

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Ким Егор Олегович

КУРСОВАЯ РАБОТА

СМЕЩЕНИЕ МАГНИТНОЙ ОСИ КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛИНЗЫ ПУТЕМ СОЗДАНИЯ АСИММЕТРИИ ТОКОВ

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19304

Научный руководитель:

к.ф.-м.н А.А. Старостенко

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Аннотация

В данной работе исследуется смещение магнитной оси квадрупольной линзы с железным ярмом методом создания асимметрии токов в катушках на разных полюсах. Приведены и проанализированы результаты расчетов магнитного поля в апертуре, в результате чего была выявлена зависимость смещения магнитной оси в виде функции от соотношения токов и их суммы. Также исследование поля вблизи оси помогло выявить появление третьей (и более высоких) гармоник в связи с нарушением симметрии и их влияние на смещение магнитной оси. Все расчеты были проведены для двумерного случая при ненасыщенном магнитопроводе в программе для моделирования магнитов «Mermaid».

Ключевые слова: квадрупольные линзы, гармоники поля, измерение магнитного поля, комбинированные элементы, асимметрия токов, смещение магнитной оси, равновесная орбита.

Оглавление

Введение	4
Устройство квадруполья	4
Исследование зависимости модуля смещения от отношения токов	7
Исследование зависимости модуля смещения от суммы токов	8
Нахождение магнитной оси квадруполья.....	9
Нахождение коэффициентов для расчета смещения оси квадруполья с асимметрией токов	10
Заключение	12
Список литературы	13

Введение

В современных ускорителях часто бывают необходимы «комбинированные элементы». В частности, элементы с квадрупольным и дипольным полем используют в цикловых ускорителях для более удобного расположения равновесной орбиты внутри апертуры магнитного элемента. В обычной квадрупольной линзе для необходимого поворота электронного пучка равновесная орбита может находиться далеко от геометрического центра апертуры, что может привести к попаданию электронов в стенку вакуумной камеры. Избежать этого можно несколькими способами, например, увеличив линейные размеры апертуры.

Градиент магнитного поля (G_{max}) внутри вакуумной камеры не может превышать следующего значения:

$$G_{max} < \frac{B_{насыщения}}{R_{апертуры}},$$

где $R_{апертуры}$ – радиус апертуры, $B_{насыщения}$ – индукция поля, при котором магнитопровод становится насыщенным. Из этого следует, что при увеличении размеров апертуры максимальный градиент поля уменьшается. Однако, в определенных случаях требуется достаточно большой градиент. Тогда для того, чтобы избежать попадания в стенки вакуумной камеры, можно переместить равновесную орбиту вдоль оси симметрии квадрупольного поля. Тем самым, направив пучок электронов в геометрический центр квадрупольного поля, мы избежим попадания пучка в стенки вакуумной камеры и не уменьшим максимальное значение градиента магнитного поля. Далее будет рассматриваться двумерный случай при ненасыщенном магнитопроводе.

Устройство квадрупольного поля

Квадрупольной линзой называют устройство для фокусировки и поворота пучков заряженных частиц с помощью магнитного поля квадрупольной конфигурации. В идеальном случае полюса квадрупольной линзы являются

гиперболами, по бокам которых находятся катушки с током. Полюса играют роль сердечников.

Зависимость интеграла магнитного поля в линзах от координат записывается следующим образом [1;2]:

$$\frac{\int_{-\infty}^{\infty} B_r(r, \varphi, z) dz}{l_{\text{эфф}}} = \sum_{n=1}^{\infty} B_0 \left[\frac{r}{r_0} \right]^{n-1} (-a'_n \cos n\varphi + b'_n \sin n\varphi)$$

$$\frac{\int_{-\infty}^{\infty} B_\varphi(r, \varphi, z) dz}{l_{\text{эфф}}} = \sum_{n=1}^{\infty} B_0 \left[\frac{r}{r_0} \right]^{n-1} (a'_n \sin n\varphi + b'_n \cos n\varphi)$$

