

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Кожевников Алексей Вадимович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Калибровка импульсной квадрупольной линзы с помощью
позитронного пучка**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20303

Научный руководитель:

к.ф-м.н. Д.Б. Шварц
Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

ст.преп.КОФ. П.В. Калинин
Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин
Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация

Целью работы являлась калибровка импульсной квадрупольной линзы, которая используется на коллайдере ВЭПП-2000 для фокусировки позитронного и электронного пучков. Иначе говоря, поиск связи между управляющим кодом (PKS), который подается с панели управления, и градиентом поля в линзе, соответствующего этому коду. Калибровка проводилась на перепускном канале позитронного пучка из бустерного кольца (БЭП) в коллайдер. Исходя из теоретических представлений о линейной связи между полем и током (код PKS влияет на подаваемый на элемент ток), для проведения калибровки было достаточно провести измерения при одном значении PKS, затем, по показаниям датчиков, регистрирующих положение позитронного пучка с помощью различных сопутствующих вычислений, получить искомую зависимость. При этом результат эксперимента имел сравнительно небольшую погрешность в силу точности датчиков на ускорителе.

Ключевые слова: квадрупольная линза, магнитное поле, эффективная длина, магнитная жесткость.

Оглавление

1. Введение	4
2. Теоретическая часть	6
3. Экспериментальная часть	8
3.1 Описание установки	8
3.2 Описание метода	10
4. Анализ результатов	16
5. Выводы	16
6. Литература	17

1. Введение

В режиме регулярной работы на ускорительном комплексе ВЭПП-2000 каждые несколько минут происходит перепуск новой порции частиц из бустерного кольца в коллайдер [1].

На рисунке 1 представлена схема перепускного канала с различными элементами, с помощью которых можно настроить траекторию пучка.

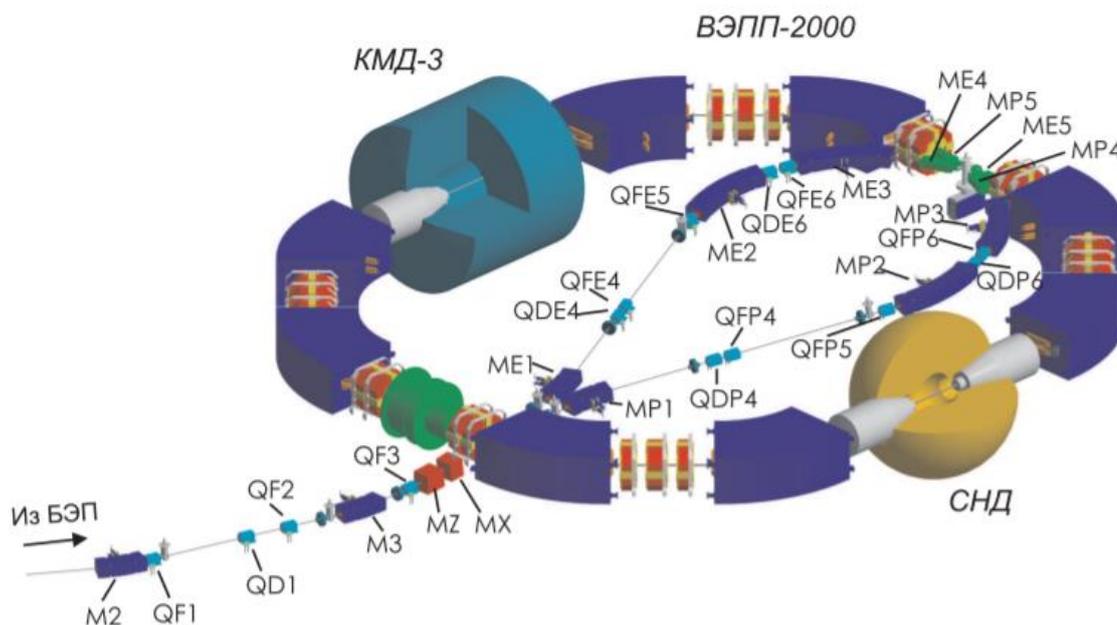


Рис. 1. Схема перепускного канала ВЭПП-2000.

На схеме элементы с обозначением “Р” взаимодействуют с позитронами, а элементы с обозначением “Е”, соответственно, с электронами.

“F” – фокусировка, “D” – дефокусировка.

Магниты M2, M3, MP1 (ME1), MP2 (ME2), MP3 (ME3) запитываются постоянным током последовательно с БЭП, остальные поворотные магниты канала - импульсные с независимым питанием

Квадрупольные линзы QF1 (QD1), QF2 (QD1), QF3, QFP4 (QDP4), QFP5, QFP6 (QDP6), а также и аналогичные им на электронном канале, импульсные с независимым питанием. Осциллограммы питающего напряжения и тока представлены на рисунках 2 и 3:

