

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Чепурной Николай Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение угла инжекции электронного пучка в накопитель-
охладитель инжекционного комплекса ВЭПП-5**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18309

Научный руководитель:

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

к.т.н. Астрелин В.Т.

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019

Аннотация

Настоящая работа представляет собой измерение угла и координаты инжекции пучка электронов в накопитель-охладитель инжекционного комплекса ВЭПП-5. Для этого был проведён эксперимент по измерению координаты пучка в месте расположения датчика положения пучка (он же пикап). Затем получена транспортная матрица участка ускорителя от влёта в накопитель-охладитель до пикапа, а по ней восстановлены координата и угол пучка в начале участка.

Ключевые слова: электроны, инжекция, измерение координаты

Оглавление

Введение.....	4
Постановка задачи.....	5
Теоретическая часть.....	6
Экспериментальная часть.....	12
Заключение	14
Список литературы	15

Введение

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 [1] (ИК) снабжает электронами и позитронами ВЭПП-2000 с 2015 года [2], ВЭПП-4М - с 2016. Схема инжекционного комплекса и коллайдеров ИЯФ СО РАН показана на Рисунке 1.

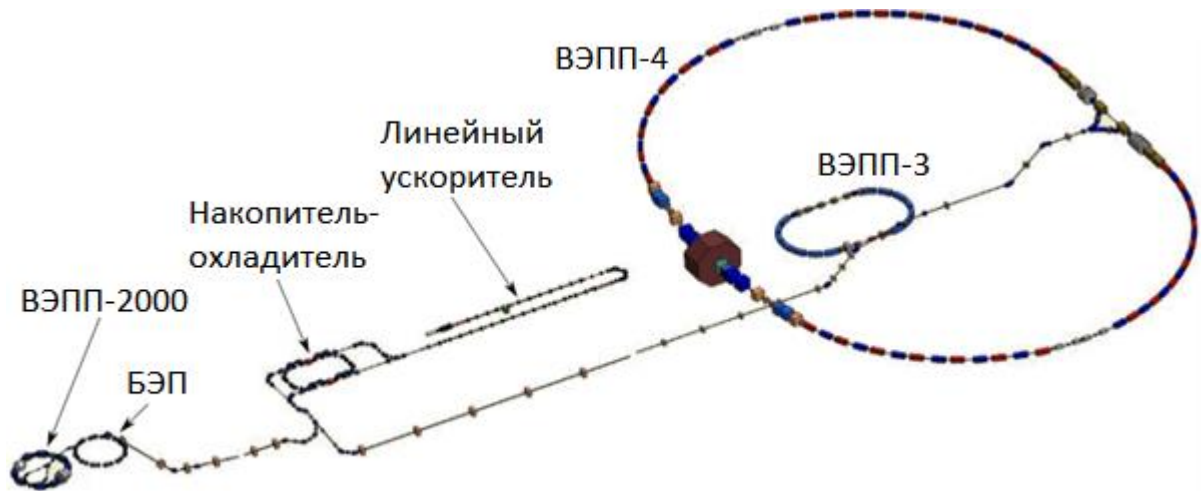


Рисунок 1. Схема ИК ВЭПП-5 и коллайдеров

Инжекционный комплекс (Рисунок 2) состоит из электронной пушки, двух линейных ускорителей (ЛУ), конверсионной системы, накопителя-охладителя (НО) и транспортных каналов.

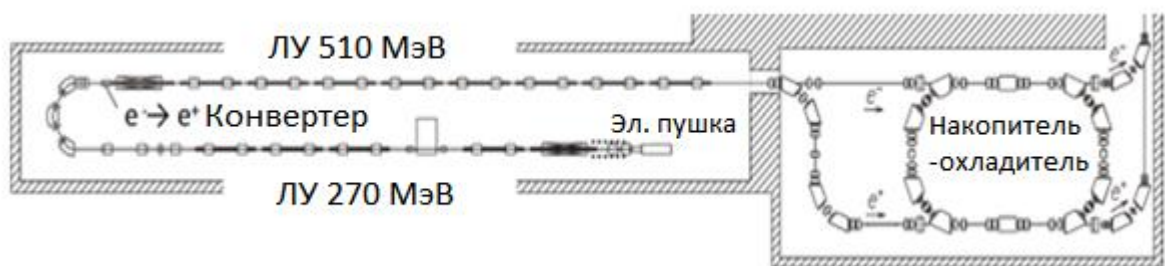


Рисунок 2. Схема инжекционного комплекса ВЭПП-5.

