

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

В.Е. Блинов, Е. Бехтенёв, О.П. Гордеев,
А.И. Жмака, С.А. Крутихин, В.А. Киселев,
Г.Я. Куркин, Е.Б. Левичев, О.И. Мешков,
А.И. Михайлов, В.В. Нейфельд, С.А. Никитин,
И.Б. Николаев, Г.М. Тумайкин, А.П. Чабанов,
Д.Н. Шатилов

СИСТЕМА ВЧ РАЗВЕДЕНИЯ
ЭЛЕКТРОННОГО И ПОЗИТРОННОГО ПУЧКОВ
НА ВЭПП-4М

ИЯФ 2013-12

Новосибирск
2013

Система ВЧ разведения электронного и позитронного пучков на ВЭПП-4М

В.Е. Блинов, Е.А. Бехтенёв, О.П.Гордеев, А.И.Жмака,
С.А.Крутихин, В.А.Киселев, , Г.Я.Куркин, Е.Б.Левичев,
О.И.Мешков, А.И.Микайылов, В.В.Нейфельд, С.А.Никитин,
И.Б.Николаев, Г.М.Тумайкин, А.П.Чабанов, Д.Н.Шатилов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

Развит и демонстрируется ВЧ метод разведения орбит электронного и позитронного пучков в коллайдере ВЭПП-4М. Основная цель применения метода состоит в том, чтобы исключить значительный вклад системы электростатического разведения орбит в систематическую погрешность запланированного эксперимента по проверке СРТ-инвариантности .

RF system for electron and positron beams orbit separation at VEPP-4M

V.E. Blinov, E.A. Bekhtenev, A.P. Chabanov , O.P. Gordeev,
S.A. Krutikhin, V.A. Kiselev, G.Ya. Kurkin, E.B. Levichev,
O.I. Meshkov, A.I. Mikaiylov, V.V. Neifeld, S.A. Nikitin,
I.B. Nikolaev, D.N. Shatilov G.M. Tumaikin, A.I. Zhmaka

RF orbit separation of electron and positron beams in VEPP-4M collider is developed and demonstrated. The main aim of applying of this method is exclusion of substantial contribution of the electrostatic orbit separation system to a systematic error of the scheduled CPT invariance test experiment.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени создана аппаратура, развиты методические подходы и изучены основные источники погрешности для проведения прецизионного эксперимента по проверке СРТ-инвариантности путём сравнения спиновых частот электрона и позитрона в коллайдере ВЭПП-4М [1–3]. В частности, достигнуто разрешение 10^{-9} по частоте деполяризации в экспериментах с двумя поляризованными электронными сгустками. Ведущее поле стабилизируется с точностью 10^{-6} с помощью специально разработанной системы обратной связи по сигналу ЯМР датчика поля в калибровочном магните. Препятствием для начала полноценного эксперимента является необходимость применять систему электростатического разведения орбит электронов и позитронов в паразитном месте встречи. Экспериментально и теоретическими оценками было установлено, что эта система может приводить к неприемлемо большой систематической ошибке 10^{-6} в планируемом эксперименте. Для её устранения была разработана, создана и испытана альтернативная система разведения пучков, основанная на применении поперечного ВЧ электрического поля.

1. Принципы ВЧ разведения орбит

Суть метода ВЧ разведения схематично пояснена на рис. 1. Магнитная оптика на участке накопителя с паразитным местом встречи (технический промежуток ВЭПП-4М), которое диаметрально противоположно основному месту встречи IP, не является оптимальной в отношении возмущения, вносимого полем встречного сгустка. Требуется развести орбиты встречных пучков в паразитном месте встречи с условием, что интеграл используемого электрического поля вдоль получающейся замкнутой орбиты равен нулю. Последнее важно с точки зрения СРТ-эксперимента. При ненулевом интеграле электрического поля замкнутые орбиты электронов и позитронов будут различаться. Как следствие, появится относительный сдвиг их спиновых частот, который, как и при использовании электростатического разведения, приведет к заметной систематической погрешности в эксперименте по прецизионному сравнению спиновых частот электрона и позитрона.

В случае применения метода ВЧ разведения электроны и позитроны движутся по единой орбите, которая замыкается через два обычных оборота частицы в данном накопительном кольце. С этой целью на азимуте разведения с помощью пластин-электродов создается радиальное электрическое поле, которое меняется по синусоиде с частотой, строго равной половине частоты обращения (на ВЭПП-4М частота обращения $f_0 = 819$ кГц). Получающаяся при этом единую орбиту можно условно отобразить (не принимая во внимание её колебания вследствие отклонения от оси фокусирующих магнитов) плоской алгебраической кривой 4-го порядка, носящей название “Улитка Паскаля” (рис. 1). После лобовой встречи в основном месте встречи (IP) электронный сгусток движется по внутренней петле “улитки”, и позитронный – по наружной. Сгустки оказываются разведенными в паразитном месте встречи, там, где установлены ВЧ пластины. Продолжая двигаться, сгустки вновь встречаются “лоб в лоб” в точке орбиты IP. После этого электроны движутся по внешней петле орбиты, а позитроны – по внутренней и поэтому и на этот раз не встречаются на азимуте размещения ВЧ пластин, на котором поле сменило свой знак. Далее картина движения повторяется согласно описанному циклу. В силу того что фаза колебаний электрического поля меняется на 180° на каждом обороте, его интеграл воздействия на сгустки за два оборота равен нулю.

