

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Бояркина Вероника Евгеньевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

“Измерение синхротронной частоты коллайдера ВЭПП-4М”

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20302

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. О.И. Мешков

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к. т. н. В.Т. Астрелин

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к. т. н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация

Целью данной работы являлось знакомство с принципами работы циклических ускорителей, в частности ускорительного комплекса ВЭПП-4М, изучение зависимости частоты синхротронных колебаний от ускоряющего напряжения на установке ВЭПП-4М путём резонансной раскачки и измерение синхротронной частоты коллайдера с использованием электронно-оптического диссектора. Для этого была изучена теория работы циклических ускорителей, проведены измерения и сравнение полученных данных с теоретическим значением. Данный метод может использоваться для проверки точности калибровки измерения напряжения на ускоряющих резонаторах ВЧ системы ВЭПП-4М.

Ключевые слова: ВЭПП-4М, синхротронные колебания, режим автофазировки.

Оглавление

Оглавление	3
1 Введение	4
2 Описание эксперимента.....	4
2.1 Описание установки	4
2.2 Режим ускорения частиц. Режим автофазировки. Синхротронные колебания	5
2.3 Методика измерений	9
3 Результаты измерений	11
4 Вывод и заключение	13
Список литературы	14

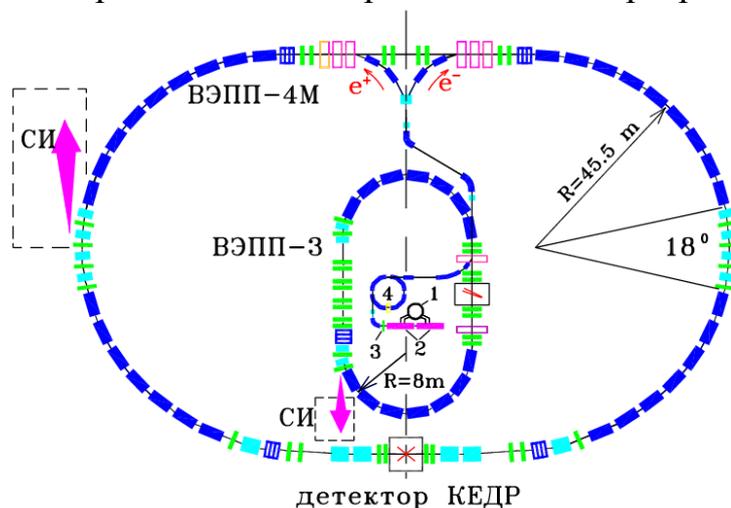
1 Введение

В своем стремительном развитии ускорительная техника прошла путь от опытов по рассеянию альфа-частиц из радиоактивного источника на мишени Эрнеста Резерфорда, 800-киловольтного генератор постоянного напряжения, сконструированного в 1932 году Джоном Кокрофтом и Эрнестом Уолтоном до разнообразных гигантских сооружений, ускоряющих частицы до нескольких десятков миллиардов электрон-вольт. В различных странах сооружены крупные ускорители, на базе которых созданы лаборатории и институты с большим коллективом физиков и инженеров, которые пытаются понять тайну зарождения вселенной.

2 Описание эксперимента

2.1 Описание установки

Ускорительный комплекс ВЭПП-4М создан для работы в области ядерной физики, проведения экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками, исследований с использованием синхротронного излучения. Комплекс ВЭПП-4 состоит из линейного ускорителя (энергия пучка – до 50 МэВ), бустерного синхротрона Б-4 (350 МэВ), накопителя ВЭПП-3 (до 2 ГэВ) и коллайдера ВЭПП-4М. А также универсального детектора КЕДР с магнитным полем до 1 Тл в объеме 21.6 м³, создаваемым сверхпроводящим соленоидом. Ускоряющей ВЧ системы и другого оборудования, необходимого для выполнения различных экспериментальных программ.