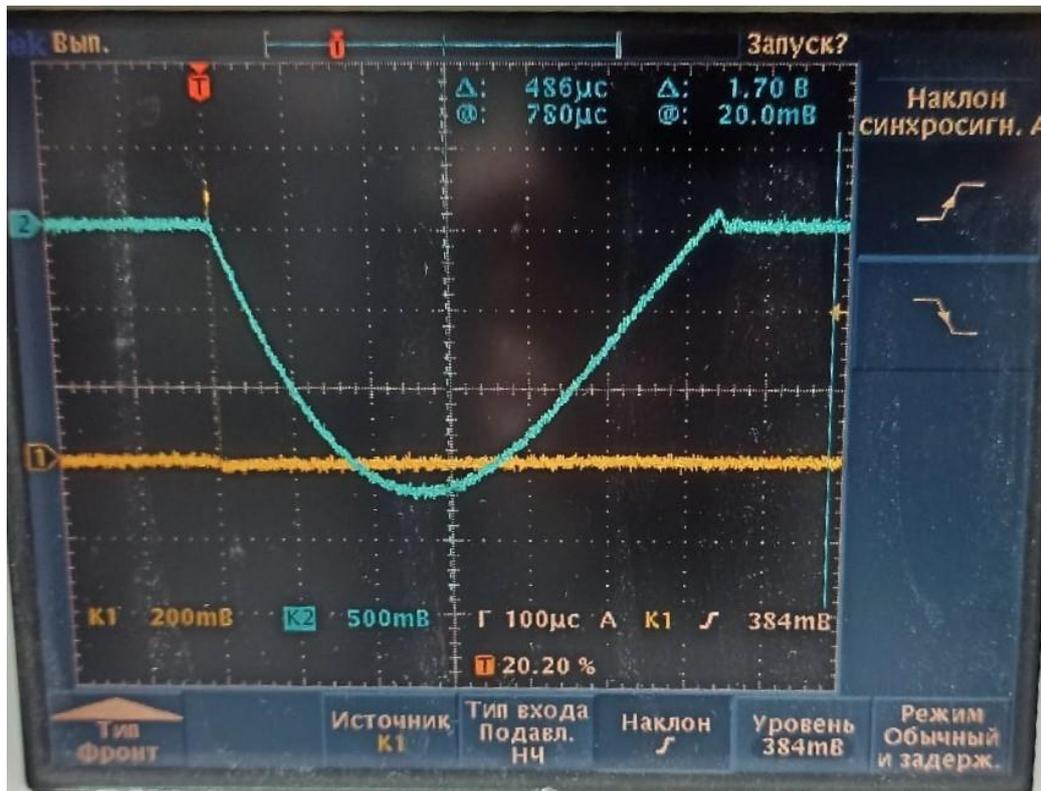


Рис. 2. Импульс тока генератора, питающего квадрупольную линзу.

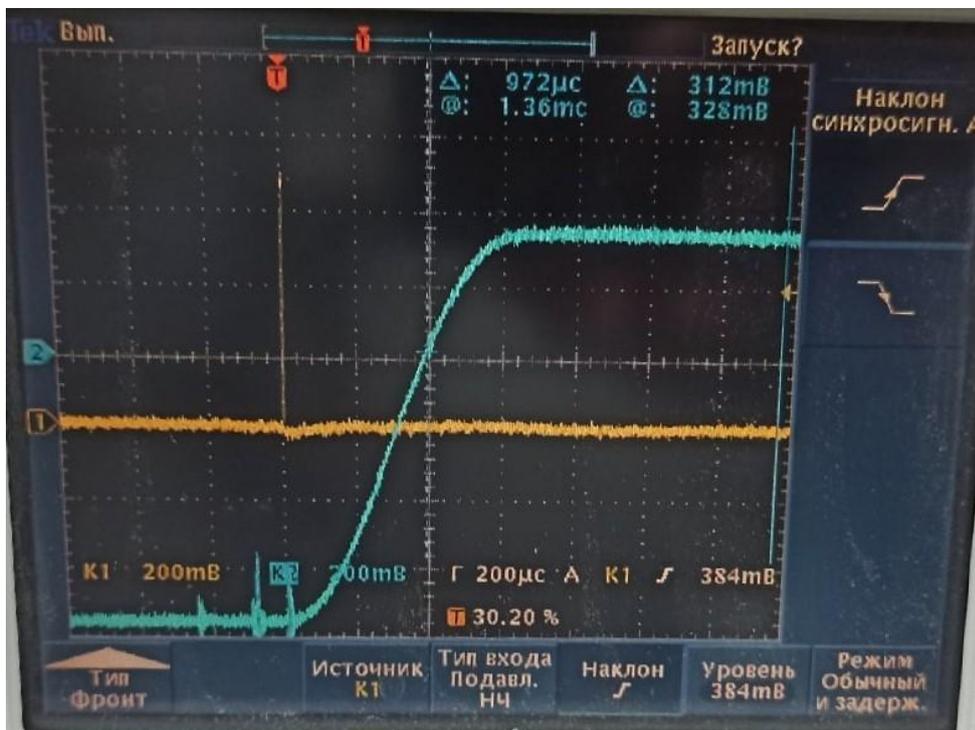


Рис. 3. Импульс напряжения генератора, питающего квадрупольную линзу.

Все параметры элементов, среди которых величина магнитного и электрического полей, градиент поля и т.д. устанавливаются вручную с пульта, что иногда бывает проблематично в силу большого количества «выстрелов» пучка ежедневно.

В связи с этим будет полезно автоматизировать весь процесс. А для этого нужно сделать ряд начальных шагов, в том числе, провести калибровку основных элементов ускорителя. Целью же данной работы является калибровка импульсной квадрупольной линзы.

2. Теоретическая часть

Пучок позитронов с энергией 700 МэВ движется внутри ускорителя. Эти частицы образуют ансамбль частиц, имеющих разброс поперечных импульсов (т.е. ненулевой фазовый объём). В результате, этот ансамбль, запущенный по прямой, будет расходящимся. Иначе говоря, форма фазового объема пучка меняется, расходящийся пучок будет задевать стенки вакуумной камеры, из-за чего будет рассеиваться. Следовательно, чтобы транспортировать пучок, его необходимо фокусировать, в чем и состоит задача импульсных квадрупольных линз. Причем для фокусировки пучка одной квадрупольной линзы недостаточно, поскольку поле квадрупольной линзы фокусирует пучок только по одной из степеней свободы, а по другой непременно дефокусирует.