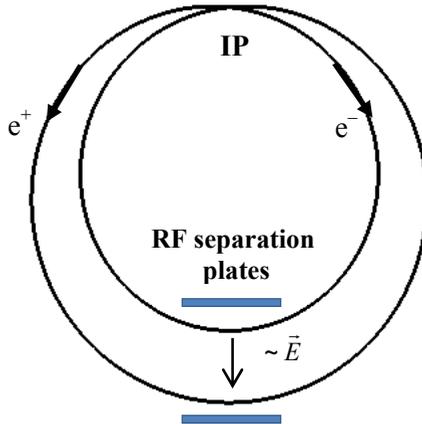


Рис. 1. Расположение на орбите эквивалентных точечных корректоров.

Необходимым условием работоспособности метода является ограничение на число встречных сгустков: один электронный и один позитронный. Иначе, встречи будут происходить не только на азимуте IP. Кроме того, при инжекции требуется обеспечить определенный фазовый сдвиг между сгустками с тем, чтобы они попадали на разные петли орбиты - “улитки” и пере-

секали азимут положения пластин одновременно. Еще одно важное условие будет пояснено ниже. Оно заключается в необходимости настроить частоту радиальных бетатронных колебаний близко к полуцелым значениям в единицах частоты обращения.

2. Расчёт и свойства ВЧ разведения

Наиболее просто рассчитать разведение пучков в рассматриваемом методе можно, применяя известную формулу для искажений замкнутой орбиты точечным корректором, но учитывая при этом факт замыкания орбиты через два оборота. На рис. 2 изображено расположение точечных корректоров, эквивалентных по своему действию пластинам ВЧ разведения.

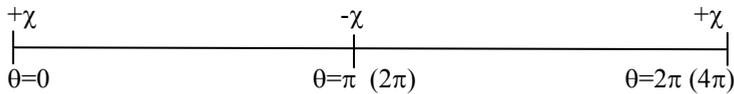


Рис. 2. Расположение на орбите эквивалентных точечных корректоров.

Здесь χ – угол отклонения; в скобках указано значение азимута, отвечающего случаю однооборотной орбиты. Искажение радиальной однооборотной орбиты X на азимуте θ_2 от действия одиночного стационарного корректора на азимуте θ_1 рассчитывается как

$$X(\theta_1, \theta_2) = \frac{\chi}{2 \sin \pi v_x} \cdot \sqrt{\beta_{x1} \beta_{x2}} \cdot \cos v_x (\pi - |\Phi_1 - \Phi_2|),$$

где β_{x1} , β_{x2} – значения амплитудной функции β_x на указанных азимутах; v_x – частота радиальных бетатронных колебаний в единицах частоты обращения;

фаза колебаний $\Phi(\theta) = \int_0^\theta \frac{R d\theta}{v_x \beta_x}$, R – средний радиус накопителя-

коллайдера. Легко видеть, что в рассматриваемом случае, в котором действуют два одинаковых по силе, но разных по знаку точечных корректора на азимутах $\theta = 0$ и $\theta = \pi$ двухоборотной орбиты, а искажение ищется на азимуте пластин $\theta = 2\pi$ (бета функция на всех трех азимутах одинаковая и равна β), соответствующая формула примет вид:

$$\begin{aligned} X &= \frac{\chi \beta}{2 \sin 2\pi v_x} \cdot [\cos 2v_x (\pi - |2\pi - 0|) - \cos 2v_x (\pi - |2\pi - \pi|)] \\ &= \frac{\chi \beta}{2 \sin 2\pi v_x} \cdot (\cos 2\pi v_x - 1), \end{aligned}$$

Из полученной формулы следует, что при $v_x \rightarrow k$, k - целое, $X \rightarrow 0$.

Вблизи полужелтых значений бетатронной частоты: $v_x = \frac{2k+1}{2} + \varepsilon$, $\varepsilon \ll 1$,

отклонение $X \approx -\frac{\chi\beta}{2\pi\varepsilon}$ может быть достаточно велико. Становится очевид-

ным еще одно условие, при выполнении которого обсуждаемый метод особенно эффективен: близость радиальной бетатронной частоты к полужелтым значениям. Отстройка ε от полужелтого значения ограничена проявлением параметрических резонансов в магнитной системе ускорителя. На ВЭПП-4М рабочая частота может достигать значения $v_x = 8.53$, что практически является достаточным для решения поставленной задачи. Пример: энергия

пучка 1.85 ГэВ; $v_x = 8.53$; $\beta = 1050$ см; $\chi = \frac{U \cdot L}{300 \cdot d \cdot H\rho} = 9.6 \cdot 10^{-5}$ рад

($H\rho = 6167$ кгс·см – магнитная “жесткость” синхротрона на указанной энергии); длина пластин $L = 117$ см; зазор между пластинами $d = 8$ см; амплитуда напряжения между пластинами $U = 6$ кВ; разведение орбит $2X = 5.7$ мм.