где, B_0 – амплитуда магнитного поля в центре линзы на радиусе r_0 , n – натуральное число определяющее номер

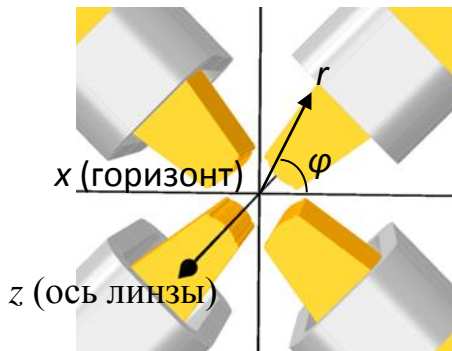


Рис. 1. Квадрупольная линза в пространстве координат.

натуральное число определяющее номер гармоники, b'_n и a'_n – мультипольные коэффициенты, $l_{\text{эфф}}$ – эффективная магнитная длина линзы. Направление z взято вдоль оси линзы, r и φ – полярные координаты в перпендикулярной плоскости к оси, угол φ отсчитывается от горизонтального направления x , начало координат находится в центре линзы (см. рис. 1).

Удвоенный номер гармоники показывает количество полюсов мультиполя, для которого эта гармоника основная. Например, гармоника $n=2$ является основной для квадрупольной линзы, $n=3$ для секступольной, а $n=4$ для октупольной, поэтому их соответственно называют квадрупольной, секступольной и октупольной гармониками.

В классическом квадруполе токи в катушках по модулю равны, при такой конфигурации точка нулевого магнитного поля находится в геометрическом центре. Меняя соотношения токов, можно добиться смещения этой точки по одной из осей симметрии линзы, что смещает равновесную орбиту дальше от геометрического центра.

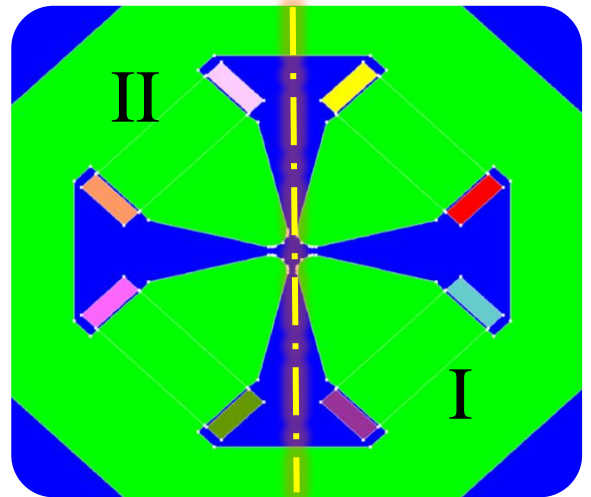


рис. 2 Двумерный случай квадрупольной линзы

Будем менять ток в двух группах катушек I и II (см. рис. 2), оставляя значение суммы токов равным между катушками внутри групп. Уменьшая ток в катушках группы II и увеличивая ток в катушках группы I, увидим, что точка нулевого поля смещается влево. Заметим, что модуль смещения зависит от двух факторов: отношения токов $\frac{I_1}{I_2}$ и суммы токов $I_1 + I_2$. Исследуем эту зависимость.