Основное назначение коллайдера ВЭПП-4М – экспериментальное исследование свойств элементарных частиц, параметров резонансных состояний и сечений процессов электрон-позитронной аннигиляции. Преимуществом ВЭПП-4М по сравнению с другими коллайдерами является возможность измерения энергии частиц методом резонансной деполяризации с относительной погрешностью 10^{-7} .

Кольцо ВЭПП-4М состоит из технического промежутка, двух полуколец и экспериментального промежутка. Магнитная структура ВЭПП-4М является зеркально-симметричной относительно оси, проходящей через центры

экспериментального и технического промежутков. Ускоряющая ВЧ система электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М работает на 222-ой гармонике частоты обращения. Для ускорения пучка до энергии 6 ГэВ и компенсации потерь энергии на синхротронное излучение в коллайдере ВЭПП-4М предусмотрено 6 ВЧ резонаторов. В 2000 – 2010 годах ВЧ система коллайдера ВЭПП-4М была укомплектована пятью ускоряющими резонаторами.

2.2 Режим ускорения частиц. Режим автофазировки. Синхротронные колебания

Движение частиц в ускорителе можно разбить на следующие три этапа:

- 1) Инжекция – впуск частиц и захват их в ускорительный режим.
- 2) Процесс ускорения (в одном из режимов резонансного или индукционного ускорения)
- 3) Вывод – смещение частиц на мишень или вывод их из установки наружу для проведения физических экспериментов.

В циклических ускорителях частицы совершают движение по орбитам в специальной вакуумной камере, помещённой в магнитное поле, и многократно проходят через ускоряющие электроды. Ускорение частиц проходит под действием высокочастотного электрического поля, приложенного к ускоряющим электродам.

В современных ускорителях осуществляется **резонансный режим ускорения**, при котором увеличение энергии происходит за счет высокочастотного ускоряющего напряжения (ВЧ) $V \cos \omega_0 t$. Резонансное условие заключается в том, что величина ω_0 равняется частоте обращения частицы, называемой равновесной частотой.

$$\omega_0 = q\omega_s$$

Где q это целое число, называемое кратностью ускорения.

(То есть синхротронной или равновесной частицей можно называть ту, частота обращения которой в каждый момент времени точно в целое число раз меньше высокой частоты ω_0)

Для поддержания данного условия в синхротроне влияние возрастания энергии равновесной частицы компенсируется за счет изменения магнитного поля. Резонансный режим ускорения основывается на так называемом **принципе автофазировки**, который был сформулирован В. И. Векслером (1944) и независимо Макмилланом (1945). Благодаря этому принципу резонансные ускорители имеют свойство автоматически исправлять положение частиц по отношению к правильной фазе ускоряющего напряжения.

Этот принцип кратко можно описать так: пучок электронов движется внутри вакуумной камеры. Орбита определяется движением равновесной частицы, обладающей равновесной энергией и фазой φ_s . Пусть существует частица, которая проходит ускоряющий промежуток в более ранней фазе φ_1 . Она приобретает большую энергию, чем равновесная. Ее период обращения становится больше равновесного. Таким образом частица как бы догонит

равновесную, и придет в ускоряющий промежуток в более близкой к φ_s фазе. Аналогичные рассуждения проводятся для частицы, проходящей ускоряющий промежуток немного позже равновесной частицы.

Для того что бы больше разобраться в режиме автофазировки, а также с таким явлением как синхротронные колебания рассмотрим фазовое уравнение, которое характеризует действие автофазировки на частицы:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{E_s d\varphi}{\omega_s^2 K dt} \right] = \frac{qeV}{2\pi} (\cos \varphi - \cos \varphi_s)$$

Где ω_s - частота обращения пучка по орбите,

φ_s - значение равновесной фазы,

φ - фаза частицы относительно в/ч поля,

K - коэффициент пространственного уплотнения орбит

$q=222$ кратность ускорения,

$\sin \varphi_s=0,0168$ пролётный фактор (возникает из-за изменения напряжения на резонаторе за время пролета пучка сквозь него)

V – ускоряющее напряжение,

E – энергия пучка.