Постановка задачи

Темпы накопления частиц в накопителе-охладителе напрямую зависят от настройки инжекции в него. Большая координата влета пучка корректируется за счет пары линз и после инфлектора, который выполняет поперечный направлению движения пучка электромагнитный удар, компенсирующий большой угол движения пучка. Однако, из-за неправильного угла влета или слишком большой координаты существенная часть пучка может быть потеряна еще до прохождения вышеперечисленных элементов, призванных «посадить» пучок на орбиту. Вследствие этого, возникает задача измерения угла и координаты инжекции пучка на влете в накопитель. Зная их значения, впоследствии, можно выполнить корректировку каналов инжекции, для изменения измеренных величин угла и координаты для повышения эффективности инжекции.

Цель работы: измерить угол и координату инжекции пучка электронов в накопитель-охладитель ИК ВЭПП-5.

Решение данной задачи проводилось в три этапа. Первый заключался в ознакомлении с основными элементами ускорителя, принципами их работы, изучением теории, которая стоит за этим. Затем – проведение эксперимента по измерению координаты пучка в месте расположения датчика положения пучка (он же пикап). В завершении – расчёт самого угла и координаты инжекции.

Теоретическая часть

Для описания движения пучка в вакуумной камере ускорителя удобно использовать сопутствующую пучку систему координат (Рисунок 3), в которой координата s отсчитывается вдоль идеальной траектории, т.е. всюду проходящей через центры магнитных элементов, (единичный вектор t), а поперечные координаты x и z вдоль нормали (единичный вектор n) и бинормали (единичный вектор b) соответственно.

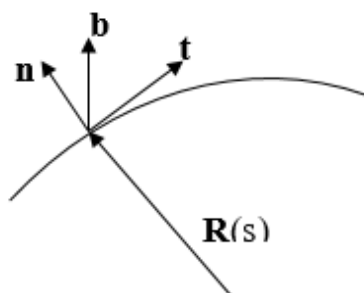


Рисунок 3. Сопутствующая пучку система координат R – радиус кривизны идеальной траектории

Датчик положения пучка

Регистрация координат пучка производится с помощью четырёх металлических пластин, расположенных около стенок вакуумной камеры. Пучок, пролетая мимо пластин, наводит на них заряды изображения, величина которого обратно пропорциональна расстоянию между ними. Измерив наведённые заряды всех пластин можно узнать положение пучка

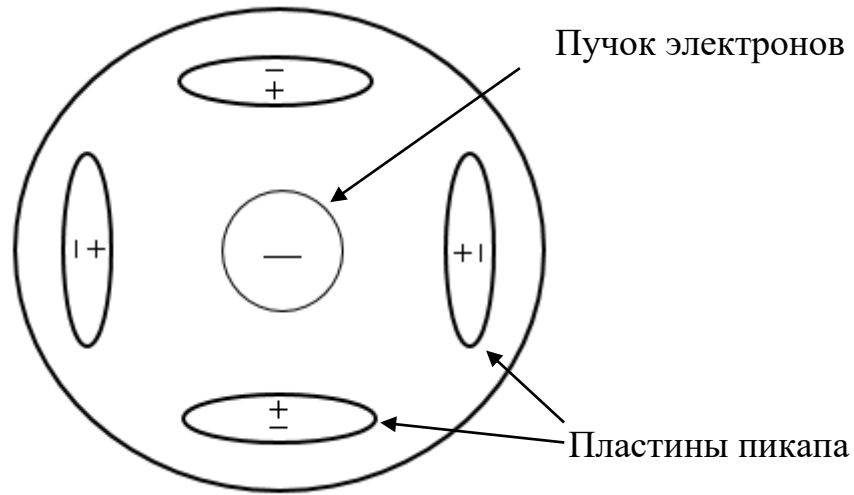


Рисунок 4. Схема датчика положения пучка.