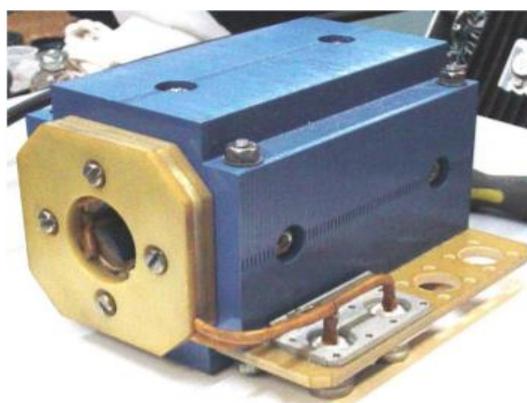
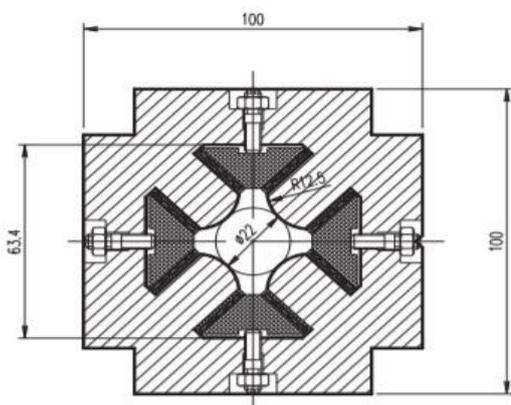


Рис. 4. Импульсная квадрупольная линза

Пучок, проходя через линзу, попадает в магнитное поле, под действием которого каждая отдельная частица пучка смещается из-за силы Лоренца, как указано на рисунке 5.

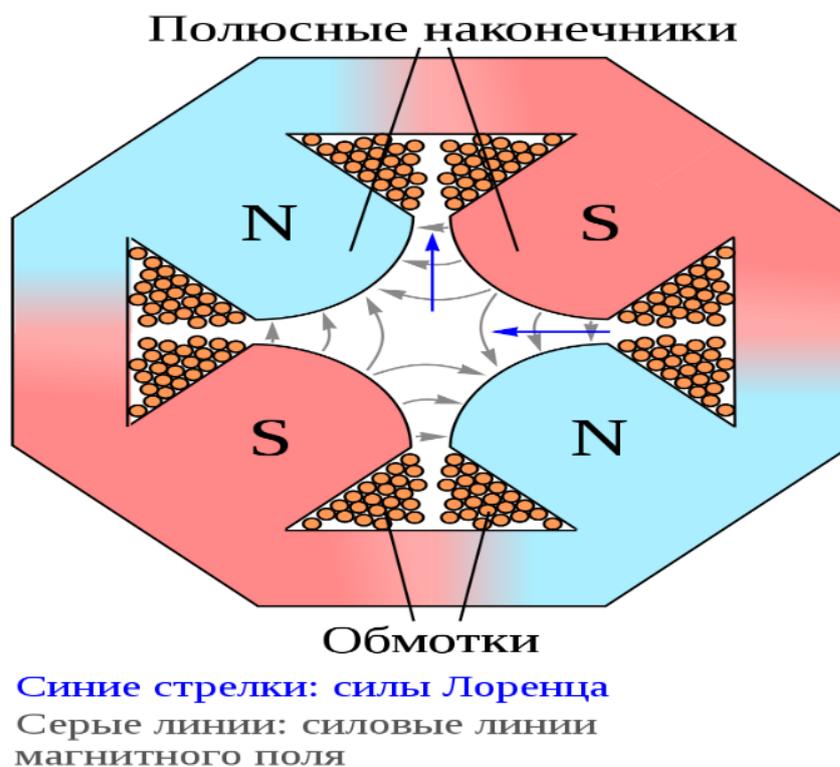


Рис. 5. Направление полей и сил внутри квадрупольной линзы.

На линзу подается ток и, в зависимости от величины этого тока в линзе образуется магнитное поле. Причем, это магнитное поле неравномерно внутри линзы: чем ближе к центру, тем это поле меньше. Таким образом, линза меняет траекторию только тех частиц, которые отдалены от центра. Так происходит фокусировка. Остается проблема: когда с пульта подается ток на линзу, мы не контролируем, какое именно поле мы создаем, но варьируем параметр RKS , в зависимости от значения которого в линзе образуется определенный градиент поля.

Длина исследуемой квадрупольной линзы, относительно всего пути, который проходит пучок, мала, поэтому линзу можно считать тонкой. Поле линзы действует на пучок малое время, вследствие чего при пролете линзы меняется только угол траектории пучка.

3. Экспериментальная часть

3.1 Описание установки

Для проведения калибровки линзы был выбран прямолинейный участок транспортного канала, схема которого приведена на рисунке 6.