Если параметры $\cos \varphi_s$, ω_s , и $K = -\frac{E_s}{\omega_s} \left(\frac{\partial \omega}{\partial E} \right)_s$ меняются достаточно медленно, то уравнение описывает некоторый колебательный процесс.

Объяснение режима автофазировки дает понять, что частицы движутся подобно механическому маятнику раскачиваясь то вперед, то назад относительно равновесной.

Таким образом происходит некоторый колебательный процесс, происходящий в потенциальной яме вида

$$W(\varphi) = -\frac{qeV}{2\pi} \int (\cos \varphi - \cos \varphi_s) d\varphi = -\frac{qeV}{2\pi} (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi_s)$$

В этом случае если момент инерции маятника, на который действует постоянный внешний момент сил (Рис 1), равен $M = \frac{E_s}{K\omega_s^2}$, момент сил тяжести $\frac{qeV}{2\pi} \cos \varphi$ и внешний момент $-\frac{qeV}{2\pi} \cos \varphi_s$, то уравнение движения маятника совпадает с фазовым уравнением. Таким образом мы можем пояснить действие режима автофазировки с помощью механической аналогии на примере движения маятника.

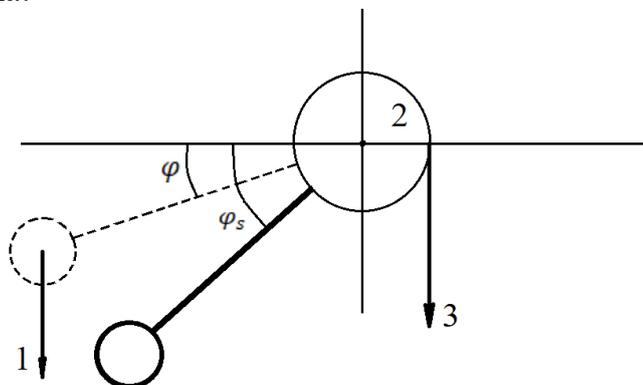


Рис.1 Маятник с внешним моментом сил, где: 1-сила тяжести
2-ось вращения, 3-внешняя сила

Рассмотрим возможные режимы колебания маятника. Его положение равновесия, очевидно, $\varphi = \varphi_s$. В нашем случае такой режим соответствует равновесному движению, синхронизированному с высокочастотным полем. Неравновесное движение характеризуется более или менее сильными отклонениями от точки $\varphi = \varphi_s$. На **рис. 2** представлен вид потенциальной ямы $W(\varphi)$, в которой происходит движение (при $M > 0$). Видно, что при не слишком больших отклонениях от φ_s , маятник испытывает колебания, и угол φ может меняться в конечных пределах. В ускорителях такие колебания фазы называют **синхротронными колебаниями**. Соответственно энергия испытывает некоторые колебания около равновесного значения и лишь в среднем по времени равна ему. Наконец при сильно не равновесном движении имеет место вращение, когда маятник всё время движется в одну сторону. Соответствующие частицы в ускорителе выпадают из синхронизма с высокочастотным полем и не могут ускоряться, а отклонение их энергии от равновесного значения непрерывно возрастает. Из сказанного ясно, что для успешного ускорения энергия и фаза частицы не должна слишком сильно отличаться от равновесного значения.

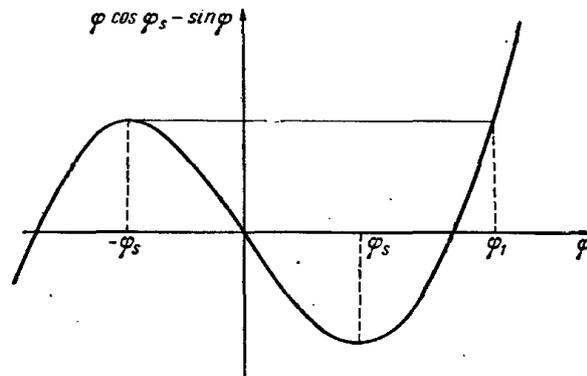


Рис. 2 Потенциальная яма $W(\varphi)$

Рассмотрим жесткость этих требований. Для этого воспользуемся методом фазовой плоскости (**Рис. 3**).