Необходимо ответить на вопрос, изменится ли энергия, а с ней и спиновая частота сгустков при включении ВЧ разведения относительно исходной в линейном приближении для разложения ведущего магнитного поля вблизи равновесной орбиты? Как известно, изменение кривизны δK плоской замкнутой орбиты общей невозмущенной длиной L формально отвечает изменению этой длины на величину циклического интеграла по продольной координате

$$\oint Kx ds = \int_0^{2L} Kx ds = \int_0^{2L} \delta K \eta_x ds,$$

где x – радиальное искажение орбиты, связанное с δK ; η_x – периодическая дисперсионная функция; в верхнем пределе интегралов ($2L$) учтено, что орбита замыкается через два оборота. Так как длина электронной орбиты в накопителе задается частотой ускоряющих резонаторов, то данное “мнимое” возмущение длины за счёт автофазировки компенсируется приращением энергии:

$$\Delta L = \int_0^{2L} \delta K \eta_x ds + 2\alpha L \cdot \frac{\Delta E}{E} = 0,$$

где $\alpha = \langle K \eta_x \rangle$ – коэффициент уплотнения орбиты. Отсюда следует известная формула для относительного приращения энергии из-за радиальных искажений орбиты ($\langle \dots \rangle$ усреднение вдоль орбиты):

$$\frac{\Delta E}{E} = -\frac{1}{\alpha} \langle \delta K \eta_x \rangle = -\frac{\langle \delta K \eta_x \rangle}{\langle K \eta_x \rangle}.$$

В описываемом случае последнее уравнение примет вид

$$\frac{\Delta E}{E} = -\frac{1}{2\alpha L} (\chi \eta_x - \chi \eta_x) \equiv 0,$$

что и требовалось доказать.

Изменение средней по пучку частоты спиновой прецессии, которое, как и изменение средней энергии, выражается через интеграл возмущающих поперечных полей – вертикального магнитного и радиального электрического, также равно нулю. Таким образом, в линейном приближении схема ВЧ разведения обеспечивает отсутствие сдвига спиновой частоты у электронов и позитронов по сравнению со случаем, когда эта система выключена. Это важно с точки зрения предварительной калибровки энергии частиц с целью определения верхней и нижней границ весьма узкого в СРТ-эксперименте диапазона сканирования частоты деполяризатора [1–3].

3. Фазовая симметрия

Совпадение орбит электронов и позитронов зависит от того, насколько одинаковые углы отклонения они приобретают в результате пролета пластин с ВЧ полем. Рассмотрим вопрос о фазовой симметрии пролета участка пластин разноименными сгустками. Пусть φ_0 – фаза ВЧ напряжения $\propto \cos \varphi_0$ на пластинах в момент времени пересечения сгустками паразитного места встречи. Обозначим через $\delta\varphi/2$ поправку к φ_0 из-за несовпадения середины указанного участка орбиты с азимутом встречи, а через $\Delta\varphi$ – протяженность этого участка по фазе ВЧ. Тогда начальная и конечная фазы пролета пластин для электронов могут быть записаны соответственно как

$$\varphi_{1e} = \varphi_0 - \frac{\Delta\varphi + \delta\varphi}{2},$$

$$\varphi_{2e} = \varphi_0 + \frac{\Delta\varphi - \delta\varphi}{2},$$

а для позитронов:

$$\varphi_{1p} = \varphi_0 - \frac{\Delta\varphi - \delta\varphi}{2},$$

$$\varphi_{2p} = \varphi_0 + \frac{\Delta\varphi + \delta\varphi}{2}.$$

Угол отклонения частиц полем пластин равен $\chi \propto \int \cos \varphi \, d\varphi$, где интеграл берется в указанных пределах. Так как возмущения фазы малы, углы отклонения запишем в виде

$$\chi_e \propto \Delta\varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \left[1 - \frac{1}{24}(\Delta\varphi)^2 - \frac{1}{8}(\delta\varphi)^2 \right] - \frac{1}{2} \Delta\varphi \cdot \delta\varphi \cdot \sin \varphi_0 ,$$

$$\chi_p \propto \Delta\varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \left[1 - \frac{1}{24}(\Delta\varphi)^2 - \frac{1}{8}(\delta\varphi)^2 \right] + \frac{1}{2} \Delta\varphi \cdot \delta\varphi \cdot \sin \varphi_0 .$$

Разница углов отклонения позитронов и электронов составит $\delta\chi_e = \chi_p - \chi_e \propto \Delta\varphi \cdot \delta\varphi \cdot \sin \varphi_0$.

Отсюда можно найти относительное, между электронами и позитронами, расхождение в величине искажений орбиты, создаваемых полем системы ВЧ разведения:

$$\left| \frac{\delta X}{X} \right| \sim \sin \varphi_0 \cdot \delta\varphi .$$

Из опыта настройки азимутального положения минимума вертикальной бета-функции в основном месте встречи (в детекторе КЕДР) по наблюдениям за изменением светимости известно, что неопределённость этого положения составляет порядка 1 см. На этом основании примем, что погрешность $\delta\varphi$ отвечает смещению середины ВЧ пластин относительно азимута паразитного места встречи на 1 см. При длине волны ВЧ разведения $\Lambda = 7.3 \cdot 10^4$ см имеем $\delta\varphi \sim 10^{-5}$. Фаза φ_0 очевидным образом выбирается близкой к нулю. Для грубой оценки положим $\varphi_0 = 10^\circ$. Вместе с определением $\delta\varphi$ это дает $|\delta X/X| \sim 1.7 \cdot 10^{-6}$, или $|\delta X| \sim 5 \cdot 10^{-6}$ мм при $|X| = 3$ мм. Характерный горизонтальный размер пучка σ_x на энергии 1.8 ГэВ в среднем составляет около 500 мкм, поэтому указанная разница орбит $\approx 10^{-5} \cdot \sigma_x$. Квадратичная нелинейность поля накопителя (H'') приводит к сдвигу и разбросу спиновых частот в пучке (ν), которые по порядку величины пропорциональны среднему квадрату его горизонтального размера: $(\delta\nu/\nu)_{\text{nonlin}} \approx \langle H'' \sigma_x^2 \rangle$. На ВЭПП-4М соответствующие сдвиг и разброс спиновой частоты оцениваются как $(\delta\nu/\nu)_{\text{nonlin}} \sim 5 \cdot 10^{-7}$ [4]. В итоге получим оценку для разницы в сдвиге частоты между электронами и позитронами с учётом нелинейности поля ВЭПП-4М и фазовой асимметрии ВЧ разведения:

$$\delta \left(\frac{\delta\nu}{\nu} \right) \sim 2 \left(\frac{\delta\nu}{\nu} \right)_{\text{nonlin}} \cdot \left| \frac{\delta X}{X} \right| \sim 5 \cdot 10^{-12} .$$

Ещё один источник сдвига спиновой частоты связан с конечным углом (ζ) разворота пластин ВЧ разведения как единого целого вокруг продольной оси симметрии из-за погрешности изготовления соответствующего участка вакуумной камеры. Этот разворот приводит к отклонению траектории частиц в вертикальной плоскости. Из аналогии с движением в горизонтальной плоскости следует, что орбита, сформированная под действием комбинированного (радиального и вертикального) электрического поля ВЧ разведения,

и в этом случае замыкается через два оборота. При строгой фазовой симметрии она является единой для электронов и позитронов. Вертикальные искажения орбиты ведут к сдвигу спиновой частоты, квадратичному по величине искажений [5]. В отличие от рассмотренного случая горизонтальных искажений этот сдвиг не равен нулю. Знак сдвига частоты для электронов и позитронов одинаков. Разница в величине сдвига между частицами возможна за счёт описанной выше фазовой асимметрии, но теперь без привлечения нелинейности поля. Пусть угол разворота $\zeta \sim 10^\circ$. Вертикальные искажения по порядку величины составят

$$Y = X\zeta \frac{\beta_y \sin 2\pi\nu_x}{\beta_x \sin 2\pi\nu_y} \sim 0.1 \text{ мм},$$

$\beta_y/\beta_x = 300/1050$ – отношение вертикальной и горизонтальной бета-функций в паразитном IP; $\nu_y \approx 7.58$ – число вертикальных бетатронных колебаний на одном обороте. Расхождение орбит по вертикали из-за фазовой асимметрии $|\delta Y/Y| = |\delta X/X| \sim 1.7 \cdot 10^{-6}$. Оценим разницу относительных сдвигов частот как

$$\delta\left(\frac{\delta\nu}{\nu}\right) \sim 2\left(\frac{\delta\nu}{\nu}\right)_V \cdot \left|\frac{\delta Y}{Y}\right|,$$

где $(\delta\nu/\nu)_V$ – сдвиг частоты из-за вызванных ВЧ разведением вертикальных искажений замкнутой орбиты величиной Y , который надо каким-то образом определить, чтобы сделать интересующую нас оценку. С этой целью представим интересующие нас искажения двухоборотной орбиты в виде последовательности $4\nu_y$ полуволновых вертикальных бампов амплитудой Y . В этой модели сдвиг частоты рассчитывается по мнимому эффекту удлинения орбиты:

$$\left(\frac{\delta\nu}{\nu}\right)_V \sim \frac{\pi\nu_y^2}{\alpha\Pi\beta_y} Y^2 \approx 6 \cdot 10^{-8}$$

Здесь $\alpha = 0.017$ – коэффициент уплотнения орбит; $\Pi = 366 \text{ м}$ – периметр ВЭПП-4М; $\beta_y = 500 \text{ см}$ – характерное значение вертикальной бета-функции. Отсюда

$$\delta\left(\frac{\delta\nu}{\nu}\right) \sim 2 \cdot 10^{-12}.$$

В СРТ-эксперименте требуется достичь точности сравнения спиновых частот электрона и позитрона лучше 10^{-8} . Проведенные оценки и рассуждения говорят о том, что влиянием погрешностей ВЧ разведения на точность эксперимента можно пренебречь.

4. Полный расчет двухоборотной орбиты

На рис. 3. представлена азимутальная зависимость радиальных отклонений замкнутой орбиты для ВЧ разведения, рассчитанная матричным способом для магнитной структуры ВЭПП-4М, близкой к реальной. Как и ожидалось, представление двухоборотной орбиты в виде двух петель, пересекающихся только в основном месте встречи (рис. 3), сильно идеализировано. Внутренняя и внешняя петли в действительности пересекаются из-за колебательного характера возмущений.

