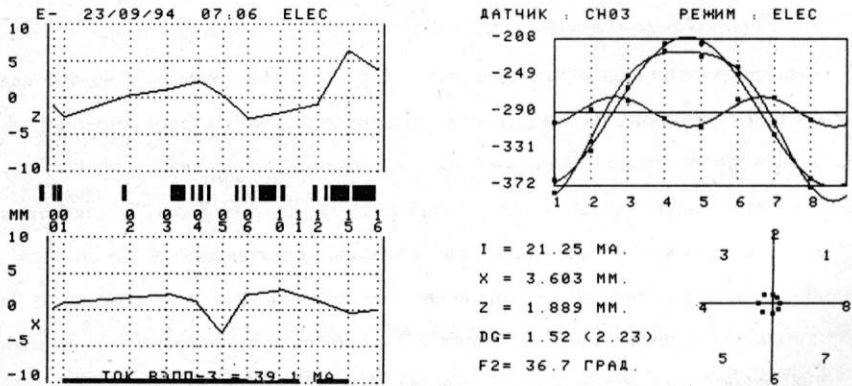


Рис. 2: Примеры вывода информации на графический дисплей.

Кроме этого, информация выводится на графический дисплей в виде траекторий пучка по  $X$  и  $Z$  направлениям или в форме гистограмм, которые сопровождаются данными о положении центра тяжести пучка, квадрупольной гармонике и токе пучка. Образцы распечаток приведены на рис.2.

Вся аппаратура, используемая в описываемой системе, разработана и изготовлена в ИЯФ.

Т.к. коррекция орбиты в ВЭПП-4 вызывает изменение начальных условий, то для пуска без остаточных колебаний, дополнительно к уже имеющимся датчикам, планируется в ближайшее время установить два датчика тока изображения непосредственно в кольцо ВЭПП-4.

## Список литературы

- [1] Черепанов В.П. Датчик положения пучка., -ПТЭ, 1976, N4, с.60-62.
- [2] Купер Э.А. и др. Автономный блок сопряжения однопролётных датчиков положения и плотности пучка заряженных частиц. Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, Дубна, 1992, с.56.
- [3] Нифонтов В.И. и др. Аппаратура для последовательной системы связи. Препринт 90-25 ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1990.
- [4] Алешаев А.Н. и др. Структура и организация систем управления ускорительными комплексами в ИЯФ СО АН СССР. Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, Дубна, 1992, с.82.

# Датчик положения пучка для линейного коллайдера

А.И. Бажан, В.Е. Балакин, П.Б. Жоголев, П.А. Лунев, Н.А. Соляк, В.Ф. Фогель  
Филиал Института ядерной физики, г. Протвино, Московская область

## Введение

Для сохранения малого эмитанса пучка и достижения высокой светимости в линейном коллайдере требуется высокая точность установки фокусирующих квадрупольных линз и ускоряющих секций. Проект ВЛЭПП (встречные линейные электрон - позитронные пучки) предполагает юстировку ускоряющих и фокусирующих элементов по пучку с точностью не хуже 0.1 мкм. Таким образом чувствительность датчика положения пучка (ДПП), при помощи которого будет производиться юстировка, должна быть не хуже указанного значения.

Простейшим и наиболее эффективным является датчик на основе цилиндрического резонатора, возбуждаемого на  $E_{110}$  моде [1]. Амплитуда колебаний этой моды пропорциональна смещению пучка от оси резонатора и заряду банча, а фаза зависит от направления смещения. При количестве частиц в банче  $N=10^{11}$ , как планируется в установке ВЛЭПП, может быть достигнута чувствительность ДПП около 10-50 нм [3-5].

Такого же типа датчики положения разрабатываются и для других линейных коллайдеров [6-9].

## 1. Основные предпосылки

Одной из наиболее важных проблем является выделение рабочего сигнала на фоне колебаний основной и других симметричных мод.

Мощность колебаний различных мод, возбуждаемых пучком в резонаторе, определяется выражением [1]:

$$P_i = \frac{1}{2Q} \omega_i^2 \left( \frac{R_{ш}}{Q} \right)_i q^2 M^2 T^2,$$

где  $q$ - заряд банча;

$M$ - пролетный фактор, учитывающий изменение фазы колебаний за время пролета банчем резонатора;

$$T = \exp\left(-\frac{\omega_i^2 \sigma_z^2}{2c^2}\right) - \text{пространственный фактор, учитывающий конечность}$$

протяженности сгустка.

Для расчета мощности возбуждения несимметричных мод необходимо также учитывать зависимость характеристического сопротивления ( $R_{ш}/Q$ ) от смещения пучка "а" от оси системы.

При смещении пучка во ВЛЭПП на 1 нм мощность рабочей  $E_{110}$  моды составит  $2.2 \cdot 10^{11}$  Вт, а основной  $E_{010}$  -  $2.4 \cdot 10^3$  Вт. Отношение мощностей  $P_{010}/P_{110} = 10^{14}$ , показывает, что требуется подавление паразитных мод на 140 дБ.

Колебания различных мод разнесены по частоте, оценим подавление основной моды идеальным узкополосным фильтром.



Колебания обеих мод даются уравнением

$$P_i(t) = P_{0i} e^{-2\beta_i t} \cos(\omega_i t),$$

где  $\beta_i = \frac{\omega_i}{2Q_i}$ .

Индекс  $i$  принимает значение интересующей моды.  
Спектральная плотность этих колебаний:

$$p_i^b(\omega) = P_i \frac{\beta_i^2 + \omega^2}{\left[ \beta_i^2 + (\omega + \omega_i)^2 \right] \left[ \beta_i^2 + (\omega - \omega_i)^2 \right]}$$

Учитывая, что  $Q_i \gg 1$ , на частоте  $\omega_{110}$  для спектральных плотностей  $E_{110}$  и  $E_{010}$  мод имеем

$$p_{110}^b(\omega_{110}) = P_{110} \frac{Q_{110}^2}{\omega_{110}^2};$$

$$p_{010}^b(\omega_{110}) = P_{010} \frac{\omega_{110}^2}{(\omega_{110}^2 - \omega_{010}^2)^2}.$$

Фактор

$$r^b = Q_{110}^2 \left( 1 - \frac{\omega_{010}^2}{\omega_{110}^2} \right)^2$$

дает ослабление  $E_{010}$  моды идеальным фильтром на частоте  $E_{110}$  моды. Подставляя характерное значение добротности  $Q=2000$  и отношение  $\omega_{010}/\omega_{110} = 9200/14000 = 0.66$ , получаем  $r^b = 1.27 \cdot 10^6$ , то есть ослабление в 60 дБ.

Табл. 1.

Мода	$E_{010}$	$E_{110}$	$E_{020}$	$E_{120}$	Прим.
Частота, ГГц	9.2	14.0	22.2	25.9	расчет
Добротность	750	7700	1300	6200	расчет
Мощность входного сигнала, Вт	$2.4 \cdot 10^3$	$2.7 \cdot 10^4$ (a/λ) <sup>2</sup>	$2.3 \cdot 10^3$	$1.8 \cdot 10^4$ (a/λ) <sup>4</sup>	расчет
Пространственный фильтр, дБ	-65	-3	-37	-11	измерения
Временной фильтр, дБ	-26	-4	-35	-10	расчет
Частотный фильтр, дБ	-41	-1	-46	-36	измерения
Фазовое детектирование ПЧ, дБ	-25	-6	-40	-20	оценка
Сумма, дБ	-157	-13	-158	-77	

Таким образом только частотной фильтрацией выделить рабочий сигнал принципиально невозможно.

Для этой цели были предложены фильтры различных типов (пространственный, временной), позволяющие значительно подавить нежелательные колебания [2-5]. Таблица 1 дает представление о мощностях

возбуждения различных мод и степени их подавления перечисленными фильтрами. Пролетный канал в резонаторе имеет диаметр 6 мм, и все моды с более высокой частотой, чем указанные в таблице, свободно излучаются из резонатора и интереса не представляют.

С другой стороны чувствительность датчика ограничивается тепловыми шумами (при длительности импульса 50 нс - порядка  $10^{-12}$  Вт). Таким образом, учитывая потери рабочей моды в фильтрующих элементах, достижимая чувствительность составит порядка 10 нм.

## 2. Детектирование сигнала ДПП

На рисунке 1 представлена блок - схема ДПП, включающая в себя опорный и измерительный (рабочий) резонаторы и схему обработки сигнала.

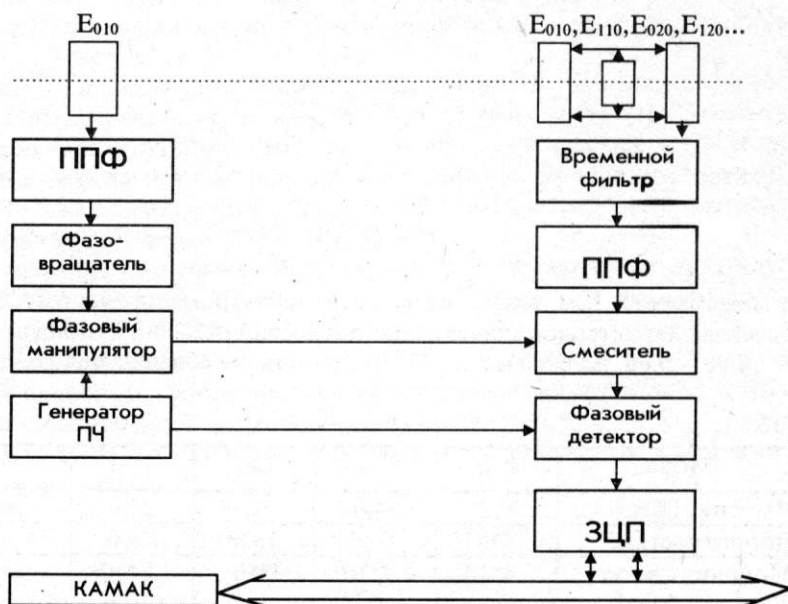


Рис. 1. Блок схема ДПП.