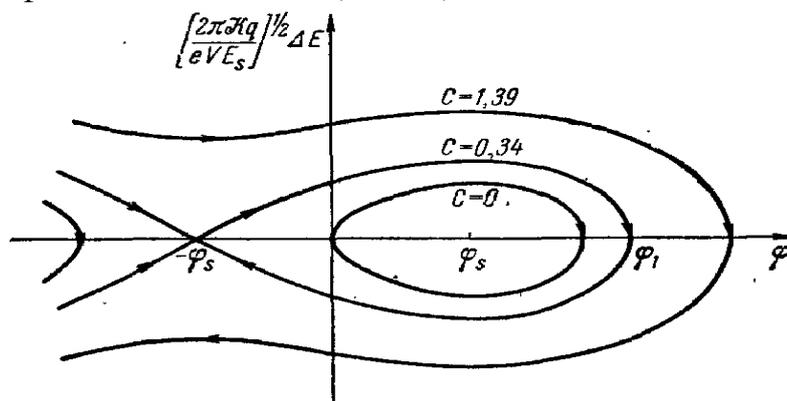


Рис.3 Фазовые траектории синхротронных колебаний $\cos \varphi_s = 0,5$.

Уравнение фазовых траекторий можно получить, взяв первый интеграл от уравнения синхротронных колебаний.

(Для этого умножим обе части на $d\varphi/dt$ и проинтегрируем по времени, учитывая соотношение: $\frac{d\varphi}{dt} = q(\omega_s - \omega) = q\omega_s K \frac{\Delta E}{E_s}$)

Получаем уравнение фазовых траекторий в виде:

$$\left(\frac{2\pi qK}{eE_s V}\right)^{1/2} \Delta E = \pm [2(C + \sin \varphi - \varphi \cos \varphi_s)]^{1/2}$$

Можно увидеть, что все возможные фазовые траектории делятся на две группы:

- финитные (замкнутые)
- инфинитные (незамкнутые).

Граница между ними является сепаратриса. Ее уравнение имеет вид уравнения фазовых траекторий при $C = C_c = \sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s$.

Действительно, движение по сепаратрисе соответствует колебаниям между точками φ_1 и $-\varphi_s$, которые являются точками поворота, то есть в них $\frac{d\varphi}{dt}$ и ΔE обращаются в ноль.

Правая точка поворота φ_1 удовлетворяет уравнению:

$$\sin \varphi_s + \sin \varphi_1 - (\varphi_s + \varphi_1) \cos \varphi_s = 0 \quad (\text{Отсюда получаем условие для } C).$$

Из общего уравнения фазовых траекторий видно, что максимального отклонения от равновесной энергии частица, движущуюся по сепаратрисе и проходящая через точку $\varphi = \varphi_s$. Это отклонение равно:

$$\Delta E_c = 2 \left[\frac{eV E_s (\sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s)}{2\pi qK} \right]^{1/2}$$

Оно имеет смысл максимально возможного разброса пучка, ускоряемого в режиме автофазировки.

Полная площадь внутри сепаратрисы является важной характеристикой ускорителей, так как косвенным образом характеризует число частиц, которые могут быть захвачены в режим ускорения.