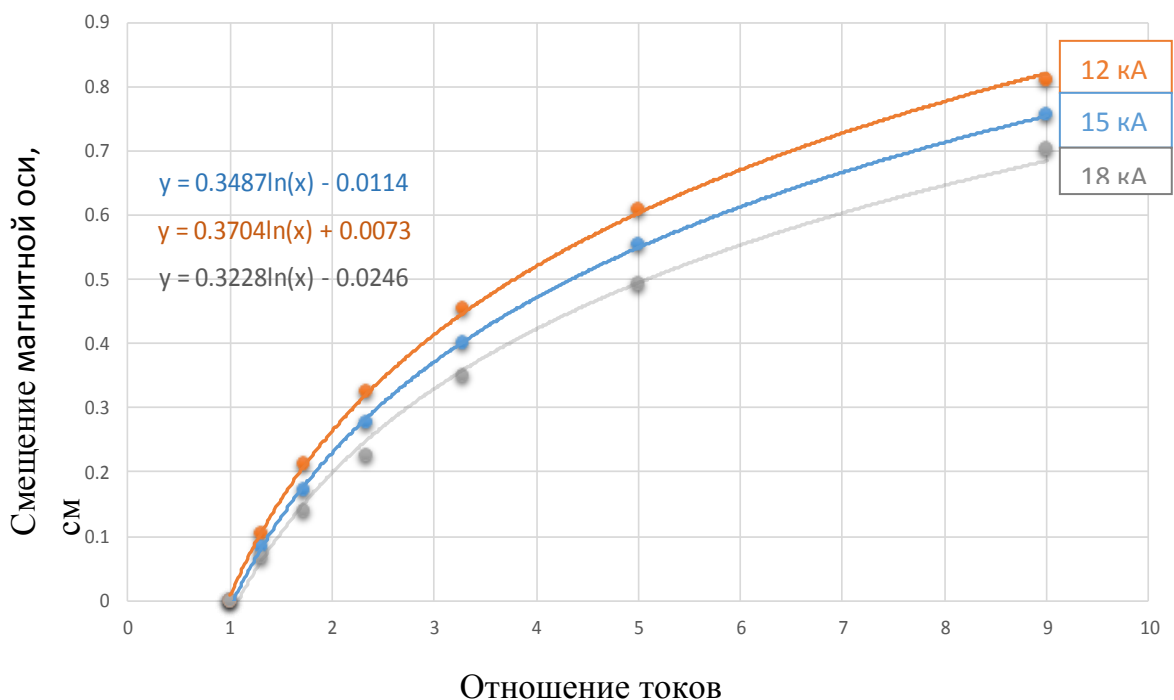


Рис. 3. График зависимости смещения оси от отношения токов

Исследование зависимости модуля смещения от отношения токов

Проведем серию расчетов магнитного поля в программе «Mermaid»: оставляя сумму токов $I_1 + I_2$ постоянной, будем менять отношение токов $\frac{I_1}{I_2}$ и записывать модуль смещения магнитной оси. Данные представим в виде точечного графика (см. рис. 3).

Проведем аппроксимирующие кривые. Наиболее подходящей функцией является логарифм, формула которого выписана соответствующим цветом на графике. Средняя ошибка аппроксимации при таком расчете равнялась 2,54% для всех данных и не превышала 5,5% для данных каждого цвета по отдельности.

Запишем функцию в общем виде, введя коэффициенты α и β :

$$x = \alpha \ln \frac{I_1}{I_2} + \beta$$

(x – смещение координаты магнитной оси, I_1 – ток в катушках первой группы, I_2 – ток в катушках второй группы).

Рассмотрим случай, когда отношение токов равняется единице. Тогда мы получим уравнение вида

$0 = \alpha \ln 1 + \beta$, тогда коэффициент β должен также равняться нулю. Но так