Колебания  $E_{010}$  моды в опорном и  $E_{110}$  моды в рабочем резонаторах имеют одинаковую частоту равную 14 ГГц. Несущий информацию о смещении пучка сигнал из рабочего резонатора после фильтрации подается в смеситель, где смешивается с фазоманипулированным с частотой  $f_{ПЧ}=700$  МГц опорным сигналом, в спектре которого практически отсутствует центральная частота, а основную долю энергии несут две боковые составляющие  $f_0 \pm f_{ПЧ}$ . Таким образом после смесителя имеем сигнал с частотой 700 МГц и несущим информацию о смещении пучка, который усиливается и подается на фазовый детектор. Продетектированный сигнал поступает в зарядно - цифровой преобразователь и далее обрабатывается компьютером. Относительно низкая промежуточная частота позволяет использовать малошумящие усилители и фазовый детектор с широким динамическим диапазоном.

### 3. Рабочий резонатор

Прототип рабочего резонатора (рис. 2) состоит из двух одинаковых цилиндрических резонаторов для измерения смещения по горизонтали (1) и вертикали (2). Каждый из них связан с охватывающим его кольцевым волноводом, заперделным для колебаний основной моды, двумя диаметрально противоположными щелями связи. Вывод мощности осуществляется при помощи коаксиально - волноводного перехода, расположенного симметрично относительно щелей связи. Таким образом конструкция вывода сигнала представляет собой гибридное Т-соединение, подавляющее симметричные моды, что и составляет пространственный фильтр. Коаксиальный резонатор 5 с очень низкой добротностью (нагружен ферритовыми вставками) связан с обоими измерительными резонаторами таким образом, что не возбуждается на частоте рабочей моды и служит для подавления паразитных мод.

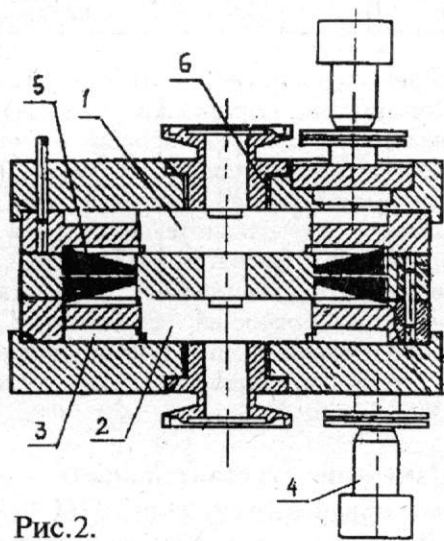


Рис. 2.

частоте рабочей моды и служит для подавления паразитных мод.

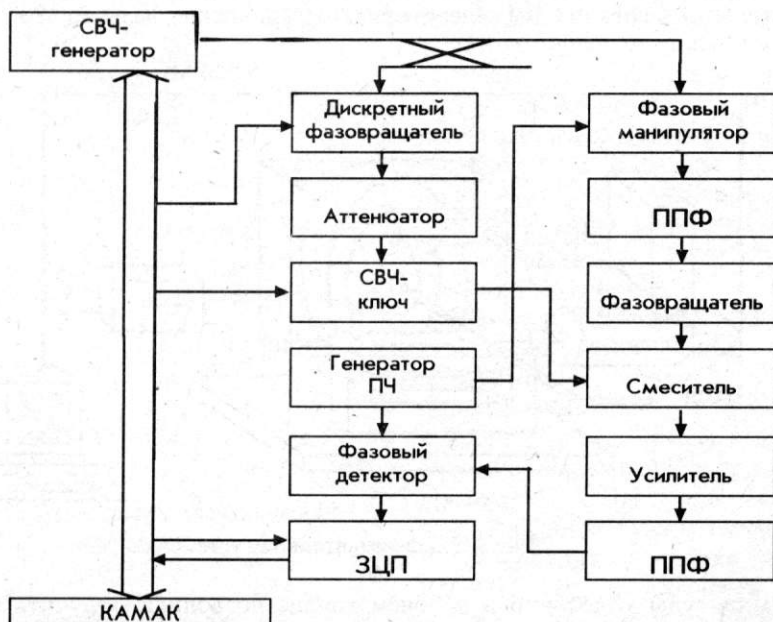


Рис. 3. Схема измерения чувствительности.

Временной фильтр представляет собой СВЧ ключ, который включается с некоторой задержкой относительно времени пролета банча, в течение которой

Табл.2.

Мода	$E_{010}$	$E_{110}$	$E_{020}$	$E_{120}$
Q без щели	5800	7700	9300	9100
Q с щелью	750	7700	1300	6200

паразитные моды затухают вследствие их низкой добротности. Щель затухания

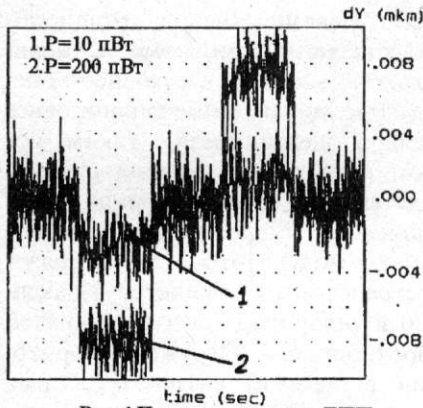


Рис.4. Чувствительность ДПП.

6 азимутально прорезана в боковых стенках рабочих резонаторов в месте равенства нулю радиальных токов  $E_{110}$  моды и поэтому не оказывает на неё влияния, но значительно снижает добротности симметричных мод. В таблице 2 представлены результаты расчета добротностей резонаторов с щелью затухания и без. Расчет проводился при помощи программного пакета URMEL-T и SLANS.

#### 4. Измерение чувствительности схемы обработки сигнала ДПП

На рисунке 3 представлена блок-схема макета для измерения чувствительности схемы обработки. Для имитации рабочего и опорного сигналов использовался разветвленный сигнал СВЧ генератора. Переключение фазы на  $180^\circ$  и измене-

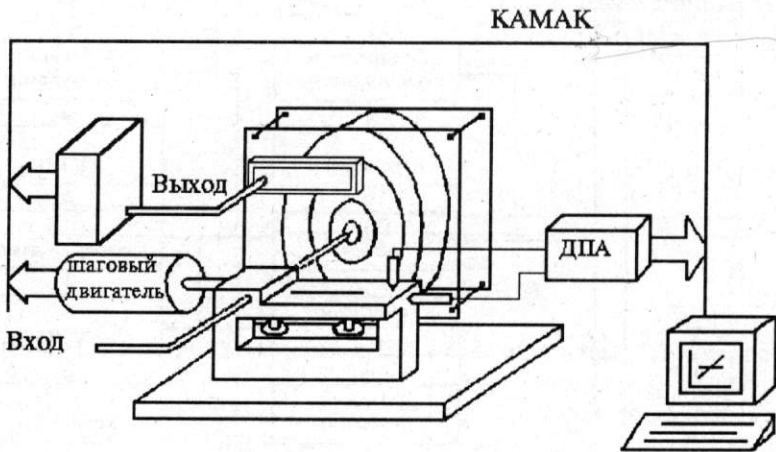


Рис.5. Экспериментальная установка.

ние амплитуды колебаний в рабочем канале позволили получить близкую к реальности картину смещения пучка в различном направлении на разную величину.

На рисунке 4 показаны результаты измерений для двух уровней мощности в рабочем канале - 200 и 10 пВт, при длительности импульсов 50 нс.

Достигнутая чувствительность составила порядка  $10^{-11}$  Вт, что соответствует смещению пучка во ВЛЭПП на несколько нанометров.



## 5. Тестовые испытания ДПП

На рисунке 5 показана установка для испытаний ДПП, которая позволяла перемещать возбуждающую резонатор антенну в поперечном направлении при

Каналы

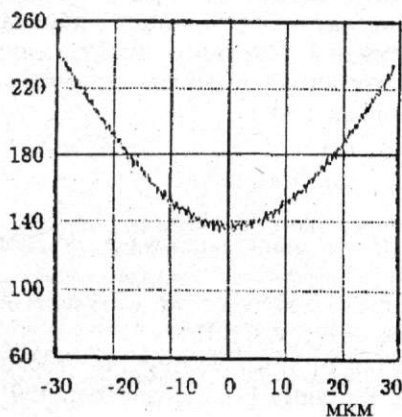


Рис.6. Выходной сигнал ДПП.

Каналы

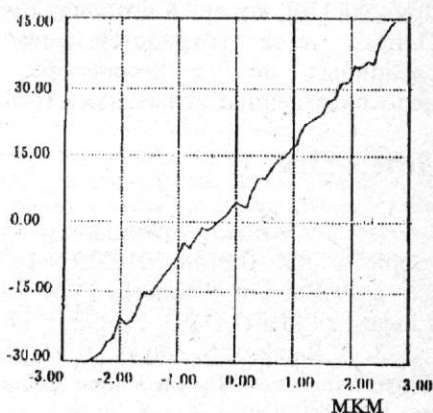


Рис.7. Фазодетектированный сигнал ДПП.

помощи шагового двигателя с шагом 0.11 мкм и вдоль оси на расстояние около 1 мм.