Частицы, находясь внутри устойчивого фазового пространства, движутся по замкнутым фазовым траекториям, совершая синхротронные колебания. Зная уравнение фазовых траекторий, можно найти период этих колебаний. Согласно уравнению фазовых траекторий:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \pm \left[\frac{eV \omega_s^2 K}{\pi E_s} (C + \sin \varphi - \varphi \cos \varphi_s) \right]^{1/2}$$

и, следовательно, период синхротронных колебаний равен:

$$T_s = 2 \left[\frac{qeV \omega_s^2 K}{\pi E_s} \right]^{-1/2} \int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} [C + \sin \varphi - \varphi \cos \varphi_s]^{-1/2} d\varphi$$

Нетрудно видеть, что период синхротронных колебаний зависит от фазовой траектории, то есть от количества точек поворота φ_{max} и φ_{min} , определяемых константой C

$$C = -\sin \varphi_{min} + \varphi_{min} \cos \varphi_s = -\sin \varphi_{max} + \varphi_{max} \cos \varphi_s$$

В частости, для движения по сепаратрисе надо подставить сюда $\varphi_{min} = -\varphi_s$ и $\varphi_{max} = \varphi_1$. На нижнем пределе интеграл логарифмически расходится, значит период обращения по сепаратрисе бесконечно велик. Это легко понять, поскольку сепаратриса проходит через особую точку фазовой плоскости $\varphi = -\varphi_s, \Delta E = 0$. Вторая особая точка $\varphi = \varphi_s, \Delta E = 0$ является центром, около которого совершаются синхротронные колебания.

Уравнение малых синхротронных колебаний нетрудно получить, введя отклонение от устойчивой равновесной фазы

$$\eta = \varphi - \varphi_s \ll 1$$

Тогда из фазового уравнения получим:

$$\frac{d}{dt}(M\eta) + \frac{qeV}{2\pi} \sin \varphi_s \eta = 0, \quad M = \frac{E_s}{\omega_s^2 K}$$

То есть уравнение обычного гармонического осциллятора. И так, частота малых синхротронных колебаний равна:

$$\Omega = \left[\frac{qeV \sin \varphi_s}{2\pi M} \right]^{1/2} = \omega_s \left[\frac{qeVK \sin \varphi_s}{2\pi E_s} \right]^{1/2}$$

Можно заметить, что частота синхротронных колебаний примерно в $\sqrt{eV/E}$ раз меньше частоты обращения, то есть они действительно описывают медленное усредненное движение. Одному фазовому колебанию соответствует обычно сотни оборотов частицы.

2.3 Методика измерений

Электронно-оптическая хронография один из основных методов прямого измерения параметров быстропротекающих процессов в субнаносекундном временном диапазоне. Стробоскопический вариант метода используется для определения продольного размера пучка в циклических ускорителях.

В данной работе для измерения параметров пучка использовался **электронно-оптический диссектор** (ЭОП диссектор), предназначенный для регистрации периодических сигналов, например вспышек синхротронного излучения пучка в циклическом ускорителе. (На ВЭПП-4М используется модель ЛИ-602 (**Рис.4**) с временным разрешением ПШПВ $\approx 20 \div 30$ пс)

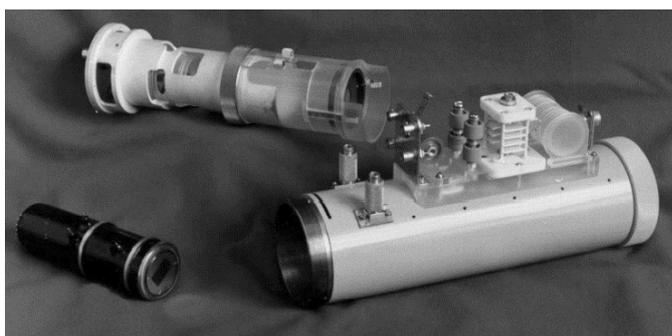


Рис.4 Внешний вид электронно-оптического диссектора ЛИ-602

Рассмотрим принцип работы прибора.