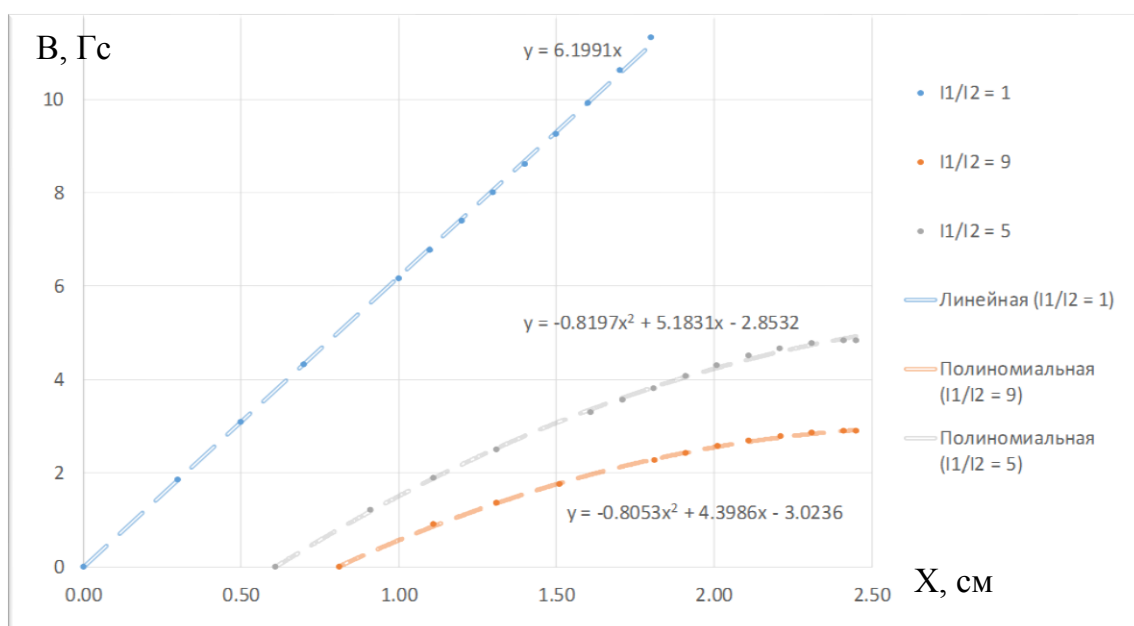


рис. 4 Зависимость индукции магнитного поля от расстояния вдоль оси симметрии квадруполья

как коэффициенты α и β постоянны для одной суммы токов, то β должен быть равен нулю при любом отношении токов. Однако, по графику (рис. 3) можно увидеть, что это не так. Для того, чтобы понять природу коэффициента β , проанализируем магнитное поле вблизи оси.

Заметим, что при отношении токов равном единице, зависимость модуля магнитной индукции от расстояния является линейной (рис. 4). Это демонстрирует основное свойство второй гармоники магнитного поля. Однако, при соотношении токов отличном от нуля линейная зависимость меняется на полиномиальную. Это говорит о появлении высших гармоник при нарушении симметрии токов. Для того чтобы уменьшить коэффициент β нужно создать обратную асимметрию путем изменения геометрии полюсов.

Исследование зависимости модуля смещения от суммы токов

Вернемся к графику (рис. 2). Заметим, что при увеличении суммы токов $I_1 + I_2$, коэффициент α уменьшается. Можно предположить, что существует прямая зависимость между этим коэффициентом и суммой токов. Для того чтобы исследовать эту зависимость обратимся к графикам на рис. 5.