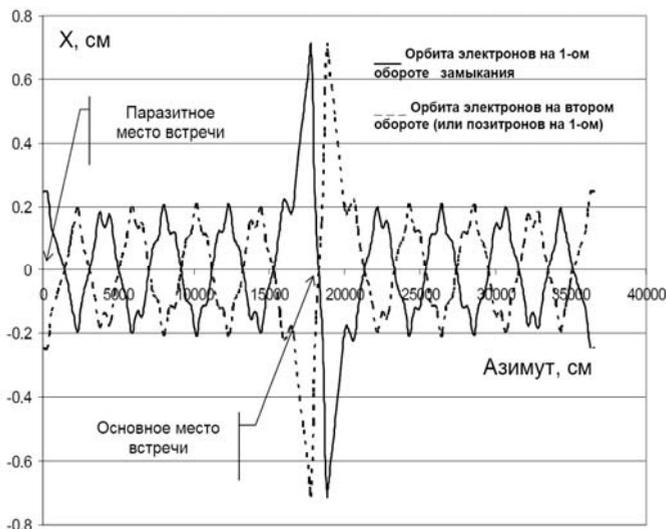


Рис. 3. Расчетная орбита при ВЧ разведении как функция азимута. $E = 1.85$ ГэВ; амплитуда напряжения на пластинах 5 кВ; разведение орбит в центре технического промежутка 5 мм.

Но в главном, действительная картина не противоречит упрощенной схеме на рис. 1 при соблюдении указанных выше фазовых условий. Определение двухоборотной орбиты предполагает существование двух её сохраняющихся “петель”, или частей, каждая из которых переходит в другую через один оборот на любом наперед заданном азимуте накопителя. Таким образом, двухпетельная модель “Улитка” всегда справедлива в отношении произвольно выбранного азимута (в нашем случае – это основное место встречи), если решать задачу о разведении сгустков на противоположном азимуте. Кроме того, с помощью такой модели из-за её наглядности легко прийти к выводу, что невозможно инжектировать дополнительные пары встречных сгустков с условием, что нет взаимных пересечений встречных сгустков из разных пар на других азимутах.

5. Эффекты встречи

Минимальная конфигурация СРТ эксперимента без разведения пучков предполагает использование одного сгустка электронов и одного – позитронов, которые встречаются на двух противоположных азимутах накопителя. Места встреч “подобны”, если одинаковы отношения радиальной и вертикальной бета-функций (β_x/β_y), а также радиального размера пучка, определяемого относительным разбросом энергии (σ_E) и дисперсией (η_x) в месте встречи, к радиальному бетатронному размеру ($\eta_x\sigma_E/\sigma_{x\beta}$ – параметр монохроматизации). Это означает, что линейные сдвиги бетатронных частот в двух местах встречи будут одинаковыми. В условиях “подобия” критический ток падает в отсутствие разведения орбит примерно в два раза по сравнению со случаем, когда в одном из указанных мест они разведены. На ВЭПП-4М это соответствовало бы падению критического тока с 3 мА до 1.5 мА на энергии 1.85 ГэВ. Но на ВЭПП-4М условия “подобия” не выполнены (см. таб. 1). Согласно проведенному эксперименту выключение электростатического разведения в техническом промежутке приводит к тому, что пучок раздувается по вертикали уже при токе встречного сгустка 0.35 мА, а при токе 0.5 мА его время жизни неприемлемо сокращается. Такое сильное уменьшение рабочих токов делает невозможным проведение эксперимента по прецизионному сравнению частот спиновой прецессии электронов и позитронов без принятия особых мер, поскольку в нем применяется тушековский поляриметр [6], эффективность которого квадратично падает с током.

Таблица 1. Структурные функции и параметр монохроматизации в основном и паразитном местах встречи ВЭПП-4М

Место встречи	β_{x2} , см	β_{y2} , см	η_{x2} , см	β_x/β_y	$\eta_x\sigma_E/\sigma_{x\beta}$
Детектор КЕДР	75	5	80	15	1.9
Техн. промежуток	1050	300	-145	3.5	0.9

Проведено численное моделирование эффектов встречи с помощью кода Lifetrac [7]. Оно позволило оценить необходимую величину ВЧ разведения для решения проблемы критического тока в СРТ эксперименте. Орбиты электронного и позитронного сгустков сведены в основном в месте встречи IP и разведены – в паразитном. На рис. 4 показано равновесное распределение частиц в плоскости нормализованных бетатронных амплитуд, в зависимости от разведения пучков в техническом промежутке указанного в единицах характерного размера пучка по горизонтали. $E = 1.85$ ГэВ; ток пучков 2.5 мА. Распределение резко сжимается до приемлемых размеров при разведении в семь “сигм”, что отвечает величине $2X = 7\sigma_x = 4.8$ мм.

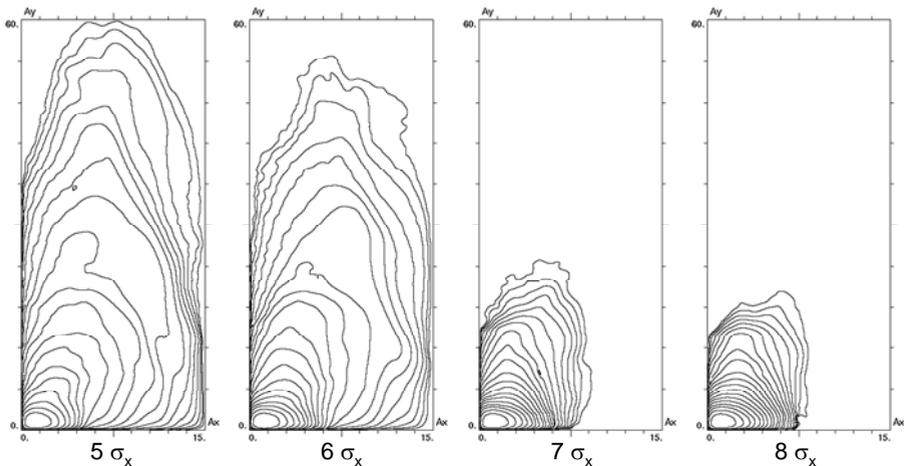


Рис. 4. Равновесное распределение в плоскости нормализованных бетатронных амплитуд, в зависимости от разведения пучков в техническом промежутке. Шкала по горизонтали: $[0, 15]$, по вертикали: $[0, 40]$. Показаны линии уровня (линии равной плотности); между соседними линиями плотность падает в e раз.