Каналы

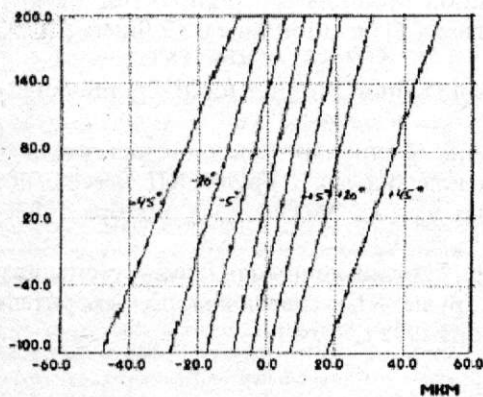


Рис.8. Перестройка электрического нуля датчика.

Положение антенны измерялось с точностью 0.05 мкм. Входной сигнал имел мощность 10 мВт и длительность импульсов 50 нс.

Выходной сигнал датчика положения в зависимости от смещения антенны измерялся до и после фазового детектирования. Соответствующие графики представлены на рисунках 6 и 7. Сравнение этих двух кривых показывает, что фазовое детектирование повышает чувствительность схемы и дает знак смещения. Достигнутое разрешение прототипа ДПП при антенном возбуждении не хуже 0.3 мкм.

Концепция юстировки элементов ВЛЭПП [2] предполагает независимую подстройку нуля датчика положения пучка. Введение в опорном канале фазовращателя позволяет изменять положение электрического нуля датчика в широких пределах (рис. 8). Однако при увеличении фазового сдвига между каналами, вплоть до  $90^\circ$ , ухудшается чувствительность фазового детектора.

## Заключение

Проведенные исследования показали, что для банча, содержащего  $10^{11}$  частиц, вполне достижима чувствительность ДПП в несколько нанометров. В настоящее время ведутся работы по усовершенствованию системы перемещения возбуждающей антенны, с использованием прецизионного привода [10], который позволит перемещать антенну с шагом в доли микрона. Однако из-за трудностей воссоздания реальной картины возбуждения различных мод в резонаторе для окончательных выводов требуются непосредственные испытания датчика положения на пучке.

## Литература

1. W.Schnell, "Common-mod rejection in resonant microwave position monitors", CLIC Note 70, CERN-LEP-RF/88-41.
2. V.Balakin, "Concept BPM for VLEPP", in Proc. of Third Int. workshop on Linear Collider (LC 91), Protvino, 17-27 September, 1991, v.3, p.155.
3. V.Balakin, N.Solyak, V.Vogel, "The model of BPM for VLEPP", in Proc. of Third Int. workshop on Linear Collider (LC 91), Protvino, 17-27 September, 1991, v.3, p.188.
4. V.Vogel et al., "BPM for VLEPP", presented at ECFA- workshop on e+e- Linear Colliders (LC 92), Garmish-Partenkirchtn, 25 Jul. - 2 Aug. 1992.
5. V.Vogel et al., "BPM with the nanometer resolution for VLEPP", in Proc. of Int. workshop on emittance preservation in Linear Colliders (Emittance 93), KEK, Tsukuba, 19-23 April, 1993, pp. 664-671.
6. I.Wilson, "CLIC BPM Tests", in Proc. of The 5th Int. Workshop on Next - Generation Linear Colliders (LC 93), SLAC, Stanford, 13-21 Oct., 1993.
7. R.Lorenz, K.Yezza, "Beam Position Monitors for TESLA Test Facility", presentid on The 5th Int. Workshop on Next - Generation Linear Colliders (LC 93), SLAC, Stanford, 13-21 Oct., 1993.
8. H.Hayano et al., "Submicron Beam Position Monitor for JLC", presented at Linac 92, Ottawa, 1992.
9. Н.И. Зиневич, Д.П. Суханов, А.В. Филиппов, "Высокочувствительный датчик положения пучка в линейных коллайдерах", Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 3-5 октября 1990 г., том 1.
10. В.Е. Балакин, Ю.Д. Валяев и др., "Прецизионный привод системы позиционирования элементов ВЛЭПП", Труды XIII совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 13-15 октября 1992 г., том 1.

# ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ПРОГРАММНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УК ВЛЭПП

Астахов С.А.  
ФИЯФ СО РАН, Протвино

## Аннотация

*Управляющая система для больших ускорителей может быть создана только в виде мультикомпьютерного (мультипроцессорного) комплекса с разделяемым программным доступом к измерительным и управляющим точкам (каналам). Рассмотрение структуры программного обеспечения таких систем является актуальной задачей, так как имеются качественные отличия предъявляемых требований по сравнению с существующими системами.*

*Управляющее математическое обеспечение должно быть максимально независимо от аппаратных и программных платформ и легко настраиваться на конфигурацию. Оно также должно иметь достаточный уровень программной устойчивости относительно аппаратных отказов управляющего оборудования.*

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Управление ускорителями сверхвысокой энергии представляет собой трудную задачу как с аппаратной точки зрения, так и с программной. В настоящей работе рассматривается только программный уровень, причем нижнего и промежуточного уровня. В отличие от программного обеспечения верхнего уровня, где в настоящее время имеется достаточное количество как теоретических, так и ориентированных на практику публикаций, основы нижнего программного уровня управления разработаны недостаточно. В качестве иллюстрации достаточно напомнить, что в различных ускорительных центрах придерживаются различных концепций нижнего уровня и, соответственно, реализованы они по-разному [1,2].

К настоящему времени практика разработки

систем управления ускорителями (ВЭПП-2М, ВЭПП-4 в Новосибирске, УНК в Протвино, JLC в Японии) позволяет выделить основные ключевые моменты, которые должны присутствовать в управляющем математическом обеспечении, вне зависимости от аппаратных и программных платформ (имеется в виду использование различных типов и протоколов магистрально-модульных систем, архитектур управляющих компьютеров и операционных систем). Наиболее полно эти моменты представлены в проекте ускорительного комплекса ВЛЭПП [3] (встречный линейный электронно-позитронных пучков), который представляет собой "большую" систему, состоящую из нескольких весьма сложных инженерных систем, зачастую с противоречивыми требованиями. Чтобы было понятно, с какой системой мы имеем дело, достаточно привести следующие цифры: на 12 м линейной (регулярной) части ускорителя для его работоспособности необходимо задействовать около 400 точек контроля (каналов) как измерительных, так и управляющих. Следовательно, даже без таких необходимых составляющих ускорительного комплекса как система регистрации, системы конверсии, бустеры-охладители и т.д. общее количество точек контроля составит  $\approx 10^5$ .

Вполне естественно, что система управления такого комплекса может быть построена только как многопроцессовый многокомпьютерный комплекс с разделяемым доступом со стороны программного обеспечения к точкам измерений и управления (каналам). Рассмотрение возможной программной структуры такого комплекса является в настоящий момент актуальной задачей, так как ведутся работы по проектированию 100-метрового модуля. При этом следует иметь в виду, что имеются качественные различия требований к программному обеспечению всего комплекса по

сравнению со 100-метровым модулем и эти требования таковы, что могут не только вызвать значительные трудности в использовании готовых программных продуктов 100-метровой секции, но и сделать их совершенно неприменимыми.

Более того, необходимо учесть, что частота работы ускорительного комплекса (частота пролета ускоряемых пучков — bunches — электронов и позитронов) составляет 600 Гц. В результате мы имеем систему с полным информационным потоком  $\approx 10^{10}$  Бод,

Какие же основные требования должны быть предъявлены к данному комплексу программ, обеспечивающих работу ВЛЭПП, независимо от конкретной реализации цифрового оборудования и применяемых операционных систем? В настоящий момент из большого количества таких требований можно выделить несколько наиболее важных.

Рассмотрим эти требования.

## 2 РАБОЧИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Ввиду того, что комплекс ВЛЭПП включает в себя несколько крупных инженерных систем, возникает настоятельная необходимость строить управляющее программное обеспечение, работающее в инженерных и физических терминах. Т.е. в качестве управляющих и измерительных величин должны участвовать нормальные единицы измерений, такие как "Вольт", "Ампер", "Гаусс" и т.д. Это становится совершенно естественным, стоит только упомянуть моделирующее и отладочное математическое обеспечение, результаты которого должны быть передаваемы наиболее простым и естественным способом в управляющие программы. *(Практика показывает, что в дорогостоящем и сложном комплексе его рабочий режим должен предельно моделироваться на предмет возможности безаварийного осуществления требуемого режима.)* Тем более, что моделирующее математическое обеспечение требует на свое создание больших трудозатрат и времени, достаточно упомянуть такие известные продукты, как "Methodical Acceleration Design" и "Transport". Кроме того, в ведущих ускорительных центрах (CERN, DESY, SLAC) в настоящее время предприняты значительные усилия по стандартизации потоков ввода-вывода таких продуктов.

Необходимо также учитывать, что разработчики систем и обслуживающий персонал может быстро и точно идентифицировать параметры ре-

жима только в нормальных метрологических терминах, что очень важно для нормальной операторской работы.

## 3 ИДЕНТИФИКАТОРЫ (НАИМЕНОВАНИЯ)

Так как комплекс ВЛЭПП состоит из большого количества повторяемых (транслируемых) элементов и нескольких крупных параллельно работающих систем с небольшим взаимным информационным потоком, то вторым важнейшим требованием является удобная идентификация (наименование) каналов контроля. При этом простого присвоения каналам имен, исходя из логики работы комплекса, недостаточно. Необходима иерархия и не менее, чем 4-х уровневая (в качестве аналога хорошим примером служит domain-структура в сети InterNet). В настоящее время просматривается следующее деление:

**I. Система.** (Например, бустер-охладитель, транспортный канал, линейная часть, система конверсии, детектор.)

**II. Установка.** (Это функционально законченная небольшая система, с небольшим внешним потоком информации, например, клистрон, высоковольтный преобразователь и т.п.)

**III. Элемент.** (Группа функционально зависимых управляющих и измерительных каналов.)

**IV. Канал.** (Точка измерения или управления.)

Естественно, наименование должно допускать не только существование синонимов, но и произвольную группировку уже использованных имен нижних уровней в наименованиях верхних уровней (также по аналогии с InterNet).