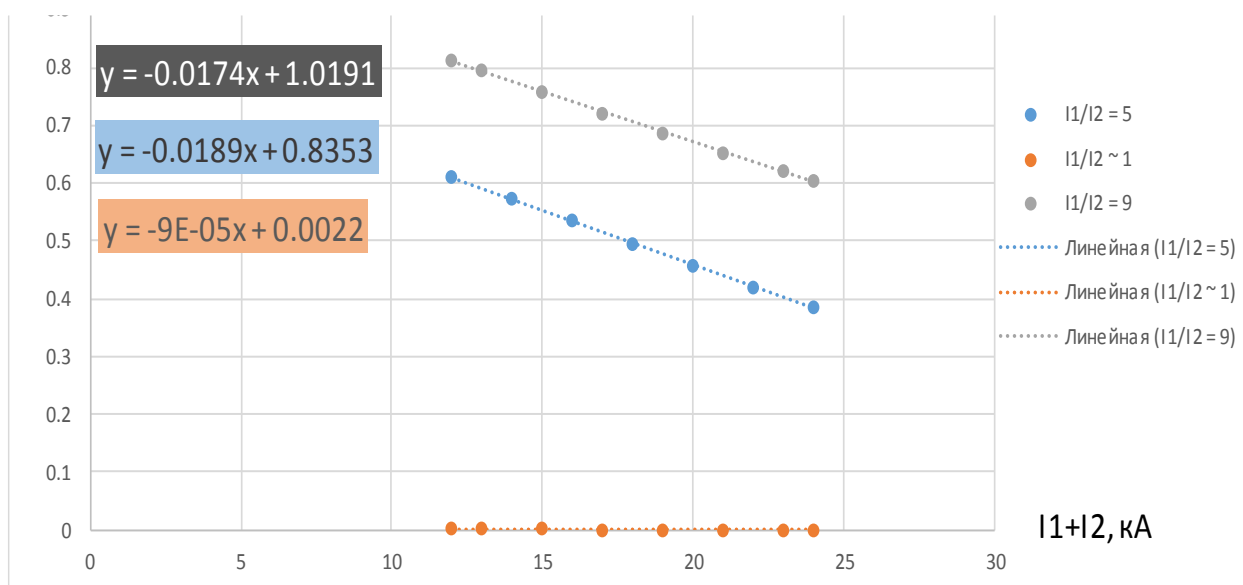


рис. 5 Зависимость смещения магнитной оси от суммы токов при постоянном соотношении

Заметим, что смещение магнитной оси линейно зависит от суммы токов, из чего можно сделать вывод, что коэффициент α также линейно зависит от этого параметра. Тогда мы можем записать следующую формулу:

$$\alpha = c_1(I_1 + I_2) + c_2,$$

Где коэффициенты c_1 и c_2 зависят от параметров самого квадрупольного поля, но постоянны для любой суммы токов и любого их соотношения.

Таким образом получим общую формулу для предварительных расчетов квадрупольного поля:

$$x = [c_1(I_1 + I_2) + c_2] \ln \frac{I_1}{I_2} + \beta, (1)$$

Нахождение магнитной оси квадрупольного поля

Измерения были проведены для случая равенства токов в катушках квадрупольной линзы (рис. 6). Эксперимент проводился при помощи измерительной каретки с двумя датчиками Холла, которая при помощи подвижки перемещалась по квадрупольному полю, а затем снималось поле в четырёх повернутых положениях каретки (0° , 90° , 180° , 270° угол между плоскостью каретки и плоскостью симметрии квадрупольного поля). Методика нахождения магнитной оси представляет собой следующую последовательность действий:



рис. 6 Квадрупольная линза

1) Калибровка измерительной каретки

(Производится внутри калибровочного диполя, при помощи датчиков ЯМР)

2) Проведение измерений поля внутри квадруполя

3) Анализ данных и расчет положения магнитной оси

По полученным данным (полные данные в файле приложение.xlsx) была составлена таблица (табл. 1), в которой рассчитано смещение магнитной оси относительно геометрического центра на глубине 20, 50 и 80 см внутри квадруполя. Расчет проводился из известного значения градиента квадруполя на данной глубине.

табл. 1 Смещение оси относительно геометрического центра линзы

L, cm	G, Gs/cm	Hall	B1	B2	B3	B4	$\Delta X, \mu\text{m}$		$\Delta Y, \mu\text{m}$	
20	-759,586	1	179,341	-181,265	178,5077	-179,256	13,22963	12,67318	-5,47236	-6,26805
		2	245,6574	-244,122	245,1146	-242,062	12,11673		-7,06375	
50	-759,975	1	179,5442	-183,652	178,3191	-177,336	35,08154	35,53304	-23,6828	-22,7726
		2	246,3932	-246,627	244,8754	-240,41	35,98453		-21,8624	
80	-759,688	1	180,2846	-181,904	178,147	-178,627	25,20242	24,57903	-5,30594	-6,26814
		2	246,5443	-244,866	244,7474	-241,515	23,95563		-7,23034	

Как видно из измерений, магнитная ось не отклоняется от геометрического центра линзы больше, чем на 40 микрометров по каждой из осей.

Погрешность измерений сводится к погрешности датчиков Холла и их калибровке датчиками ЯМР. Относительная погрешность датчиков ЯМР составляет 0,0005%, что составляет нижнюю границу погрешности измерений.