Фотоны попадают на фотокатод и выбивают из него электроны. Они в свою очередь проходят через фокусирующий электрод и отклоняющие пластины и попадают на диафрагму с узкой щелью (~ 40 мкм), которая пропускает только часть электронов в вакуумно-плотный корпус, содержащий в себе, диодную систему вторично-электронного умножителя (ВЭУ). ВЭУ в свою очередь создает электронную лавину, которая, в конечном счете попадает на анод и создает анодный ток. (**Рис.5**)

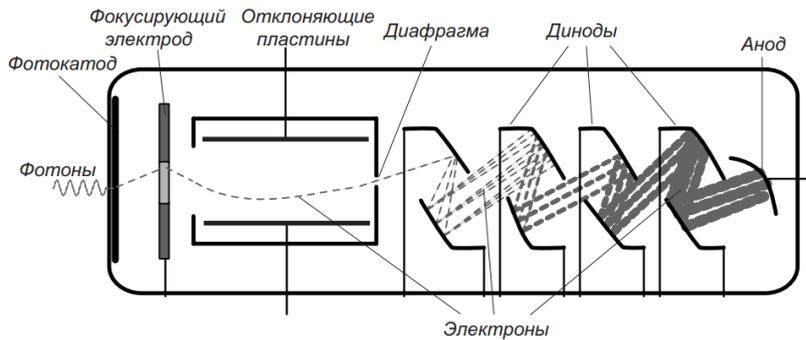


Рис. 5 Устройство диссектора.

При этом, на фотокатод прибора проецируется точечное изображение, исследуемого периодического источника света с временным распределением $I(t)$. Если импульсы излучения и синусоидальное напряжение развертки жестко синхронизованы, то в плоскости разделительной диафрагмы с частотой ВЧ-развертки будет появляться пространственное электронное распределение $q(x)$, соответствующее временному распределению в световом импульсе.

В отверстие разделительной диафрагмы при каждом появлении распределения $q(x)$ проходит заряд, пропорциональный яркости наблюдаемого процесса в данный момент времени. Средний ток анода $I_a(t)$ вторично-электронного умножителя (ВЭУ) пропорционален величине этого заряда. Изменяя фазу напряжения на отклоняющих пластинах диссектора, можно осуществить сканирование всего распределения $q(x)$. Таким образом, при стабильных параметрах импульса сигнал $I_a(t)$ на аноде вторично-электронного умножителя повторит форму исследуемого сигнала $I(t)$ с коэффициентом трансформации

$$M = \frac{T}{\tau}$$

τ — длительность исследуемого сигнала,

T — время, затраченное на соответствующее изменение фазы развертки.

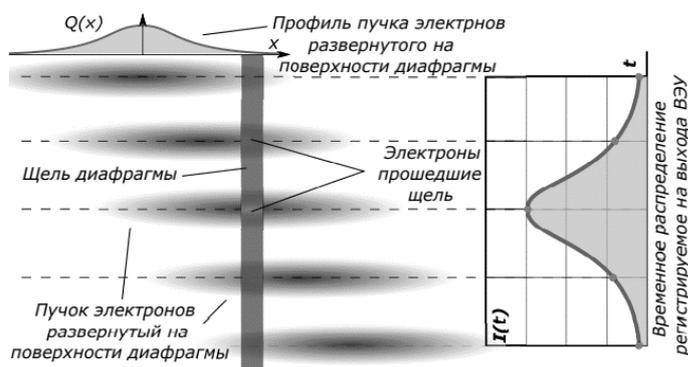


Рис.6 Слева – сканирование продольного распределения $Q(x)$ поперёк щели в диафрагме диссектора; справа – временное изменение среднего анодного тока на выходе ВЭУ (ток пропорционален прошедшему через щель заряду)

3 Результаты измерений

В ходе эксперимента была снята зависимость частоты синхротронных колебаний от ускоряющего напряжения. Для каждого выставленного значения eV , раскачивались колебания, с помощью модуляции сигнала задающего генератора ВЧ системы. То есть ускоряющее напряжение модулировалось с частотой, которая подавалась в генератор. При совпадении возбуждающей частоты с частотой колебаний пучка амплитуда последних возрастала. По визуальным данным, полученным с диссектора, отслеживался момент возникновения резонанса. Частота, на которой возникал резонанс, и являлась частотой синхротронных колебаний. Значение частоты снималось с осциллографа.