Необходимо специально отметить уровень структуры типа "Элемент". Дело в том, что в задачах управления встречаются случаи взаимосвязанного синхронного управления каналами, когда изменение значения одного должно вызывать изменение значений других. Это может соответствовать изменению режима какой-либо части комплекса. Такое объединение каналов, связанных внутренней логикой управления, является "элементом" управления.

Кроме того, в обязательном порядке должна быть предусмотрена возможность группировки ка-



## 5 ПРИОРИТЕТЫ

налов, уже принадлежащих к какому-либо элементу управления, в другие элементы. Это дает возможность при различных режимах использовать принципиально различную логику управления комплексом.

### 4 РАЗДЕЛЯЕМЫЙ ДОСТУП

Вполне закономерно, что управляющее программное обеспечение комплекса ВЛЭПП не может быть реализовано не только в виде одной всеобъемлющей программы, но и по одной управляющей программе на компьютер. Чтобы управляющее обеспечение вообще могло быть создано, необходимо, чтобы оно имело вид набора одновременно работающих программ, обслуживающих функционально замкнутые (или квазизамкнутые) системы. Такие программы должны писать авторы соответствующих систем, не только полностью понимающие логику их работы, но и предусматривающие решения на случай всевозможных отказов и исключительных ситуаций, так как в случае массово повторяемых элементов и жестких технологических условий работы частые отказы в различных местах комплекса неизбежны.

Следовательно, необходимо предусмотреть, как минимум, разделяемый доступ к измерительным каналам и возможность эксклюзивного доступа к управляющим. Это тем более верно, потому что получение информации измерительного канала может потребовать использования локальной сети и следует принять все меры для снижения сетевого информационного потока.

В качестве замечания следует отметить, что программное обеспечение верхнего уровня — управляющие программы — в подавляющем большинстве случаев не могут использовать управляющие итерационные алгоритмы типа "Градиентный спуск" или им аналогичные по двум причинам. Во-первых, не существует достаточно быстрых алгоритмов обращения матриц или решения систем линейных уравнений большого порядка за время  $\approx$  нескольких миллисекунд на платформе массовых дешевых компьютеров. (В случае применения большого количества цифровой техники использование компьютеров с высоким быстродействием по экономическим причинам невозможно.) Во-вторых, матрица коэффициентов целевой функции, как правило, вырождена. Это легко понять, так как, например, одни и те же параметры пучка могут быть получены различными режимами линз.

Каналы управления должны иметь различные приоритеты и притом динамические. Так как в комплексе имеются подсистемы, требующие немедленной реакции всей системы управления на появление определенного класса событий (например, нарушение вакуума в ускоряющей структуре, или срабатывание температурного датчика пожарной сигнализации, или высоковольтный пробой в системе питания СВЧ-генераторов)<sup>1</sup>, а также необходимы как регулярная доставка информации, так и низкоскоростная операторская отладка наперед выбранных каналов, то необходимо, как минимум, 3 уровня приоритетов:

- I. Real Time;
- II. Work;
- III. Debug.

Наличие приоритета реального времени (необходимо обеспечить скорости доставки и обработки информации порядка периода работы ускорительного комплекса) существенно ограничивает возможность выбора операционных систем и сетевого обеспечения. Так нельзя использовать закрытое сетевое обеспечение, потому что возможна ситуация задержки прохождения информации реального времени в момент рестарта, загрузки программы или данных в одном из периферийных компьютеров.

Уровень приоритета "Debug" должен служить большей частью для операторской отладочной работы с целью проверки каналов (датчиков) на работоспособность, а также запуска дополнительных или новых управляющих систем. В этом случае должна быть обеспечена нормальная работа комплекса в целом (время прохождения управляющей информации от нескольких миллисекунд до нескольких десятков миллисекунд), в то же время для операторской реакции не требуются времена меньше 0.2-0.3 секунды.

### 6 УСТОЙЧИВОСТЬ НА ОТКАЗ

К управляющему программному обеспечению комплекса ВЛЭПП должны быть предъявлены очень жесткие требования по реакции на аппаратные отказы, потому что при большом количестве

<sup>1</sup>Здесь имеется в виду запуск программ вывода системы из рабочего режима, так как чрезвычайные события должны независимо обрабатываться прямым аппаратным способом.

цифровой аппаратуры и жестких технологических условиях работы комплекса (в том числе радиационных) они не только неизбежны, но и далеко не редкое явление. Это означает, что возникают ситуации, когда не только выходят из строя те или иные управляющие или измерительные каналы, но и перестают функционировать управляющие программы, загруженные в отказавший компьютер. Также возможен аппаратный отказ сегмента компьютерной сети или всей сети в целом.

В свете сказанного необходимо решить проблему тестирования (и самотестирования) компьютеров на предмет работоспособности как в целом, так и со стороны отдельных программных продуктов.

## 7 ПУТЬ ДОСТУПА И ЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Следовательно, с аппаратной стороны к одному и тому же каналу должно быть, по крайней мере, два пути доступа: основной и резервный со стороны другого компьютера. Переключение с одного на другой должно осуществляться динамически не нарушая режима работы математического обеспечения.

Кроме того, должны параллельно функционировать, по крайней мере, две сети между абонентами аппаратной иерархии одного уровня.

## 8 АППАРАТНАЯ И ПРОГРАММНАЯ ИЕРАРХИЯ

Не вызывает вопроса, что сложные системы должны строиться по иерархическому принципу, где каждый уровень является информационным фильтром, снижающим информационный поток от периферии к центру. В данном случае должна выделяться управляющая и передаваться к центру только та информация, ответственность за которую несет более высокий уровень, по всей остальной решения должны приниматься на месте.

## 9 СОВМЕСТИМОСТЬ СО СТАРЫМИ И ЧУЖИМИ СИСТЕМАМИ

Математическое обеспечение должно быть открытым, чтобы в него можно было интегрировать чужеродный продукт. Это означает, что в работающий программный комплекс можно было бы без особых трудностей включить (и выключить)

протокол обмена информацией с системой, разработанной на ранних стадиях реализации проекта или выполненной в других местах (например, за рубежом), причем за короткое время.

## 10 НЕОБХОДИМОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО ФАЙЛОВОГО ПРОЦЕССОРА (АСР)

Рассматривая перечисленные требования, можно сделать вывод о необходимости построения специальной программной иерархии управляющего математического обеспечения, которая должна разделить собственно управляющую работу и доставку управляющей информации от/к точкам контроля (каналам).

Здесь уместно напомнить принципы организации дисковой файловой системы компьютеров, где контроллеры дисков выполняют очень ограниченные и простые функции: позиционирования, выбора головок и чтения/записи одного или группы секторов. В то же время программное обеспечение (и пользователи) обращаются к специально организованной логической структуре, которая и называется файловой системой. При этом функцию трансляции логической структуры (директории, файлы) в физическую (цилиндры, головки, сектора) выполняет операционная система, вернее ее специальный процесс, который носит название вспомогательного управляющего процессора (Auxillary Control Processor).

Использование указанного процесса сразу дает ряд выгодных преимуществ, часть из которых реализовать другим способом чрезвычайно трудно:

- Управляющие программы освобождаются от необходимости знания путей доступа к конкретному каналу, они работают только с логическими наименованиями (исходя из предназначения каналов).
- Алгоритмы выделения аппаратных отказов и функция их журнального протоколирования поручаются АСР. В случае возможности восстановления контроля над каналом(ами) и дальнейшей нормальной работы с использованием резервирования без специальных запросов управляющие программы об отказах оборудования не информируются.
- Легко реализуется функция разделяемого дос-

тупа к измерительным каналам и эксклюзивного к управляющим, а также блокировка опасных или аварийных режимов.

- АСР отслеживает минимизацию сетевого потока информации.

Конечно, данный подход требует разработки протокола обмена между управляющими программами и вспомогательным процессором. Но это не является недостатком, так как стандартизует и упрощает структуру управляющих программ.

Минимально необходимыми функциями взаимодействия программ и АСР являются:

**Connect** – присоединение канала к АСР;

**Disconnect** – отсоединение канала;

**Attach** – прикрепление канала для эксклюзивного доступа;

**Detach** – открепление канала от эксклюзивного доступа;

**Read** – чтение (заказа на чтение) канала;

**Write** – запись в канал.

Функция **Connect** необходима для того, чтобы АСР мог загрузить таблицу описания (запись базы данных) присоединяемого канала и подготовить, если это требуется, его к работе (по сути это функция открытия файла).

Функция **Disconnect** освобождает память от таблицы описания каналов, которые далее не используются. Разумеется, физическое освобождение происходит только тогда, когда от указанного канала отсоединяется последняя присоединившая его программа; загрузка, соответственно, только при первом присоединении.

Функции **Attach** и **Detach** необходимы только для организации эксклюзивного доступа к управляющим каналам, так как для измерительных всегда возможен разделяемый доступ.

Кроме измерительных каналов функция **Read** должна обеспечивать доступ также к содержимому управляющих каналов в целях мониторинга, даже если они прикреплены для эксклюзивного доступа. Функция **Write** для измерительных каналов может потребоваться только в целях программной симуляции работы каких-либо систем.

## 11 КОНФИГУРАЦИОННЫЕ И РЕЖИМНЫЕ БАЗЫ ДАННЫХ

Использование вспомогательного управляющего процессора вызывает, как уже отмечалось, необходимость использования нескольких баз данных.

Первая из них — описание физической конфигурации комплекса. Данная база должна содержать описания основных и резервных путей доступа к каждому каналу, указания на используемые сетевые протоколы и имена (адреса) основных и резервных компьютеров (hosts) непосредственно обслуживающих данный канал, а также описание протокола работы с каналом (периферийным устройством), часто являющемся протоколом магистрально-модульных систем таких как КАМАК, VME и т.п.