На практике для определения реального положения пучка необходима калибровка пикапа. Пусть азимутальный размер электродов мал и имеется смещение по оси X величиной x . Тогда, согласно работе [3], наведённые на электроды заряды зависят от азимута расположения электродов следующим образом:

$$q(0) \propto \frac{1+x}{1-x}, q(\pi) \propto \frac{1-x}{1+x}, q\left(\frac{\pi}{2}\right) = q\left(-\frac{\pi}{2}\right) \propto \frac{1-x^2}{1+x^2}$$

Наиболее распространены нормировки (Рисунок 5) разности зарядов на противоположных электродах, расположенных в горизонтальной плоскости на их удвоенную сумму:

$$\tilde{x} = \frac{1}{2} \cdot \frac{q(0)-q(\pi)}{q(0)+q(\pi)} = x \cdot \frac{1}{1+x^2}$$

И на сумму зарядов на всех четырёх электродах (Рисунок 6):

$$\tilde{x} = \frac{q(0)-q(\pi)}{q(0)+q(\pi)+q\left(\frac{\pi}{2}\right)+q\left(-\frac{\pi}{2}\right)} = x \cdot \frac{1+x^2}{1+x^4}$$

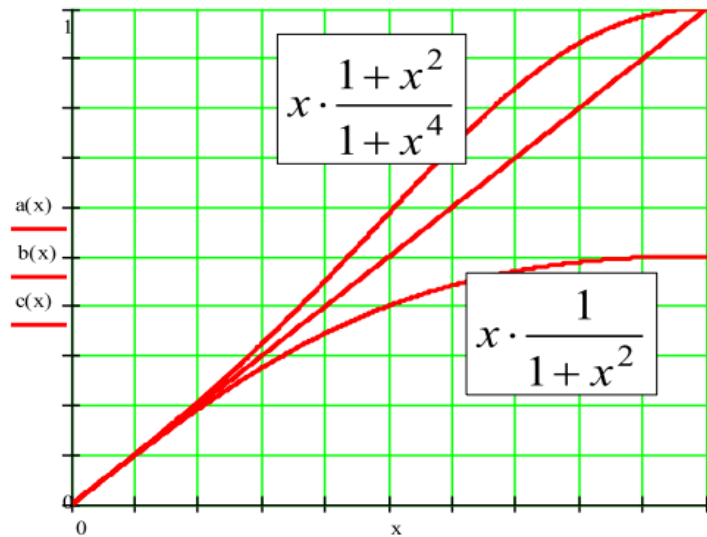


Рисунок 5. Расчётные кривые нормировок

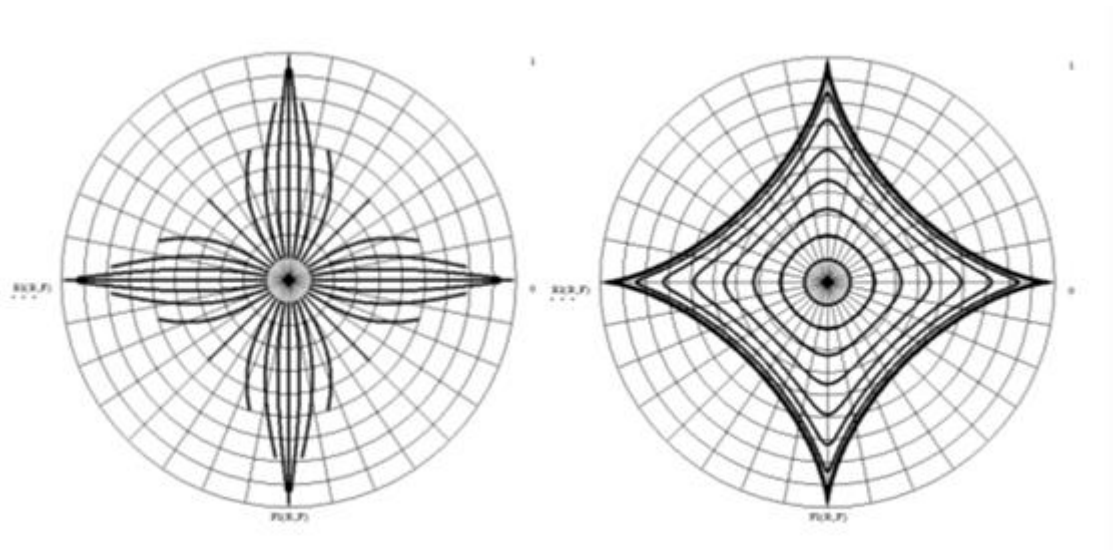


Рисунок 6. Пример искажения координатной сетки откалиброванного на полную сумму датчика. Поперечное сечение камеры. Слева - изменение радиальной компоненты, справа - угловой

Элементы магнитной системы

Траектория движения частиц отличается от идеальной. Как показано в работе [4], уравнения поперечных колебаний по x и по z похожи:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial s^2} + K_x x = 0, \text{ где } K_x = \frac{1}{R^2(s)} - \frac{e}{p_0 c} \frac{\partial B_z}{\partial R} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial s^2} + K_z z = 0, \text{ где } K_z = \frac{e}{p_0 c} \frac{\partial B_z}{\partial R} \quad (2)$$

Общее решение уравнения (1) $x(s)$ удобно выражается через начальную координату $x(s_0)$ и начальный угол $x'(s_0)$:

$$\begin{pmatrix} x(s) \\ x'(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(s_0) \\ x'(s_0) \end{pmatrix} = T(s|s_0) \begin{pmatrix} x(s_0) \\ x'(s_0) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Где T , называемая транспортной матрицей, зависит от расположения и параметров элементов магнитной системы между точками s и s_0 . Общее решение уравнения (2) $z(s)$ аналогичным образом выражается через $z(s_0)$ и $z'(s_0)$, но коэффициенты транспортной матрицы будут другими. Рассмотрим набор продольных координат произвольного участка ускорителя $s_0, s_1, \dots, s_i$, которые пучок проходит последовательно. Тогда следствием из уравнения (3) будет то, что транспортная матрица всего участка выражается через транспортные матрицы промежутков между s_0 и s_1, s_1 и $s_2, \dots, s_{i-1}$ и s_i следующим образом:

$$T(s_i|s_0) = T(s_i|s_{i-1}) \cdot T(s_{i-1}|s_{i-2}) \cdot \dots \cdot T(s_1|s_0)$$

В пустом промежутке частицы движутся прямолинейно, без изменения угла, и его транспортная матрица выглядит следующим образом:

$$T(s_0 + L|s_0) = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

где L – это длина пустого промежутка.

Квадрупольная линза (квадрупольный магнит) – устройство для фокусировки пучка с помощью магнитного поля. Вертикальная компонента его поля имеет линейную зависимость от поперечной координаты:

$$H_z = Gx \quad (5)$$

через G обозначен градиент магнитного поля, его величина зависит от силы тока, подаваемого на обмотки квадрупольного магнита.

Из уравнений Максвелла получаем связь между компонентами поля:

$$\text{rot}(\mathbf{B}) = 0 \Rightarrow \frac{\partial B_z}{\partial x} = \frac{\partial B_x}{\partial z}$$

Следовательно, фокусировка по одной координате ведёт к дефокусировке по другой (Рисунок 7). Фокусирующие по x (дефокусирующие по z) магниты называются фокусирующими. А дефокусирующие по x (фокусирующие по z) – дефокусирующими.