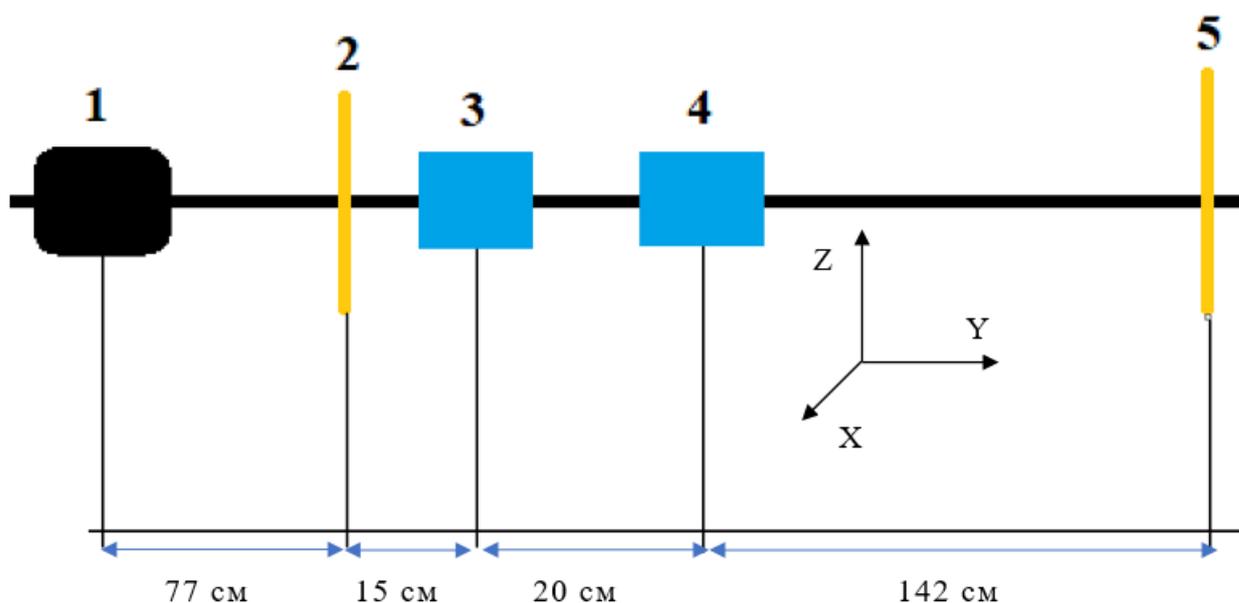


Рис. 6. Схема прямолинейного участка перепускного канала. 1 – Корректор; 2,5 – датчики PIC-7 и PIC-8; 3,4 – квадрупольные линзы QDP4 и QFP4. Ось Y - сонаправлена с направлением движения пучка.

Как видно на рисунке 6, в прямолинейном участке ускорителя находятся следующие компоненты: корректор, который был использован для калибровки, датчики PIC-7 и PIC-8, регистрирующие положение пучка (также есть и другие датчики, не указанные на схеме, но необходимые для контроля процесса), а также сами квадрупольные линзы.

Разберем каждый из элементов по отдельности:

Корректор

Представляет собой камеру, с постоянным магнитным полем внутри. На него с пульта подается ток, в зависимости от которого, внутри корректора образуется магнитное поле определенной величины. Зависимость величины поля от тока представлена на графике:

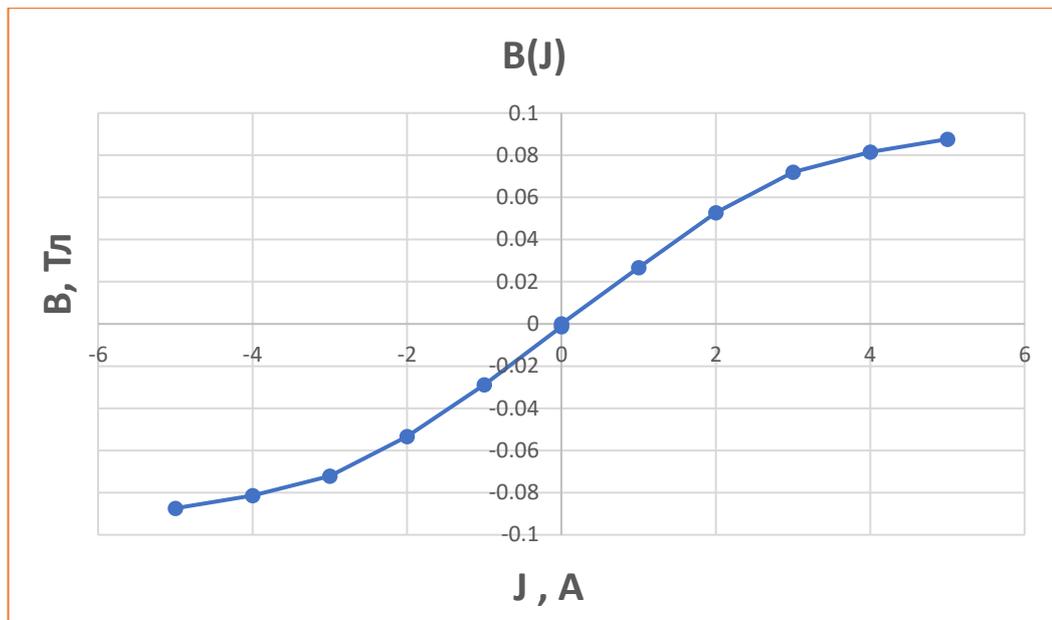


Рис. 7. Зависимость поля внутри корректора от подаваемого на него тока.

Поле внутри корректора сонаправлено с осью X (рис. 6), поэтому пучок будет смещаться параллельно оси Z, исходя из направления силы Лоренца [2]:

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}])$$

Поле внутри корректора измерялось с помощью магнитометра с датчиком Холла. Принцип действия датчика Холла следующий:

На полупроводник подается напряжение, в полупроводнике начинает течь ток, затем, полупроводник помещается в магнитное поле, под действием которого носители заряда (электроны или дырки) начинают отклоняться, из-за чего возникает ЭДС, названная ЭДС Холла, из значения которой и можно получить величину внешнего магнитного поля.