Изменения в этой базе должны быть возможны при работающем комплексе, следует только перезагрузить (переприсоединить) каналы, которые подверглись изменениям.

Вторая из баз должна содержать описание логической структуры комплекса согласно его функциональной иерархии – описания систем, установок, элементов и каналов, каждый канал которых должен содержать ссылку на описание физической конфигурации. Кроме того, эта база должна содержать информацию по пересчетным коэффициентам (или функциям) из/в бинарных кодах каналов в рабочие величины.

Изменения в этой базе также должны быть возможны при работающем комплексе.

Необходимо отметить, что удаление записей из конфигурационной базы должно быть возможно только в том случае, если на них нет ни одной ссылки со стороны логической, чтобы предотвратить возможную потерю адресата.

Наличие таких баз данных требует создания редактора (редакторов), потому что использование стандартных СУБД не представляется возможным ввиду медленного выполнения транзакций и слишком дробной организации. В то же время использование прямого индексированного доступа дает значительный выигрыш во времени. По этим же соображениям подгрузка в АСР и рабочие программы записей из базы данных логической структуры следует производить с дискретностью не канала, а элемента управления.

Для работы комплекса также необходимыми являются такие структуры, как режимные базы данных, которые служат для сохранения и воспроизведения управляющими программами режимов работы комплекса.

## 12 ВОПРОСЫ СИНХРОНИЗАЦИИ

При рассмотрении программного обеспечения комплекса никак нельзя обойти вопросы его

внутренней синхронизации. Прежде всего следует сделать следующее важное утверждение: синхронный циклический характер работы как АСР, так и управляющих программ предпочтительнее асинхронного. Это можно объяснить следующими причинами:

1. Асинхронная отработка АСР запросов на обслуживание каналов (файловая операция в широком смысле слова) может быть построена только на основе создания очереди, а разделяемый доступ, в свою очередь, требует просмотра всего списка очереди. Наличие же большого количества каналов (открытых файлов), обслуживаемых одним АСР, приводит к недопустимо большим временам обслуживания.

2. Асинхронное включение запросов на обслуживание в очередь к АСР требует частого переключения контекста задания, обрабатываемого процессором, а такая операция является достаточно медленной в любой операционной системе (программной среде) [Environment].

3. Написание и отладка асинхронного АСР, а также его любые модификации, требует больших трудозатрат программистов наиболее высокой квалификации.

4. Асинхронный характер работы АСР полностью закрывает возможности синхронного изменения режима комплекса, при котором необходимо одновременно изменять уставки большого количества каналов в разных частях комплекса.

Использование принципа синхронной периодической работы позволяет построить АСР, полностью свободный от указанных недостатков, тем более для всех управляющих компьютеров комплекса можно легко на аппаратном уровне организовать глобальный "Clock", а также необходимое количество "Subclock", которые разбивают период работы, как АСР, так и управляющих программ, на необходимое число фаз.

Каждая из этих фаз должна быть предназначена для выполнения определенных функций: работы АСР, обмена между управляющими программами и АСР (фаза приема АСР заказов на обслуживание и фаза чтения измеренных данных), работы управляющих программ. За цикл возможны несколько фаз работы как АСР, так и управляющих программ.

Данная организация работы существенным образом минимизирует количество переключений контекста, так как для оформления нескольких запросов на обслуживание каналов со стороны

одной задачи (программы) этого не требуется.<sup>1</sup>

### 13 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная постановка задачи требовала специального рассмотрения на предмет поиска аналогичных систем как в нашей стране, так и за рубежом. В настоящее время к постановке данной задачи наиболее близко подошли на ускорителе JLC (КЕК, Япония), что открывает широкие возможности коллаборации для решения данной задачи. В других же ускорительных центрах данные работы ведутся в несколько другой постановке задачи, но это не мешает использовать некоторые интересные разработки. Так в CERN (Швейцария) на хорошем уровне разработаны управляющие базы данных, которые очень близки к тем, что требуются для УК ВЛЭПП, и при этом создан достаточно универсальный программный комплекс для их использования. Однако их применимость для ВЛЭПП ограничивает исключительно слабый компьютерный парк.

Автор выражает благодарность за плодотворное обсуждение и конструктивные предложения сотрудникам отдела пучков ИФВЭ:

Сахарову В.П., Казакову П.В., Карданеву А.А.;

сотрудникам ИЯФ (Новосибирск):

Алешаеву А.А., Кирпотину А.В.,

Эйдельману Ю.И.;

а также сотруднику National Laboratory on High Energy Physics (КЕК, Japan):

Dr. J.Urakawa.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Europhysics conference on Control systems for experimental Physics. CERN, Geneva, 1990.
- [2] Computing in High Energy Physics '91. Universal Academy Press, Inc. Tokyo, 1991.
- [3] Балакин В.Е. Статус ВЛЭПП. XIV совещание по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1994.

<sup>1</sup> При условии безочередного способа оформления запросов.



**Измерение Плотности Газа Ионным Пучком в Исследованиях  
Десорбции Газа с Поверхности Криогенной Вакуумной Камеры  
под Воздействием Синхротронного Излучения.**

Н.И. Алиновский, В.В. Анашин, П.М. Бесчастнов,  
Г.Е. Деревянкин, В.Г. Дудников, А.В. Евстигнеев,  
А.П. Лысенко, О.Б.Мальшев и В.Н.Осипов  
Институт Ядерной Физики им. Будкера  
Новосибирск, Россия

И.Н. Масленников и В.Ч. Тюрнер  
Лаборатория Сверхпроводящего Супер Коллайдера  
Даллас, Техас 75237

В наших первых экспериментах по фотонно-стимулированной десорбции стенок вакуумной камеры при 4.2 К, плотность газа измерялась при комнатной температуре ионизационными вакууметрами и квадрупольными масс-спектрометрами в объемах, сообщающихся с криогенной вакуумной камерой. Плотность газа внутри вакуумной камеры при 4.2 К была неизвестной, так как средняя скорость фотодесорбированных молекул не определялась. Для прямого измерения плотности газа внутри вакуумной камеры при 4.2 К была разработана методика измерения плотности, использующая перезарядку протонного пучка, пропускаемого через криогенную вакуумную камеру. Протонный пучок (10 кэВ, ~ 1 - 10 мкА) извлекается из ВЧ ионного источника и проводится в холодную вакуумную камеру по ионно-оптической системе с поворотными магнитами. Пучки  $H^0$  и  $H^-$ , образовавшиеся в вакуумной камере в результате перезарядки, отделяются магнитным анализатором от пучка  $H^+$  и регистрируются коллектором и вторично-электронными умножителями. Приведено описание экспериментальной установки, особенности калибровки, измерений в присутствии интенсивного синхротронного излучения и результаты первых экспериментов.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В проектируемых сверхпроводящих коллайдерах нового поколения (LHC в ЦЕРНе [1], SSC в США [2]) одной из проблем является повышение плотности остаточного газа в холодной (4.2 К и ниже) вакуумной камере под действием синхротронного излучения (СИ) протонов. Проектирование вакуумной камеры требует постановки специальных фотодесорбционных экспериментов при температуре жидкого гелия ( $LHe$ ) и ниже. Главный параметр, который необходимо определить, - плотность газа внутри

холодной вакуумной камеры. Обычная техника измерения давления вакуумными датчиками и анализаторами остаточного газа (RGA) установленными в теплой части экспериментальной установки не дают достоверных значений плотности газа в холодной вакуумной камере, так как средняя скорость фотодесорбированных молекул не известна [3].

В этом докладе обсуждается прямой метод измерения плотности газа, использующий перезарядку пучка ионов  $H^+$ , пропускаемого через криогенную вакуумную камеру. Регистрируются потоки  $H^0$  и  $H^-$ , образовавшиеся при захвате протона одного  $H + A = H^0 + A^+$  или двух электронов  $H + A = H^- + A^{++}$ . Количества  $H^0$  и  $H^-$  пропорциональны плотности газа (толщине мишени).

Сечения перезарядки  $\sigma(M)$  на других газах ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ) известны. Разные зависимости  $\sigma(M)$  от энергии позволяют определять парциальные плотности газов.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты выполнялись на канале синхротронного излучения SSC1 электрон - позитронного накопителя ВЭПП-2М в Институте Ядерной Физики им. Будкера (Новосибирск, Россия). Схема этого эксперимента показана на Рис. 1.

Особенности и параметры канала и гелиевого криостата приведены в работах [3,4]. Критическая энергия фотонов и интенсивность в канале SSC1 идентичны таковым в проекте SSC (284 eV,  $\sim 10^{16}$  фотон/(м·сек)).

Для получения пучка ионов  $H^+$  используется ионный источник с ВЧ разрядом на частоте 33 МГц, который обеспечивает образование плазмы в кварцевой колбе источника. Все оборудование экранировано от ВЧ наводок. Разброс энергий в пучке  $H^+$  минимизировался тщательной фильтрацией ВЧ составляющей в напряжениях на электродах системы формирования пучка. Пучок ионов с энергией 10 кэВ и током до 100 мкА извлекается через эмиссионное отверстие диаметром 1 мм и фокусируется одиночной электростатической линзой на выходе источника ионов. Из источника ионов пучок направляется в  $90^\circ$  магнитный масс-анализатор M1 (поворотный радиус  $R = 8$  см, показатель спада  $n = 0.5$ ). Коллиматор COL1 с отверстием диаметром 1-мм находится на выходе M1. Измерение тока на четырех секторных электродах, размещенных перед COL1, используется для оптимизации фокусировки и управления пучком. Пучок фокусируется в отверстие коллиматора. Подобный коллиматор COL2 размещается на входе  $127^\circ$  поворотного магнита M2 ( $R = 8$  см,  $n = 0.5$ ) который вводит пучок по оси холодной вакуумной камеры.