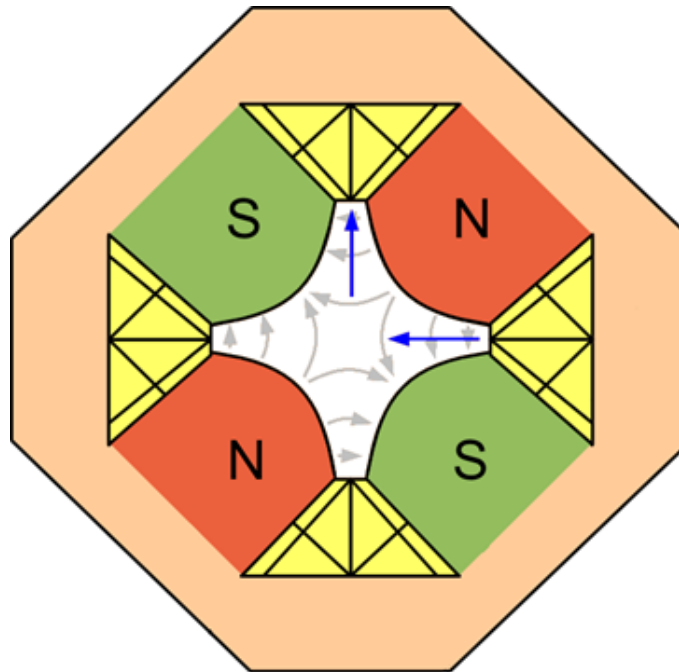


Рисунок 7. Квадрупольный магнит. Серым показаны линии магнитного поля. Синими стрелками – сила, действующая на отклонённую частицу.

Часто полагают что, коэффициент K_x в уравнении (1) условно постоянен на всём протяжении линзы и считают его равным усреднённому вдоль магнита реальному значению K_x . Решая (1) относительно x при $K_x > 0$ получим транспортную матрицу фокусирующего магнита:

$$\begin{pmatrix} \cos(\sqrt{K_x} \cdot L) & \frac{\sin(\sqrt{K_x} \cdot L)}{\sqrt{K_x}} \\ -\sqrt{K_x} \cdot \sin(\sqrt{K_x} \cdot L) & \cos(\sqrt{K_x} \cdot L) \end{pmatrix}$$

А при $K_x < 0$ – транспортную матрицу дефокусирующего магнита:

$$\begin{pmatrix} \text{ch}(\sqrt{-K_x} \cdot L) & \frac{\text{sh}(\sqrt{-K_x} \cdot L)}{\sqrt{-K_x}} \\ \sqrt{-K_x} \cdot \text{sh}(\sqrt{-K_x} \cdot L) & \text{ch}(\sqrt{-K_x} \cdot L) \end{pmatrix}$$

Расчётные формулы

В равенствах (4) и (5) K_x зависит от силы тока внутри квадрупольного магнита. Изменяя силу тока в обмотках одной линзы и оставляя остальные параметры участка ускорителя неизменными, можно получить транспортную матрицу этого участка, элементы которой будут зависеть от силы тока в обмотке квадрупольной линзы.

Зная координаты вылета пучка из участка при двух различных силах тока и, домножив их на соответствующие транспортные матрицы, можно, из равенства (3) получить систему уравнений:

$$\begin{cases} a_{11}(I_1)x_0 + a_{12}(I_1)x'_0 = x_1 \\ a_{11}(I_2)x_0 + a_{12}(I_2)x'_0 = x_2 \end{cases}$$

Откуда легко находятся координата и угол пучка при влёте в участок:

$$x_0 = \frac{a_{12}(I_2)x_1 - a_{12}(I_1)x_2}{a_{11}(I_1)a_{12}(I_2) - a_{12}(I_1)a_{11}(I_2)} \quad (6)$$

$$x'_0 = \frac{a_{11}(I_1)x_2 - a_{11}(I_2)x_1}{a_{11}(I_1)a_{12}(I_2) - a_{12}(I_1)a_{11}(I_2)} \quad (7)$$

Экспериментальная часть

В ходе эксперимента (Рисунок 8) устанавливались два значения силы тока на линзе 3F3 – $I_1 = 520\text{A}$ и $I_2 = 570\text{A}$. Это крайние значения множества токов, при которых пучок стабильно достигает датчика РКР8. Благодаря программному обеспечению, разработанному сотрудниками ИК ВЭПП-5 по показаниям пикапа была получена две серии значений координат пучка на вылете из РКР8. Среднее значение среди элементов серии при токе I_1 получилось равным $x_1 = 1.8641\text{ мм}$ со среднеквадратичным отклонением $\sigma_1 = 0.4030\text{ мм}$, а при токе I_2 – $x_2 = 0.5286\text{ мм}$ с $\sigma_2 = 0.1441\text{ мм}$.