6. Электрическая блок-схема

Система ВЧ разведения включает в себя делитель частоты, управляемый амплитудно-фазовый модулятор, усилитель мощности на 200 Вт, резонансный контур, подключенный к двум отклоняющим по горизонтали пластинам длиной 130 см внутри вакуумной камеры в центре технического промежутка (рис. 5 и рис. 6) Схема содержит две петли авторегулирования – по амплитуде и фазе. Основные функции управления выполняются блоком фазовращателя и амплитудного модулятора. Он предназначен для вырабатывания синусоидального сигнала возбуждения частотой 409 кГц, что соответствует половине частоты обращения в ВЭПП-4. Фаза и амплитуда сигнала могут регулироваться в широких пределах. По амплитуде регулировка соответствует изменению напряжения от 0 до 10 кВ на зазоре отклоняющих пластин, по фазе – 480° на частоте обращения. Управление этими параметрами возможно в как ручном режиме при отладке, так и от ЭВМ, через ЦАП.

Конструктивно в резонансный контур помимо отклоняющих пластин и основных элементов колебательного контура (катушки и регулируемой емкости) входят также балластные устройства. Последние располагаются на выводах отклоняющих пластин и содержат резисторы, которые необходимы для подавления высокочастотных колебаний на пластинах, которые могут возбуждаться пролетающими сгустками заряженных частиц. Конденсаторы

100 пФ, расположенные в каждой коробке узла балласта являются как элементами колебательного контура 409 кГц, так и блокировочными деталями на высоких частотах. Для выделения коротких импульсов от пролетающих пучков, последовательно с этими конденсаторами поставлены резисторы 1 Ом. Такая схема позволяет одновременно наблюдать с помощью осциллографа сигнал с катушки возбуждения и импульсы от пролетающих пучков. На контрольные выходы сигнал 409 кГц подается через RC-дифференцирующие цепочки, что ведет к сдвигу его фазы на 90°. Между тем импульсы от пучка приходят без сдвига по времени. В результате, при настройке системы на максимум напряжения в момент пролета частиц на контрольных выходах сигнал от пучка виден в районе перехода синусоиды 409 кГц через нуль.

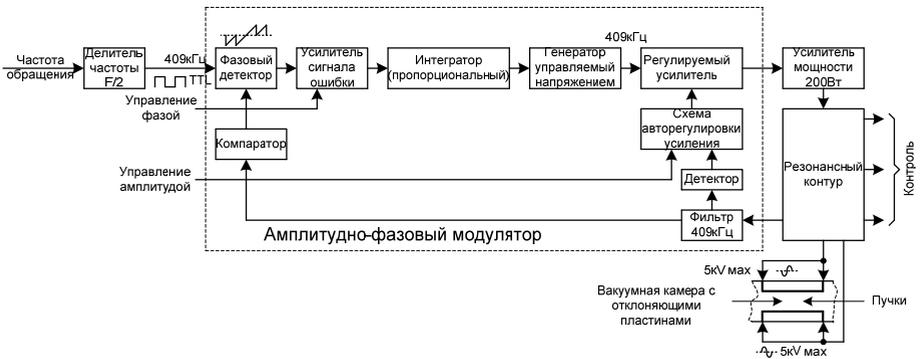


Рис.5. Блок-схема устройства разведения пучков.

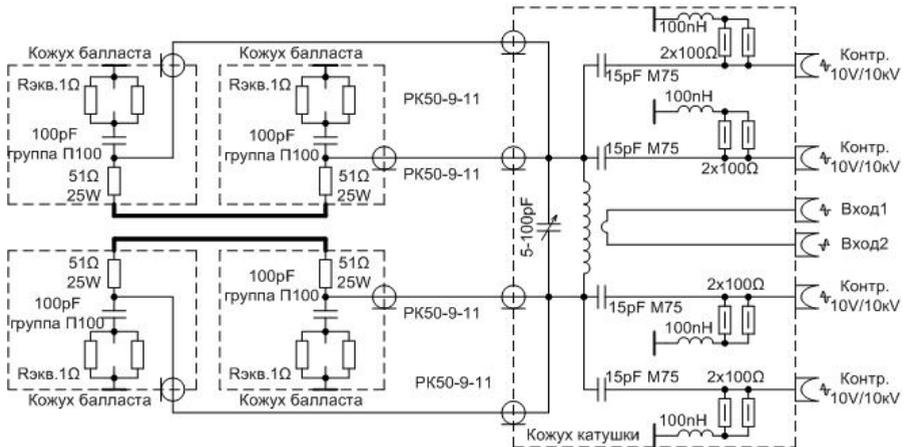


Рис. 6. Блок-схема резонансного контура.