Фокусирующая система включает триплет (Q1-Q3) и дуплет (Q4, Q5) магнитных квадрупольных линз Пановского, три электростатических

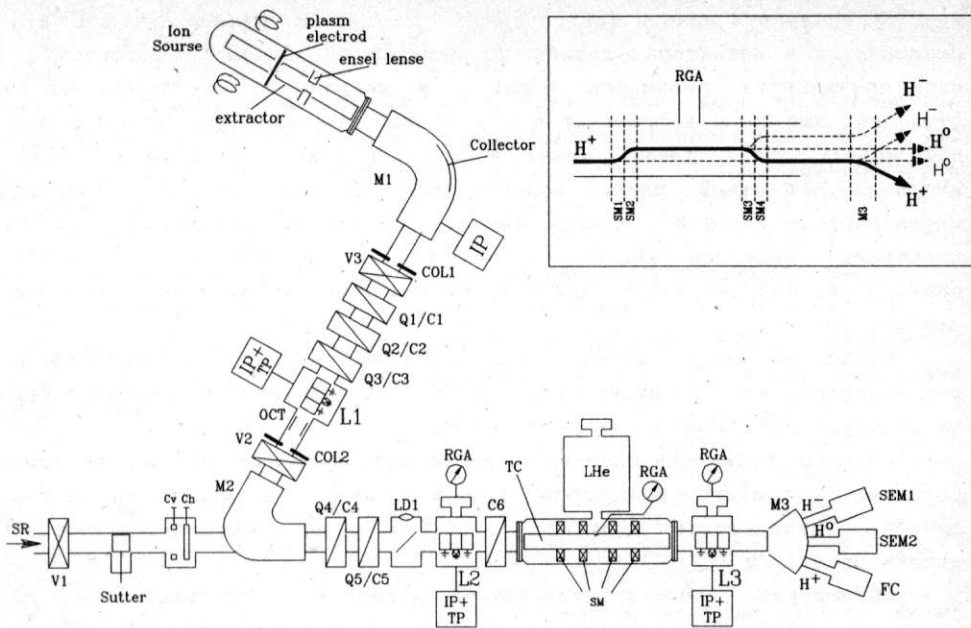


Рисунок 1. Установка для прямого измерения ионным пучком плотности газа в криогенной вакуумной камере. L1, L2, L3 - электростатические линзы; M1-M3 - поворотные магниты; SM1-SM4 - сверхпроводящие магниты (4); C1-C6 - корректора; Q1-Q5 - квадруполи; FC: цилиндр Фарадея; SEM1, SEM2 - ВЭУ; TC - тест-камера; COL1, COL2 - коллиматоры ионного пучка; V1-V3 - вакуумные шибера; LD1 - люминофорный датчик; IP+TP - вакуумные насосы; RGA1-RGA3 - масс-спектрометры; Cv, Ch - коллиматоры СИ. На вставке: иллюстрация разделения вторичных пучков частиц в вакуумной камере.

одиночных линзы с ускоряющим полем (L1, L2, L3), электростатический октупольный корректор-стигматор (позади L1), и магнитные дипольные пары корректоров (C1-C6). Диаметр пучка  $H^+$  находится в пределах 1-3 мм в детекторах. Подвижный люминофорный датчик (LD1) используется для наблюдения за пучком ионов и потоком СИ. Высоковольтные источники напряжения для ионного источника и электростатических линз регулируются и стабилизируются с точностью  $10^{-4}$ . Все источники питания для поворотных магнитов, квадруполей и корректоров имеют относительную точность  $10^{-4}$ . Система автоматизированного контроля и управления базируется на основе IBM PC и крейт-КАМАКа.

В холодной вакуумной камере пучок ионов может сдвигаться от оси камеры четырьмя сверхпроводящими поворотными магнитами (SM1-SM4), установленными в середине вакуумной камеры. Это позволяет регистрировать отдельно пучки вторичных частиц, образовавшихся на 20-см.

участке вакуумной камеры (См. вставку на Рис. 1). Вторичные пучки  $H^0$  и  $H^-$  разделяются в детекторах дипольным магнитом МЗ. Пучок  $H^+$  с током до 2 мкА принимается цилиндром Фарадея диаметром 25 мм. Нейтралы и отрицательные ионы направляются к соответствующим детекторам с ВЭУ. ВЭУ могут регистрировать пучки в токовом режиме и в режиме счета импульсов. Счетный режим используется для абсолютной калибровки интенсивности  $H^-$  и  $H^0$ . Каждая частица  $H^-$  или  $H^0$  с энергией  $\sim 10$  кэВ производит выходной импульс с амплитудой порядка из  $10^5 - 10^6$  электронов. Импульс с ВЭУ регистрируется и анализируется системой сбора данных.

Чтобы различить сигнал пучка ионов от индуцированного СИ фона, интенсивность ионного пучка модулируется подачей импульсного напряжения на электрод-дефлектор внутри магнита М1.

Влияние ионно-стимулируемой десорбции из-за рассеянных протонов устраняется тщательной юстировкой и использованием импульсных ионных пучков. Длительность импульса = 0.3-1 мсек, частота повторения импульсов  $\sim 1$  Гц.

Наблюдение ионно-стимулируемой десорбции использовалось для проверки правильности юстировки ионного пучка в вакуумной камере. Отсутствие ионно-стимулируемой десорбции являлось критерием хорошей юстировки.

Плотность газа измерялась одновременно ионным пучком в криогенной вакуумной камере и калиброванными ВЧ квадрупольными анализаторами газа (RGA) при комнатной температуре. RGA подсоединялись к отверстию в центре вакуумной камеры и в каждом теплом конце.

Система дифференциальной откачки, включающая три вакуумных насоса IP1-IP3 и два коллиматора COL1 и COL2 с отверстиями для пучка диаметром 1 мм, обеспечивает снижение давления от  $5 \cdot 10^{-6}$  Тор в вакуумной камере магнита М1 до  $5 \cdot 10^{-10}$  Тор в тестовой вакуумной камере. Открывание и закрывание шибера V3 не производит никаких изменений в измеряемом RGA1 давлении в вакуумной камере. Давление в ионном источнике -  $\sim 1 \cdot 10^{-3}$  Тор.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В первой серии экспериментов одновременно измерялись ток ионов  $H^-$ , образовавшихся за счет перезарядки на газе в канале, и давление  $H_2$ , регистрируемое RGA в середине 4.2К вакуумной камеры. Эти измерения были выполнены как при облучении вакуумной камеры фотонами Си и так и без Си. Без Си молекулы  $H_2$  внутри вакуумной камеры имеют температуру 4.2К. Таким образом плотность  $n_1$  водорода определяется следующей формулой:



$$n_1 = n_{293} \cdot \frac{\bar{v}_{293}}{\bar{v}_{4.2}}, \quad (1)$$

где  $n_{293}$  ( $n=P/kT$ ) - плотность  $H_2$  измеряемая RGA при комнатной температуре,  $\bar{v}_{293}$  и  $\bar{v}_{4.2}$  - эффективная средняя скорость молекул для 293 К и 4.2 К соответственно. В то же самое время интенсивность отрицательных ионов  $I_1^-$ :

$$I_1^- = n_1 \cdot L \cdot \sigma \cdot I^+, \quad (2)$$

где  $L$  - длина пути, на которой образуются отрицательные ионы,  $\sigma$  - сечение перезарядки, и  $I^+$  - интенсивность пучка  $H^+$ .

При наличии фотонов СИ эффективная средняя скорость молекул  $\bar{v}$  неизвестна. Плотность  $H_2$  в этом случае может определяться следующими выражениями:

$$n_2 = n_1 + \Delta n, \quad (3)$$

и

$$I_2^- = (n_1 + \Delta n) \cdot L \cdot \sigma \cdot I^+, \quad (4)$$

где  $\Delta n = \Delta n_{293} \cdot \bar{v}_{293} / \bar{v}$  - увеличение плотности благодаря фотодесорбции. Комбинация выражений (1)-(4) дает следующую формулу для эффективной средней скорости молекул:

$$\bar{v} = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \cdot \frac{I_1^-}{I_2^- - I_1^-} \cdot \bar{v}_{4.2}, \quad (5)$$

где  $P_2$  - измеряемое RGA давление при наличии СИ, а  $P_1$  - без СИ.

Необходимо отметить что в этом случае нет необходимости определять  $\sigma$  и  $L$ . Мы должны только обеспечить преимущественное образование отрицательных ионов в пределах холодной вакуумной камеры и/или поддерживать плотность в теплых концах вакуумной камеры значительно ниже, чем внутри холодной вакуумной камеры.

Типичные результаты регистрации плотности газа внутри 4.2К вакуумной камеры представлены в Таблице 1.

Таблица 1

	$I_{SEM}(H^-)$ , нА	$P_{H_2}(RGA)$ , Тор
С СИ	360	$1.5 \cdot 10^{-8}$
Без СИ	235	$5.0 \cdot 10^{-9}$

Ток протонного пучка  $I(H^+)$  был около 0.5 мкА для обоих случаев.

При использовании этих данных и формулы (5) можно оценить эффективную среднюю скорость молекул  $\bar{v}$ , десорбированных под воздействием СИ. Для этой скорости получена оценка  $8 \cdot 10^4$  см/сек, что соответствует температуре газа 60 К. При известной средней скорости

молекул  $H_2$  возрастание плотности остаточного газа из-за десорбции под воздействием СИ может быть оценено по показаниям RGA.

#### ВЫВОДЫ

1. Разработана, изготовлена и запущена специальная экспериментальная установка с ионным пучком. Установка обеспечивает прямое измерение молекулярной плотности газа внутри криосорбирующей вакуумной камеры по интенсивности потоков  $H^-$  и  $H^0$ , образовавшихся в результате перезарядки  $H^+$ . Чувствительность измеряемой плотности газа для этой установки лучше  $1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ .

2. Проведены первые измерения эффективной скорости молекул  $H_2$ , десорбированных с поверхности вакуумной камеры при 4.2 К под воздействием СИ. Для скорости получена оценка  $8 \cdot 10^4 \pm 1.5 \cdot 10^4 \text{ см/сек}$ , соответствующая эффективной температуре  $60 \pm 20 \text{ К}$ . Использование этого значения скорости позволяет оценить динамическую плотность газа в работе [3].

3. Планы будущей работы на этой экспериментальной установкой включают измерения скорости молекул и плотности:

- а) в вакуумной камере в конфигурации с лайнером,
- б) в вакуумной камере с различной поверхностной плотностью физосорбированных молекул  $H_2$ , и
- в) для других газов ( $CO$ ,  $CO_2$ ) с использованием вариации энергии протонного пучка.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] LHC Study Group, "Design Study of the Large Hadron Collider (LHC)," CERN 91-03 (1991).
- [2] SSC Central Design Group, "Conceptual Design of the Superconducting Super Collider," SSC-R-2020, March (1986).
- [3] В.В. Анашин, О.Б. Мальшев и др., "Экспериментальные Исследования Динамического Давления в Криосорбирующей Вакуумной Камере под Воздействием Синхротронного Излучения", представлен на этой конференции.
- [4] I. Maslennikov, W. Turner, V. Anashin, et al., "Photodesorption Experiments on SSC Collider Beam Tube Configurations," Proc. of 1993 IEEE Part. Acc. Conf., pp. 3876-3878, Washington, D.C.

**Экспериментальные Исследования Динамического Давления  
в Криосорбирующей Вакуумной Камере  
под Воздействием Синхротронного Излучения.**

В.В. Анашин, О.Б. Мальшев и В.Н. Осипов  
Институт Ядерной Физики им. Будкера  
Новосибирск, Россия

И.Н. Масленников и В.Ч. Тюрнер  
Лаборатория Сверхпроводящего Супер Коллайдера  
Даллас, Техас 75237

Сообщаются результаты экспериментов по фотонно-стимулированной десорбции со стенок вакуумной камеры при температуре 4.2К. Параметры синхротронного излучения (СИ) выбраны такими, чтобы моделировать условия 20 ТэВ протонного коллайдера SSC: критическая энергия = 284 эВ, интенсивность фотонов  $10^{16}$  фотон/м/сек. Были использованы две экспериментальных конфигурации: вакуумная камера в виде простой трубы при 4.2К и трубы при 4.2К с коаксиальным перфорированным лайнером. В случае без лайнера коэффициент десорбции водорода линейно зависел от плотности  $H_2$  на поверхности и достигал величины масштаба единицы при приближении поверхностной плотности к монослою ( $\sim 3 \cdot 10^{15} H_2 / \text{см}^2$ ). Коэффициент десорбции молекул водорода для трубы с лайнером монотонно убывал с возрастанием набранной фотонной дозы, достигая коэффициента фотонно-стимулированной десорбции  $\sim 4 \cdot 10^{-4}$  молекул/фотон в конце облучения ( $\sim 10^{22}$  фотон/м). Лайнер продемонстрировал эффективность экранирования криосорбированных молекул от СИ.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В проектируемых сверхпроводящих коллайдерах нового поколения (LHC в ЦЕРНе, SSC в США) одной из проблем является рост плотности остаточного газа в холодной (4.2К и ниже) вакуумной камере под воздействием синхротронного излучения протонов. Характер поведения плотности остаточного газа в такой системе существенно влияет на конфигурацию вакуумной системы коллайдера в целом. Молекулярная плотность внутри криосорбирующей вакуумной камеры имеет три компонента: (1) плотность первично десорбированных молекул, (2) плотность вторично десорбированных молекул, физосорбированных на криопер поверхности и (3) изотермическая плотность физосорбированных на поверхности трубы молекул [1]. Для всех газов, кроме  $H_2$  (и He если имеются течи) изотермическая плотность пренебрежимо мала.

Потенциальные проблемы вакуумной камеры в виде простой трубы: вторичная фотодесорбция и возрастающая с ростом набранной фотонной дозы изотермическая плотность  $H_2$  - облегчаются концепцией лайнера. Лайнер (liner) - это коаксиальная перфорированная трубка, установленная внутри вакуумной камеры. В этом случае физосорбированные молекулы накапливаются на поверхности криосорбирующей вакуумной камеры, защищенной лайнером от потока фотонов. Эффективная сорбирующая поверхность вакуумной камеры может быть увеличена во много раз использованием криосорбера.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для понимания процессов, происходящих в вакуумной камере коллайдера, в Институте Ядерной Физики им. Будкера (Новосибирск, Россия) совместно с лабораторией SSC (Даллас, США) был разработан и создан специальный стенд на базе накопителя ВЭПП-2М как источника СИ, состоящий из двух каналов вывода синхротронного излучения: SSC1 (низкой интенсивности) и SSC2 (высокой интенсивности). Схематически экспериментальная установка представлена на Рисунке 1. Критическая энергия  $E_c$  излучения накопителя ВЭПП-2М при энергии 534 МэВ совпадает с критической энергией СИ сверхпроводящего сурерколлайдера на энергии  $2 \times 20$  ТэВ (SSC). Конструкция и параметры каналов описаны в работе [2].

Проводились два типа экспериментов с различными интенсивностями и интегральными фотонными дозами:

- Эксперимент с прототипом вакуумной камеры в виде простой трубы из нержавеющей стали длиной 1 м, покрытой электроосажденной медью (внутренний диаметр трубы - 32 мм, внешний - 34.9 мм, толщина медного покрытия - 70 мкм.

- Эксперимент с лайнером: Внутри трубы с внутренним диаметром 41.9 мм вставляется перфорированный отверстиями экран (лайнер), из нержавеющей стали длиной 1 м, покрытой электроосажденной медью (внутренний диаметр трубы - 32 мм, внешний - 34.9 мм, толщина медного покрытия - 70 мкм, соединенный сваркой на концах.

Простая труба и труба большего диаметра в случае с лайнером были сварены в горизонтальный гелиевый криостат (~ 20 л). На горизонтальный криостат установлен промежуточный 140-литровый объем. Такая схема позволяет проводить эксперименты без ограничения по времени и при постоянной температуре 4.2К, доливая при необходимости жидкий гелий из транспортного сосуда. Измеренные статические теплопритоки при 4.2К составили ~ 0.45 Вт. Такие низкие теплопритоки позволяют измерять мощность СИ, выделяющуюся на стенках трубы по незначительному увеличению интенсивности кипения жидкого гелия. Измеренная величина соответствует расчетной. Температура вакуумной камеры может быть понижена откачкой паров гелия до 2+3К. Температура измеряется



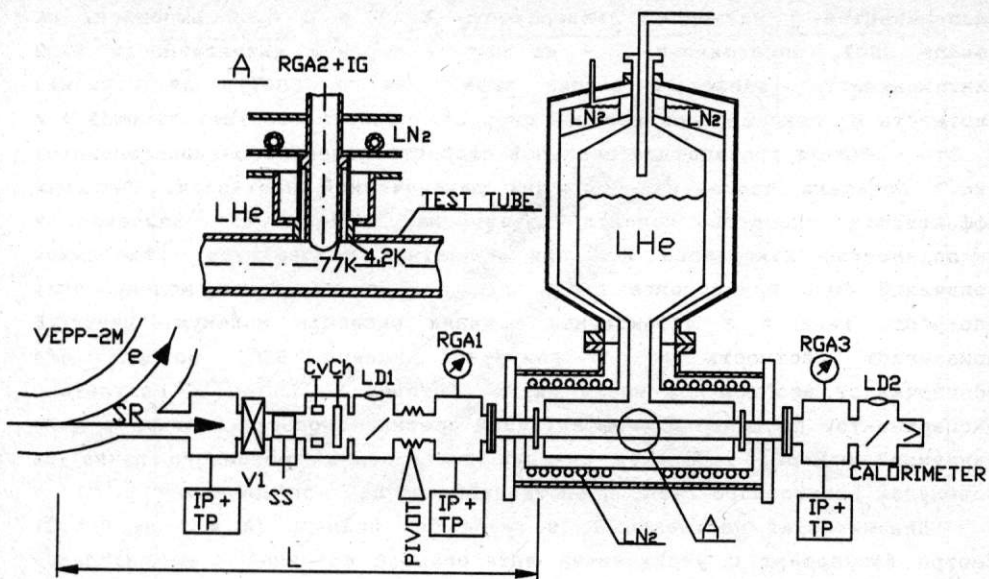


Рисунок 1. Экспериментальная установка для фотодесорбционных исследований при низких температурах. V1 - вакуумный шибер, Cv, Ch - вертикальный и горизонтальный коллиматоры, SS - радиационная заслонка, LD1, LD2 - люминофорные датчики, RGA - масс-спектрометр, IG - ионизационная лампа, IP+SP - насосы,  $L_{SSC1} = 11070$  мм,  $L_{SSC2} = 1750$  мм.

полупроводниковым датчиком, установленном на внешней стороне трубы. Температура лайнера не измерялась. Мы оцениваем повышение температуры в центре лайнера на  $5+10$  К при мощности СИ  $125+250$  мВт/м.