Так же важно разобраться в том, как синхротронные колебания меняли наблюдаемую на диссекторе форму пучка. Синхротронные колебания – это гармонические колебания центра тяжести продольного распределения частиц в пучке относительно равновесной фазы ускоряющего ВЧ напряжения. При раскачивании колебаний пучок начинает колебаться по фазе относительно ВЧ развертки диссектора, которая является долей от частоты ускоряющего напряжения. В результате продольное распределение пучка, образующееся в плоскости анализирующей щели диссектора, также начинает колебаться поперек щели с синхротронной частотой. Линейная развертка диссектора сканирует это изображение поперек анализирующей щели с частотой 50 Гц. Таким образом относительно щели образуется сумма двух движений: линейного, с частотой 50 Гц, и гармонического, с синхротронной частотой. Благодаря этому распределение, полученное с диссектора, принимает такой вид.

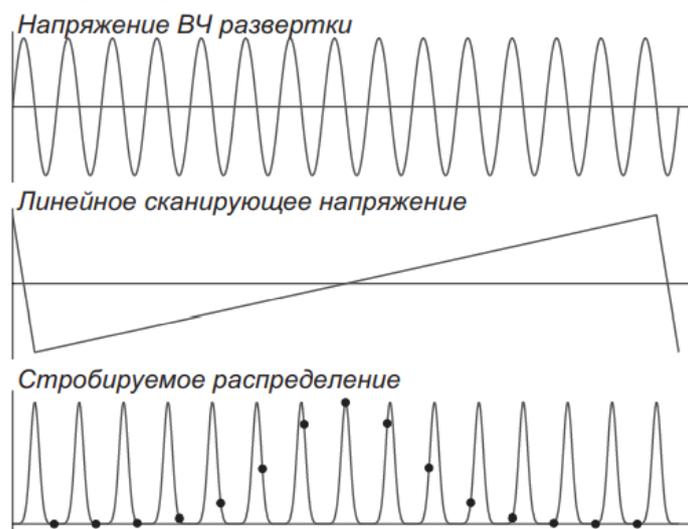


Рис 7. Схема развертки диссектора

Ниже представлены таблица с данными эксперимента и график зависимости частоты синхротронных колебаний от ускоряющего напряжения для расчетного и экспериментального значений частот.

Для расчета использовалась формула

$$\Omega = \omega_s \left[\frac{qeVK \sin \varphi_s}{2\pi E_s} \right]^{1/2}, \text{ где}$$