7. Конструкция колебательного контура

Катушка колебательного контура с резонансной частотой 409.5 кГц с индуктивностью 0.5 мГн выполнена на керамическом патрубке Ø225 мм с толщиной стенок 10 мм (см. рис. 7). Поверхность, на которую намотаны витки катушки, хорошо отшлифована. На краях цилиндра симметрично проделаны отверстия Ø 4.5 мм для закрепления выводов катушки. Для намотки использован термостойкий провод ПЭВТ-2 Ø2.44 мм повышенной электрической прочности (5 кВ). Шаг намотки 3 мм. Число витков 60. Длина намотки 180 мм. Согласно техническому заданию намотка выполнена с натяжением 31 кГ для обеспечения остаточной упругости провода. С этой целью применена кинематическая схема из 3-х блоков. Для надежного закрепления витков на поверхности керамического цилиндра катушка дважды, с перерывом во времени 2 часа, покрывалась с помощью краскопульта специальным термостойким лаком. Последующие термические испытания катушки на постоянном токе с подачей сжатого воздуха для её охлаждения показали, что в области рабочих температур 60 – 70 °С подвижка витков не происходит. При использовании системы ВЧ разведения в пучковых экспериментах в конце 2012 – начале 2013 гг. максимальное напряжение в контуре достигало 10 кВ.



Рис. 7. Вид катушки, помещённой внутрь блока резонансного контура со снятым и не показанным кожухом воздушного охлаждения. Кожух охватывает катушку с зазором 4 мм для обдувания витков сжатым воздухом, поступающим через торцевое сопло (расход 30 л/сек). Вверху блока находится механически регулируемая емкость контура величиной 300 пкФ.

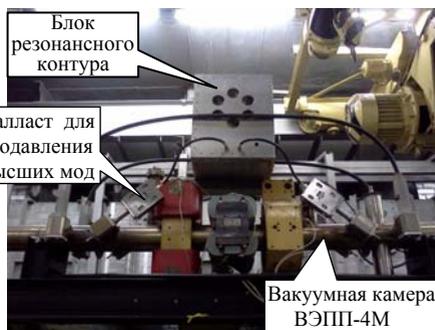


Рис. 8. Размещение блока ВЧ разведения орбит на ВЭПП-4М.

Замечаний к катушке не выявлено. Блок резонансного контура смонтирован на вакуумной камере ВЭПП-4М на участке расположения пластин разведения в центре технического промежутка (рис. 8).

8. Экспериментальные результаты

В конце 2012 – начале 2013 гг. были проведены несколько пучковых экспериментов с целью проверки метода ВЧ разведения орбит. Наблюдение за орбитами осуществлялось по изображению пучка в поперечном сечении на мониторах синхротронного излучения (СИ) и системой из двух пикап-станций, измеряющих положение сгустков за один пролет.

В эксперименте с одним циркулирующим электронным сгустком в кольце ВЭПП-4М было установлено, что возникающее возмущение орбиты при включении ВЧ разведения соответствует расчёту. Фаза ВЧ разведения настраивалась на максимум напряжения на пластинах в момент прохождения сгустка. Результат эксперимента проиллюстрирован на рис. 9 данными монитора СИ. Монитор работает в непрерывном режиме, поэтому орбита, замы-



Рис. 9. Изображение электронного сгустка с энергией 1.85 ГэВ на мониторе СИ при амплитуде напряжения на пластинах ВЧ разведения около 6.5 кВ, Радиальная бетатронная частота $Q_x = 0.53$. Между положениями орбиты сгустка около 7 мм (на азимуте монитора $\beta_x = 1200$ см).



Рис. 10. Наблюдение двух электронных банчей по СИ, отстоящих друг от друга на пол-оборота в кольце ВЭПП-4М, при включенной системе ВЧ разведения. Один из банчей проходит пластины разведения в максимуме ВЧ напряжения, другой - при нулевом напряжении. В результате на экране СИ-монитора этот пучок отображается в двух своих крайних положениях, а второй находится в центре. Частоты бетатронных колебаний: $Q_x = 0.535$, $Q_y = 0.584$.

кающаяся через два оборота, представлена двумя изображениями одного и того же сгустка. Согласно расчёту, на азимуте положения монитора радиальное искажение орбиты поперечным ВЧ полем, определяемое через расстояние между этими изображениями, близко к максимальному в полукольцах.

Подобный эксперимент был проведен также с двумя электронными сгустками, разнесенными по фазе на пол-оборота. Если фазы ВЧ в моменты прохождения первым и вторым сгустками азимута с пластинами отвечают одинаковым напряжениям (в данном случае это $\sqrt{2}/2$ от амплитудного значения), то сгустки должны двигаться по одной и той же двухоборотной орбите, а их изображения на экране монитора СИ должны совпадать. На рис. 11 приведены данные о горизонтальном положении каждого из сгустков, измеренные одним из “быстрых” пикапов. Эти данные представляют собой массив из 8000 измерений с прореживанием во времени, полученных в течение 20 мсек. Распределение по x -координате вследствие эффекта двухоборотной орбиты показывает наличие двух пиков для каждого сгустка. Уширение пиков порядка 100 мкм вызвано пульсациями ведущего поля. Соответствующие пики сгустков немного отличаются по средним положениям из-за не совсем точной настройки фазы ВЧ сигнала на пластинах.