Как видно на рисунке 6, на промежутке от -2 до 2 ампер, зависимость поля от тока практически линейная, этот диапазон является достаточным для проведения калибровки.

Датчики типа РС (Датчики тока изображения)

Датчики тока изображения измеряют импульсы тока, наводимого пучком в линиях съема тока изображения, расположенных равномерно по радиусу в керамическом разрыве вакуумной камеры. По соотношению импульсов тока на

различных азимутах можно установить положение пучка в вакуумной камере датчика.

Датчики типа IPR (вторично-эмиссионный датчик)

Вторично-эмиссионный датчик представляет собой систему проволочек (эммитеров), расположенных с некоторым шагом в апертуре канала в плоскости, перпендикулярной траектории пучка. Пучок, пролетая сквозь проволочки, выбивает из них электроны (т.н. процесс вторичной эмиссии) и на проволочках появляется положительный заряд. По распределению измеренного заряда можно судить о плотности и положении пучка в апертуре канала.

3.2 Описание метода калибровки

Положение частиц пучка в канале описывается вектором (Z, Z') , где Z – это смещение частицы от оси Y , а Z' – это угол наклона траектории.

Преобразование координат пучка можно представить в матричной форме, причем в зависимости от того, какой участок проходит пучок, это преобразование имеет разный характер [2].

Пустые участки:

$$\begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Где L – длина участка

Тонкая линза (меняет угол, но не координату)

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P & 1 \end{pmatrix}$$

Где P – оптическая сила линзы

Само преобразование координат на рассматриваемом нами участке (от корректора до датчика PIC-8) выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} Z \\ Z' \end{pmatrix}_{(\text{на выходе})} = \begin{pmatrix} 1 & L2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z \\ Z' \end{pmatrix}_{(\text{на входе})}$$

Где $L_1 = 92$ см - расстояние от корректора до линзы, $L_2 = 142$ см - расстояние от линзы до датчика.

Угол на входе задается током, который подается на корректор, а координата на выходе регистрируется датчиком РС-8

Проведя математические вычисления, можно определить линейную зависимость между углом на входе и координатой на выходе:

$$Z = (1 - L_2P)Z_B + Z(L_2 + L_1(1 - L_2P)) \quad (1)$$

Из коэффициента наклона данной прямой ($k = L_2 + L_1(1 - L_2P)$ [1/м]) можно явно выразить значение P – оптической силы линзы:

$$P = \frac{L_2 + L_1}{L_1 \cdot L_2} - \frac{k}{L_1 \cdot L_2} \quad (2)$$

Найдя из коэффициента наклона оптическую силу, можем найти градиент поля, соответствующий данному значению P :

$$G = \frac{PBR}{L} \quad (3)$$

где BR – это магнитная жесткость, а L – эффективная длина квадруполь (взята из документации к установке и равна 15 см).

Затем, переведем полученную величину в килогауссы на сантиметр (кГс/см).

3.3 Результаты эксперимента

Прежде, чем начать измерения с линзой, необходимо провести дополнительный подготовительный этап с калибровкой корректора, дабы понять, как себя ведет пучок в отсутствие поля от линзы и найти зависимость угла, на который корректор отклоняет пучок, от тока, подаваемого на корректор:

$$\Delta\varphi = \frac{B \cdot L_{ef}}{B_0 \cdot R_0} \quad (4)$$

где B – магнитное поле внутри корректора, которое является функцией тока, зависимость от которого была найдена ранее (см. 3.1, рис. 7).

L_{ef} - эффективная длина корректора.

$B_0 R_0$ – это также магнитная жесткость, которую можно найти из следующего соотношения (константа перед BR – размерная):

$$700 \text{ [МэВ]} = 300 B \text{ [Тл]} * R \text{ [м]}$$

Вычисление эффективной длины:

При токе 2 ампера нами с помощью магнитометра с датчиком Холла была измерена зависимость поля внутри корректора от координаты.