$K = 0,0168$ коэффициент пространственного уплотнения орбит,

$\omega_s = 818,924$ кГц – частота обращения,

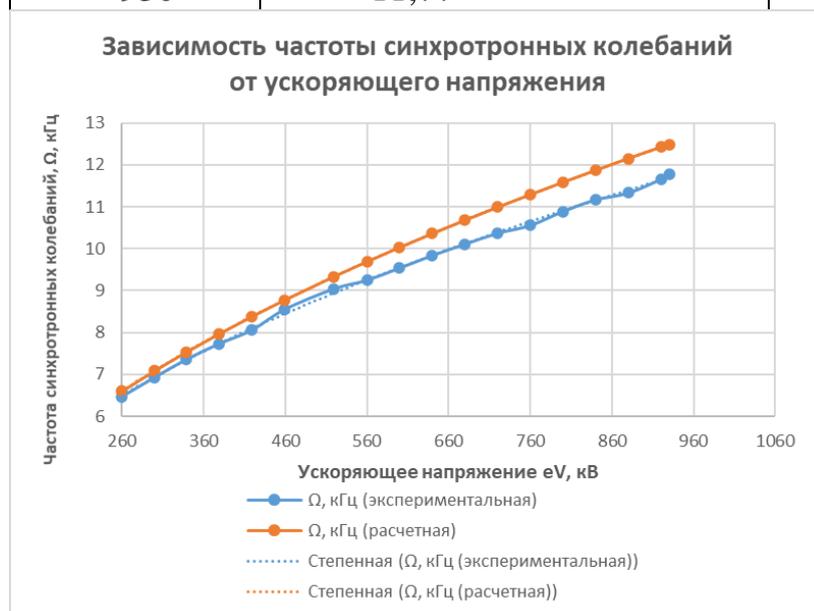
$q = 222$ кратность ускорения,

$\sin \varphi_s = 0,8$ пролётный фактор,

$E = 1900$ МэВ энергия пучка

Таблица 1: Экспериментальная и теоретическая зависимость Ω от eV

eV, кВ	Ω , кГц (экспериментальная)	Ω , кГц (расчетная)
260	6,47	6,603
300	6,93	7,093
339	7,36	7,540
379	7,732	7,972
419	8,057	8,382
459	8,55	8,773
519	9,04	9,329
560	9,248	9,691
599	9,533	10,023
640	9,839	10,360
680	10,11	10,679
720	10,37	10,988
760	10,557	11,289
800	10,89	11,583
840	11,17	11,869
880	11,33	12,148
920	11,66	12,421
930	11,77	12,488



На графике видно, что кривая, полученная по экспериментальным данным, отличается от теоретической, но поведение этих двух кривых очень схоже. Обе они хорошо аппроксимируются степенной функцией, этого и следовало ожидать исходя из формулы для вычисления частоты синхротронных колебаний.

В среднем погрешность измерений составила 4,5%. Хорошее объяснение возникновения такой погрешности не представляется возможным из-за сложности установки и большого количества параметров, которые могли повлиять на данные эксперимента.

Но важно отметить, что резонаторов в ускоряющей ВЧ системе пять. Значение ускоряющего напряжения будет суммой напряжений каждого из резонаторов. Для того, чтобы напряжение на резонаторах складывалось, они должны быть точно настроены по фазе, но это может и не выполняться. Так же, исходная точность калибровки напряжения, которую мы проверяли в данной работе не лучше 10%. Поэтому для корректной калибровки измерения напряжения на ускоряющих резонаторах ВЧ системы в идеале нужно использовать только один резонатор.

4 Вывод и заключение

В данной работе была изучена теория, касающаяся работы циклических ускорителей, в частности режима автофазировки и синхротронных колебаний. Проведены изучение зависимости частоты синхротронных колебаний от ускоряющего напряжения на установке ВЭПП-4М путём резонансной раскачки и измерение синхротронной частоты коллайдера с использованием электронно-оптического диссектора. Отличие экспериментальной синхротронной частоты коллайдера от теоретической в среднем получилось равным 4,5%. Так же были приведены некоторые соображения по поводу возникновения данной погрешности. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что калибровка измерения напряжения на ускоряющих резонаторах ВЧ системы ВЭПП-4М на момент проведения эксперимента была выполнена с хорошей точностью.

Список литературы

1. А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев. Теория циклических ускорителей. //Государственное издательство физико-математической литературы. Москва, 1962. С. 38-39, 42, 153-158
2. Лебедев А. Н. //Основы физики и техники ускорителей. С. 40
3. В. В. Смалюк. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. //Новосибирск, Параллель, 2009 С. 76-77
4. Дорохов Виктор Леонидович. Развитие методов оптической диагностики в циклических ускорителях заряженных частиц. Новосибирск, 2021
5. Золкин А.С. Что надо знать при написании курсовой работы (Методические рекомендации для студентов)//Сиб. физ. журн. 1995. №4. С. 65 –71. http://www.nsu.ru/journals/phys_stud/russian/
6. ИЯФ 2011. Ускорительный комплекс ВЭПП-4. // Новосибирск, 2011 с. 60
7. Официальный сайт Ускорительного комплекса ВЭПП-4М ИЯФ <http://v4.inp.nsk.su/>