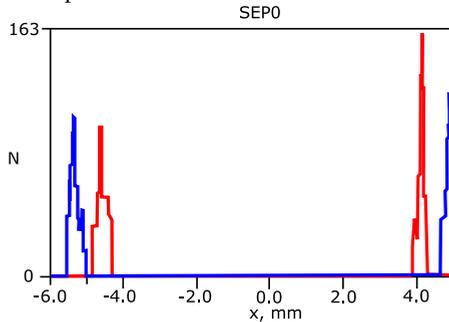


Рис. 11. Измеренное распределение положения двухоборотной орбиты по горизонтали в эксперименте с двумя электронными сгустками ($\beta_x = 4200$ см на азимуте пикапа SEP0). Расстояние между крайними положениями орбиты 10.2 мм. По расчёту при $U = 5.4$ кВ это отвечает разведению: на азимуте монитора СИ ($\beta_x = 1200$ см) 5.5 мм, в паразитном месте встрече ($\beta_x = 1050$ см) – 5.1 мм.

В случае, когда один из сгустков проходит пластины при нулевом напряжении, а другой – при максимальном, расщепление изображений принимает вид, как на рис. 10. В одном из экспериментов с такими условиями оба сгустка были инжектированы поляризованными по спину. Это позволило прецизионно сравнить абсолютные энергии сгустка в состояниях двухоборотной и однооборотной орбиты с помощью метода резонансной деполяризации. Энергии совпали с точностью 10^{-6} в согласии со сделанным выше

выводом. При произвольной настройке фазы ВЧ разведения количество изображений равно четырём.

Наиболее важный эксперимент был проведен со встречными пучками. Электронный сгусток с током 2.5 мА, что близко к критическому значению по эффектам встречи, и позитронный сгусток с током 0.14 мА были разведены с помощью ВЧ системы в паразитном месте встречи, а с помощью обычной электростатической системы – в основном месте встречи. При этом время жизни пучков было приемлемое. При токах 1.1 мА (электроны) и 0.3 мА (позитроны) эффекты встречи никак не проявились, хотя электростатическая система разведения в отличие от ВЧ системы была полностью выключена (рис. 12).



Рис. 12. Изображения 1.1 мА пучка электронов (слева) и 0.3 мА пучка позитронов (справа) на мониторах СИ при включенном ВЧ разведении с амплитудой напряжения на пластинах 6.5 кВ. Система электростатического разведения полностью выключена.

В дальнейших экспериментах мы планируем оптимизировать режим встречных пучков с ВЧ разведением, в частности, за счёт настройки рабочей точки по бетатронным частотам, и приступить к прецизионному сравнению спиновых частот электронов и позитронов в созданных новых условиях, обеспечивающих минимальную систематическую ошибку.

Литература

- [1] O. Anchugov, et al. Record-high resolution experiments on comparison of spin precession frequencies of electron bunches using the resonant depolarization technique in the storage ring. // Proc. Of EPAC 2006, p. 2787.
- [2] V. Blinov et al. Study of the Possibility of Increasing the Accuracy of CPT Invariance Test at Electron-Positron Storage Rings. // ICFA Beam Dynamics Newsletter, No.48, April 2009, 207-217.
- [3] O. Anchugov, et al. // JETP, 2009, Vol. 109, No. 4, p. 590-601.
- [4] С.А. Никитин. Расчёт деполяризатора с поперечным полем для прецизионных экспериментов на ВЭПП-4М. // Препринт ИЯФ 2005-54 (<http://www.inp.nsk.su/publications>).
- [5] A.V. Bogomyagkov, S.A. Nikitin, A.G. Shamov. Influence of the vertical closed orbits distortions on accuracy of the energy calibration done by resonant depolarization technique. // Proc. Of RUPAC 2006, p.153.
- [6] V.E. Blinov, et al. Review of beam energy measurements at VEPP-4M collider .KEDR/VEPP-4M. // NIM(A) 598 (2009) 23.
- [7] D. Shatilov. Beam-Beam Simulations at Large Amplitudes and Lifetime Determination. // Part. Accel. 52, p. 65, 1996.

В.Е. Блинов, Е.А. Бехтенёв, О.П.Гордеев, А.И.Жмака,
С.А.Крутихин, В.А.Киселев, , Г.Я.Куркин, Е.Б.Левичев,
О.И.Мешков, А.И.Микайылов, В.В.Нейфельд, С.А.Никитин,
И.Б.Николаев, Г.М.Тумайкин, А.П.Чабанов, Д.Н.Шатилов

**Система ВЧ разведения
электронного и позитронного пучков
на ВЭПП-4М**

V.E. Blinov, E.A. Bekhtenev, A.P. Chabanov , O.P. Gordeev,
S.A. Krutikhin, V.A. Kiselev, G.Ya. Kurkin, E.B. Levichev,
O.I. Meshkov, A.I. Mikaiylov, V.V. Neifeld, S.A. Nikitin,
I.B. Nikolaev, D.N. Shatilov G.M. Tumaikin, A.I. Zhmaka

**RF system for electron and positron beams orbit separation
at VEPP-4M**

ИЯФ 2013-12

Ответственный за выпуск А.В. Васильев

Работа поступила 18.06. 2013 г.

Сдано в набор 21.06. 2013 г.

Подписано в печать 21.06. 2013 г.

Формат 60х90 1/16 Объем 1,1 печ.л., 0,9 уч.-изд.л.

Тираж 95 экз. Бесплатно. Заказ № 12

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11