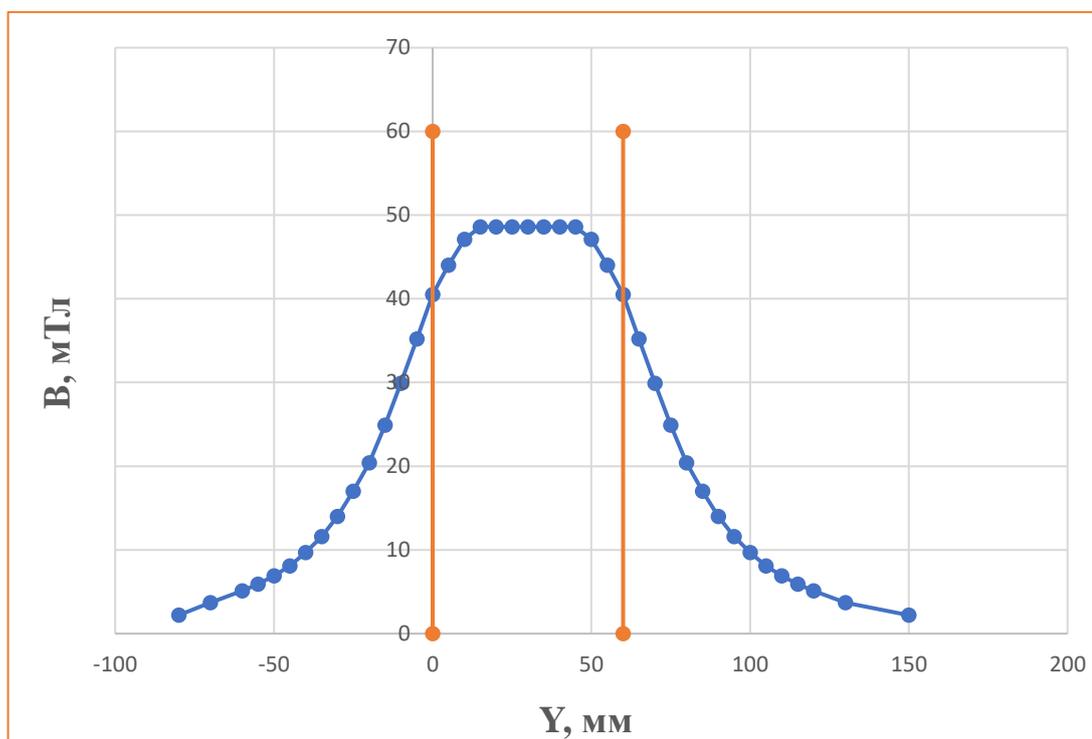


Рис. 8. Зависимость поля внутри корректора от координаты.

Вычислим эффективную длину корректора по следующей формуле:

$$L_{ef} = \frac{\int B(y) dy}{B_{MAX}}$$

Смещение пучка корректором получается из выражения:

$$Z = L_0 * \tan(\Delta\varphi) \sim L_0 * \Delta\varphi \quad (\Delta\varphi \ll 1)$$

где L_0 – расстояние от корректора до датчика.



Рис. 9. Траектория пучка при различных углах φ .

Ранее рассмотренные соотношения позволяют построить зависимость координаты пучка от тока, подаваемого на корректор. Сравним данные с экспериментальными:

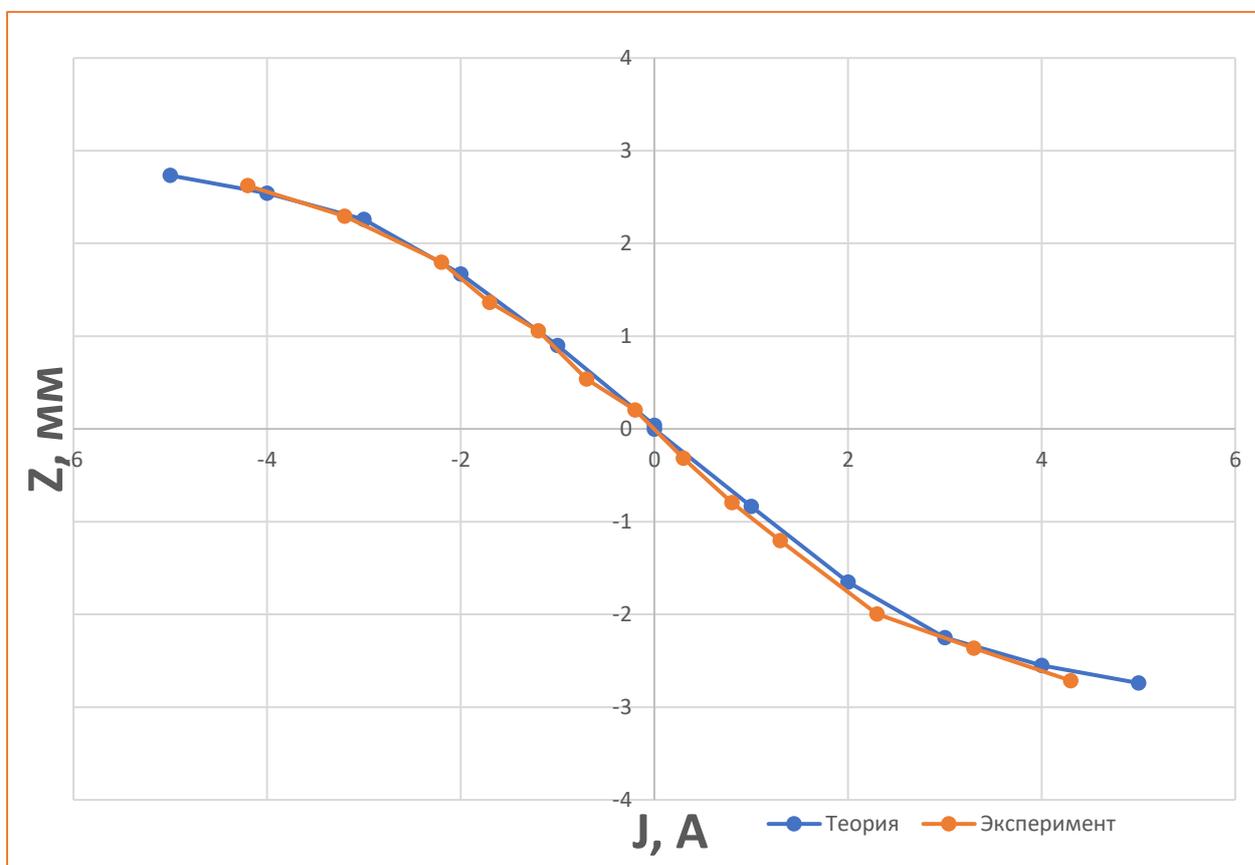


Рис. 10. Зависимость координаты пучка от тока, подаваемого на корректор.

Как видно из графика, линейность сохраняется в диапазоне тока от -2 ампер до 2 ампер.

Предполагается, что зависимость между током и магнитным полем, как минимум для некоторого промежутка, линейна. Поэтому нам достаточно

измерить градиент поля при одном значении PKS, а затем найти коэффициент пропорциональности.