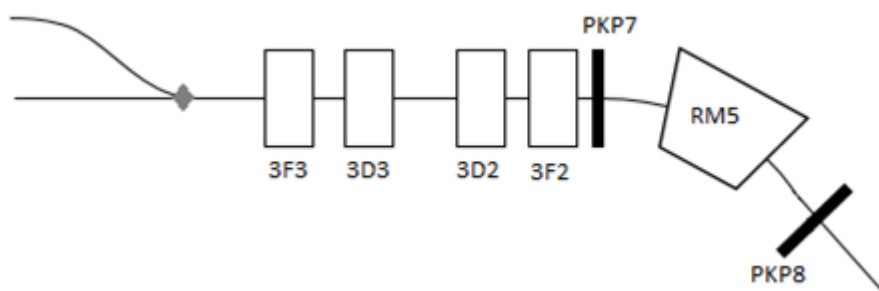


Рисунок 8. Схема экспериментального участка. Ромб – место влёта пучка; 3F3, 3D3, 3D2, 3F2 – квадрупольные линзы, РКР – датчик положения пучка, RM5 – поворотный магнит.

Далее с помощью программы “Elegant” были получены матрицы: промежутка от влёта пучка в НО до 3F3, от 3F3 до РКР8 и самой линзы 3F3. Среди которых только транспортная матрица линзы 3F3 принимала различные значения в ходе эксперимента, остальные же оставались неизменными. Перемножением трёх транспортных матриц в порядке 3F3-РКР8, 3F3, НО-3F3, были получены транспортные матрицы всего участка:

$$T(I_1) = \begin{pmatrix} -0,403925 & 2,64179 \\ 0,292906 & -4,39142 \end{pmatrix}$$

$$T(I_2) = \begin{pmatrix} -0,41043 & 2,63998 \\ 0,303471 & -4,38849 \end{pmatrix}$$

Потом по формулам (6) и (7) были получены координата и угол инъекции пучка:

$$x_0 = 6.18 \pm 2.48 \text{ мм}$$

$$x'_0 = 1.42 \pm 0.40 \text{ мрад}$$

с доверительным интервалом 68%

Заключение

По итогам данной работы были измерены величины угла и координаты электронного пучка при инъекции. В дальнейшем, по измеренным значениям, можно проводить корректировку инъекционного канала из линейного ускорителя в кольцо накопителя-охладителя.

К большим ошибкам измеренных значений привели несколько важных факторов: нестабильный режим работы линейного ускорителя (случайные изменения начальных координат пучка в линейном ускорителе приводит к разным траекториям прохождения ускорителя) и большой размер инжектируемого пучка (что приводит к неточностям измерения положения его центра).

Список литературы

- [1] D. Berkaev. “VEPP-5 Injection Complex: two colliders operation experience”, in Proc. IPAC’17. Paper WEP1K026 (2017)
- [2] I. M. Zemlyansky. “Commissioning of e^+/e^- transfer Line from BINP Injection Complex to VEPP-2000 Facility” in Proc. RuPAC’16. Paper TUPSA001 (2016)
- [3] В. П. Черепанов. Диагностика пучков заряженных частиц. Курс лекций/ Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2007.
- [4] S. I. Kurokawa. “High Quality Beams: Joint US-CERN-JAPAN-RUSSIA Accelerator School, St.Petersburg and Moscow, Russia, 1-14 July 2000”, Melville. New-York. AIP CONFERENCE PROCEEDINGS. 2001. Vol 592. P.6–23