Плотности газов измеряются квадрупольными анализаторами остаточного газа (RGA) при комнатной температуре в центре трубы и на концах. Центральный RGA подсоединен к трубе через отверстие диаметром 24 мм. Мы позаботились избежать сорбирующей гелиевой поверхности в трубке, подсоединяющей RGA к трубе. Вблизи отверстия в трубе подсоединяющая трубка имеет температуру 77К, переход к комнатной температуре на другом конце трубки вблизи RGA происходит через тонкий стальной сильфон. Отверстие в трубе и 77К трубка разделены 0.2-мм вакуумной щелью. Для переходов от 4.2К к 77К и 294К на концах трубы использовались тонкостенные сильфоны из нержавеющей стали. Находящиеся при комнатной температуре вакуумные концы криостата откачиваются ПВИГами.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На Рис.2 представлены результаты измерений динамической плотности  $H_2$  в зависимости от интегральной фотонной дозы. Кривые А и В на этом рисунке получены из экспериментов без лайнера и кривые С и D из

экспериментов с лайнером. Эксперименты А, В и С были выполнены на канале SSC1, эксперимент D - на канале высокой интенсивности SSC2 (интенсивность фотонов в 8 раз выше, чем на SSC1). Динамическая плотность  $H_2$  показана при средней скорости молекул, соответствующей 4.2 К. Это - нижняя граница для реальной скорости молекул, следовательно на Рис.2 показана предельная величина динамической плотности. Реальная эффективная скорость молекул неизвестна, потому что давление в экспериментах измерялось RGA при комнатной температуре. Измеряемой величиной было произведение  $n \cdot \bar{v}$ , где  $n$  - динамическая молекулярная плотность газа и  $\bar{v}$  эффективная средняя скорость молекул. Линия Е показывает плотность  $H_2$  в вакуумной камере SSC, которая еще обеспечивает необходимое время жизни протонов (~ 150 ч.). Результаты экспериментов по измерению эффективной средней скорости молекул в 4.2К вакуумной камере, используя сечение перезарядки протонного пучка на молекулах остаточного газа, представлены на эту конференцию [3].

Динамическая плотность  $H_2$  в трубе без лайнера (А и В на Рис.2) быстро возрастает с увеличением интегральной фотонной дозы благодаря вторичной фотодесорбции физосорбированных молекул. Эту плотность можно выразить следующей формулой :

$$n = \frac{4 \cdot \eta' \cdot \frac{d\Gamma}{dt}}{\sigma_w \cdot A_w \cdot \bar{v}}, \quad (1)$$

где  $d\Gamma/dt$  = фотонов/м/сек;  $\sigma_w$  - коэффициент прилипания,  $A_w$  - площадь стенок вакуумной камеры на единицу длины;  $\bar{v}$  - эффективная средняя скорость молекул;  $n$  - динамическая плотность молекул газа, и  $\eta'$  - коэффициент вторичной фотодесорбции физосорбированных молекул. Коэффициент  $\eta'$  для низкого поверхностного покрытия зависит от поверхностной плотности  $H_2$  и может достигать значения порядка единицы при одном монослое  $s_m \sim 3 \cdot 10^{15} H_2/\text{см}^2$  [4]. Из графика видно, что плотность  $H_2$  в вакуумной камере без лайнера становится неприемлемой по времени жизни уже при дозе  $2 \cdot 10^{20}$  фотонов/м. (Это - всего, приблизительно, 6 часов работы SSC.)

В экспериментах с лайнером поведение динамической плотности водорода качественно другое. Плотность (кривые С и Д) уменьшается с  $4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$  в начале эксперимента до  $4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$  при дозе  $3.5 \cdot 10^{22}$  фотонов/м. Чтобы избежать влияния термодесорбции физосорбированных молекул из вакуумной камеры снаружи лайнера, при приближении к одному монослою температура этой вакуумной камеры понижалась до  $2.5 \pm 3$  К откачкой паров жидкого гелия. Десорбированные синхротронным излучением молекулы уходят через отверстия в лайнере и аккумулируются на защищенной от СИ поверхности. В этом случае накопление физосорбированных молекул на внутренней поверхности лайнера не

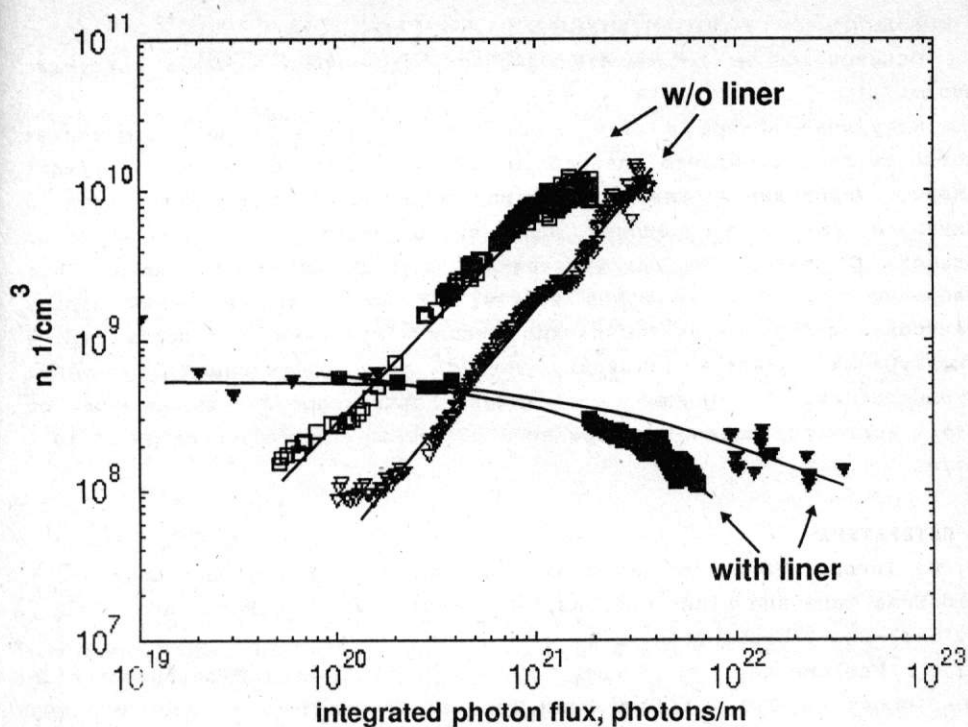


Рисунок 2. Динамическая плотность водорода, измеренная в центре вакуумной камеры с лайнером и без лайнера. Плотность приведена для потока  $10^{16}$  фотонов/м/сек.

происходит и динамическая плотность определяется следующим образом:

$$n = \frac{4 \cdot \eta \cdot \frac{d\Gamma}{dt}}{p \cdot N_h \cdot A_h \cdot \bar{v}}, \quad (2)$$

где  $\eta$  - коэффициент первичной фотодесорбции сильно связанных молекул,  $N_h$  - число отверстий на метр,  $A_h$  - площадь отверстий,  $p$  - вероятность прохождения молекулы через отверстие.

Измерения показали, что коэффициент фотодесорбции  $\eta$  равен  $4 \cdot 10^{-3}$  молекул/фотон в начале эксперимента и уменьшается до  $4 \cdot 7 \cdot 10^{-4}$  молекул/фотон в конце, и плотность  $H_2$  становится приемлемой по времени жизни протонов после набранной фотонной дозы  $\sim 10^{21}$  фотон/м. Фотодесорбция других газов, более тяжелых чем  $H_2$ :  $CO$ ,  $CO_2$  и  $CH_4$  - должна также рассматриваться для получения требуемого времени жизни в конфигурации с лайнером. У нас имеются экспериментальные данные относительно  $CO$ , и намечены изменения в установке, чтобы проводить также измерения  $CO_2$  и  $CH_4$ .

Подробное описание холодных фотодесорбционных экспериментов содержится в работах [5] и [6].

## ВЫВОДЫ

Основываясь на результатах экспериментов можно сделать следующие выводы.

Вакуумная камера в виде простой трубы при 4.2К не обеспечивает плотность газа требуемую для работы SSC, а частота отогревов вакуумной камеры, необходимая для поддержания плотности остаточного газа в вакуумной камере в пределах допустимого диапазона, будет неудобно большой. С другой стороны эксперимент с 4.2К лайнером показал, что требуемую плотность  $H_2$  можно достичь за достаточно короткий период тренировки вакуумной камеры синхротронным излучением. Плотность газа в конфигурации лайнера зависит только от коэффициента первичной фотодесорбции. Измеренный коэффициент фотодесорбции изменяется от  $4 \cdot 10^{-3}$  мол/фот в начале эксперимента до  $4+7 \cdot 10^{-4}$  мол/фот при  $1+3.5 \cdot 10^{22}$  фот/м.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] W. Turner, "Dynamic Vacuum in the Beam Tube of the SSCL Collider - Cold Beam Tube and Liner Options," Proc. of 1993 IEEE Part. Acc. Conf., pp. 3833-3835, Washington, D.C.
- [2] I. Maslennikov, W. Turner, V. Anashin et al., "Photodesorption Experiments on SSC Collider Beam Tube Configurations," Proc. of 1993 IEEE Part. Acc. Conf., pp. 3876-3878, Washington, D.C.
- [3] Н.И. Алиновский, В.В. Анашин и др., "Измерение Плотности Газа Ионным Пучком в Исследованиях Десорбции Газа с Поверхности Криогенной Вакуумной Камеры под Воздействием Синхротронного Излучения", представлен на этой конференции.
- [4] V. Anashin, G. Derevyankin, V. Dudnikov et al., "Cold Beam Tube Photodesorption and Related Experiments for the SSCL 20 TeV Proton Collider," SSCL Preprint 533 (1994), Figure 6 and discussion. Accepted for publication in JVST.
- [5] V. Anashin, A. Evstigneev, O. Malyshev et al., "Summary of Recent Photodesorption Experiments at VEPP2M," SSCL-N-825 (1993).
- [6] V. V. Anashin, O. B. Malyshev, V. N. Osipov et al., "Investigation of Synchrotron Radiation Induced Photodesorption in Cryosorbing Quasi-Closed Geometry," SSCL Preprint 517 (1993). Accepted for publication in JVST A.