Таким образом, включив квадрупольную линзу QDP4, задав для неё код PKS = -5000, была получена следующая зависимость координаты пучка от тока на корректоре:

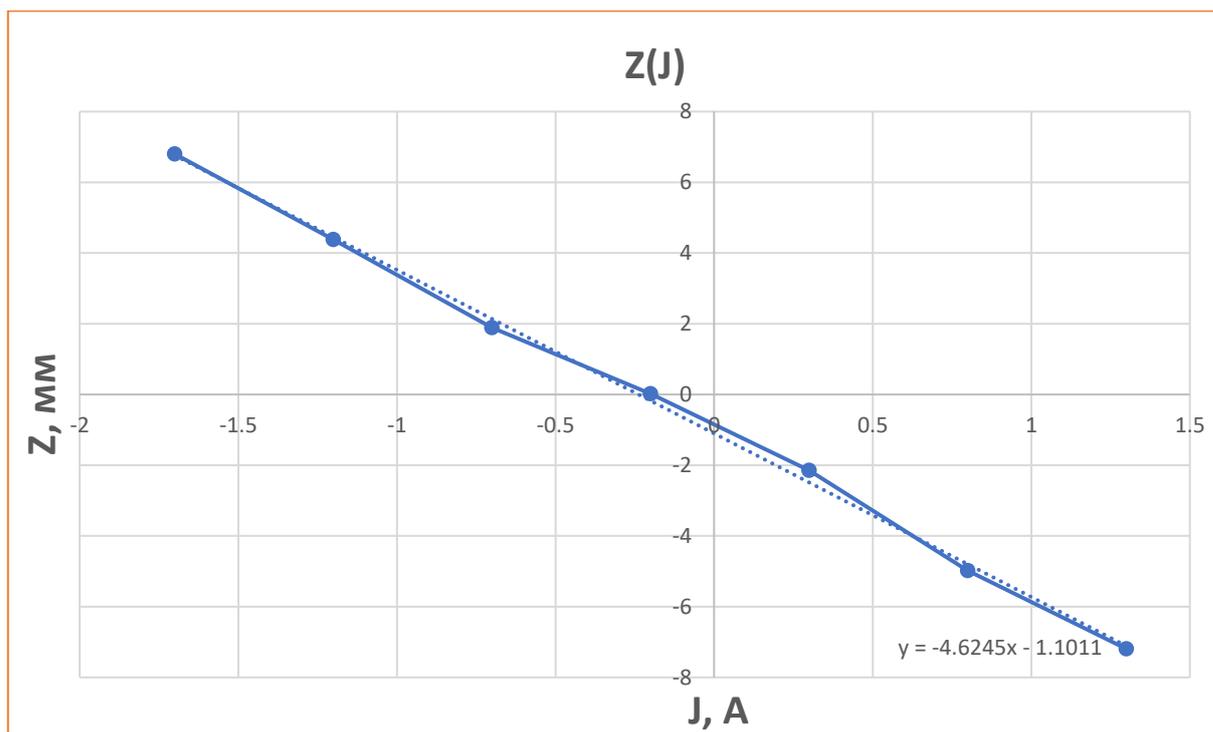


Рис. 11. Зависимость координаты пучка от тока на корректоре с включенной квадрупольной линзой.

Исходя из формулы (4) и зависимости поля внутри корректора от тока (рис. 7), каждому значению координаты пучка соответствует определенный угол. На участке от -2 до 2 ампер эта зависимость носит почти линейный характер. Соотношение между координатой и углом есть расстояние между корректором и датчиком (77 см). По формуле (4) построим зависимость угла отклонения пучка под действием магнитного поля в корректоре от тока, подаваемого на этот корректор:

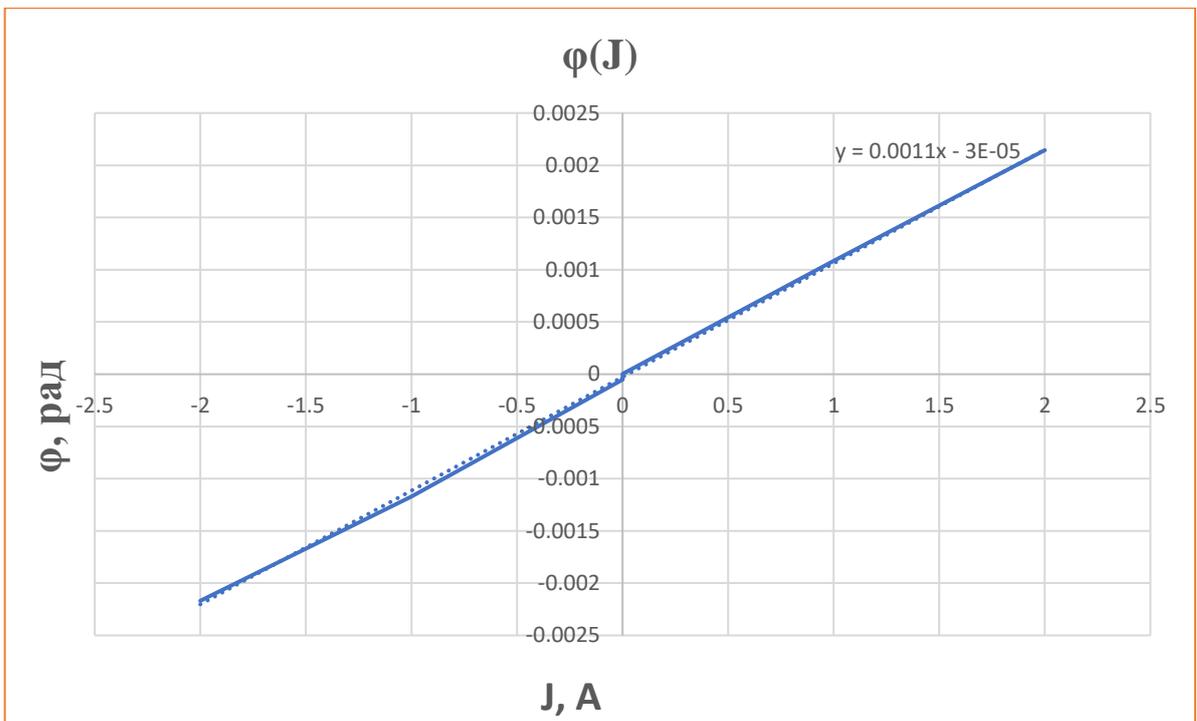


Рис. 12. Зависимость между углом, на который отклоняется пучок, от тока, подаваемого на корректор.

Теперь, зная коэффициент наклона прямой на рисунке 10, можно перейти от зависимости координаты пучка от тока, подаваемого на корректор (рис 9) к зависимости координаты пучка от угла, на который он отклоняется в корректоре:

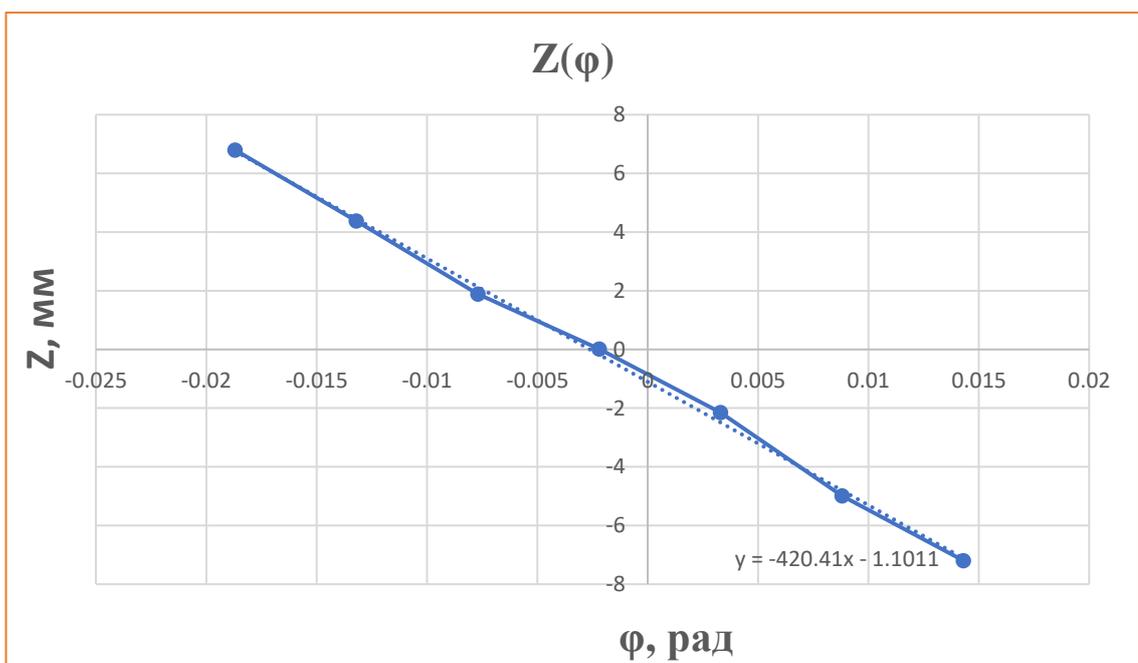


Рис. 13. Зависимость координаты пучка от угла, на который отклоняет пучок корректор.

Так, получив коэффициент наклона $k = -420$ мм/рад (наличие свободного члена в уравнении прямой на графике не влияет на измерения и отражает влияние начального положения), по формулам (1), (2) и (3) находим градиент поля $G = 3,09$ кГц/см. Таким образом, получаем зависимость между PKS и G:

$$\frac{G}{PKS} = \frac{3,09 \text{ кГц/см}}{-5000 \text{ PKS}} = -0,618 \text{ Гс / (см * PKS)}$$

4. Анализ результатов

В результате был получен коэффициент пропорциональности между кодом PKS и градиентом магнитного поля. Однако не гарантируется, что этот коэффициент верен для всех значений PKS. Особенно при больших кодах (около 30000) коэффициент может иметь совсем другое значение и даже не быть постоянным в силу нелинейной зависимости магнитной проницаемости железного сердечника квадрупольной линзы от величины магнитного поля. Однако данный результат является приемлемым, поскольку во время работы установки, вне калибровочных измерений, параметр PKS не превышает 6000 (рабочее значение на QDP4: -5833).

5. Выводы

Была проведена калибровка импульсной квадрупольной линзы. Было исследовано поведение пучка в прямолинейном участке установки, получена зависимость угла, на который отклоняется пучок, от тока, подаваемого на корректор. Затем, имея информацией об угле, мы построили зависимость координаты положения пучка от того, на какой угол он отклоняется. Причем, как в присутствии фокусировки квадрупольной линзы, так и без нее. Был получен коэффициент пропорциональности между кодом PKS, подаваемым на линзу, и градиентом магнитного поля, возникающего в линзе. Этот коэффициент пропорциональности составил $-0,618$ Гс/(см * PKS).

6. Литература

1. Беркаев Д.Е. – Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук на тему: «ИНЖЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ В КОЛЛАЙДЕР ВЭПП-2000». – 2010. 77 с.

2. Мешков И.Н., Чириков Б.В. – «Электромагнитное поле» (т 1,2) - 1987. 416 с.