Нахождение коэффициентов для расчета смещения оси квадруполя с асимметрией токов

Для этого эксперимента магнитная ось находилась другим способом, в следствии того, что предыдущий метод способен находить отклонение оси от

геометрического центра в пределах 100 микрон, а смещение оси при асимметрии токов достигает порядка сантиметров.

Нахождение оси осуществлялось кареткой, расположенной в медианной плоскости квадруполья, в которой размещались 17 датчиков Холла. По показаниям этих датчиков, пользуясь рассчитанным градиентом поля, можно найти магнитную ось с точностью порядка миллиметров. Результаты измерений представлены в таблице (табл. 2) с указанием силы тока в катушках первой и второй группы. Следует отметить, что в данном случае ток в катушках измеряется в амперах, в то время как в расчетных данных программы Mermaid использовались килоАмпер-витки. Эти величины отличаются в $N \cdot 10^3$ раз, где N – число витков в катушке.

табл. 2 Измеренное и расчетное смещение магнитной оси

I1, А	I2, А	Сдвиг, см	Расчетный, см	Расхождение, см
60	10	1,5749	1,6568	0,0819
	20	0,9942	1,0197	0,0254
	30	0,6467	0,6466	0,0002
	40	0,3816	0,3815	0,0001
45	7,5	1,5728	1,6534	0,0806
	15	0,9934	1,0173	0,0239
	22,5	0,6450	0,6449	0,0002
	30	0,3808	0,3803	0,0005
	37,5	0,1707	0,1749	0,0042
30	5	1,5722	1,6499	0,0777
	10	0,9897	1,0148	0,0252
	15	0,6432	0,6431	0,0001
	20	0,3799	0,3792	0,0007
	25	0,1705	0,1743	0,0038

Для нахождения коэффициентов уравнения (1) были выбраны три пары токов в катушках ($I_1; I_2$): (60А; 30А), (60А; 40А), (30А; 15А). При подстановке значений, получим линейную систему уравнений, после решения которой запишем:

$$x = [1,1 \cdot 10^{-4}(I_1 + I_2) + 0,9133] \ln \frac{I_1}{I_2} + 0,0067 \quad (2)$$

Полученное уравнение (2) затем использовалось для расчета смещения в остальных измеренных случаях токов и найдено расхождение в эмпирических и расчетных данных. Из таблицы видно, что расхождение составляет доли миллиметра. Если улучшить погрешность метода нахождения смещения оси, то можно уменьшить и расхождение.

Заключение

Результатом работы является математическая формула, отражающая зависимость смещение магнитной оси от двух изменяемых параметров: соотношения токов двух групп катушек и их суммы:

$$x = [c_1(I_1 + I_2) + c_2] \ln \frac{I_1}{I_2} + \beta$$

В ходе работы было выявлено, что смещение магнитной оси логарифмически зависит от отношения токов $\frac{I_1}{I_2}$ и линейно от их суммы $I_1 + I_2$. Также было обнаружено появление 3 (и более высоких) гармоники и их влияние на смещение равновесной орбиты. Минимизировать влияние высших гармоник можно с помощью создания обратной асимметрии, путем изменения геометрии полюсов квадруполя. В дальнейшем планируется рассмотреть этот фактор. Также в планы входит детальное изучение трехмерного случае из-за появления увеличенного влияния высших гармоник. Наравне с этим будет рассмотрен случай насыщения магнитопровода. Выведенная в этой работе формула облегчит предварительный расчет элементов, совмещающих дипольное и квадрупольное поле.

Список литературы

1. P.J. Bryant. BASIC THEORY FOR MAGNETIC MEASUREMENTS // CERN Accelerator School 92-05, pp. 52-69.
2. A.K. Jain. BASIC THEORY OF MAGNETS // CERN Accelerator School 98-05, pp. 1-21.
3. Jack T. Tanable // «Iron dominated electromagnets»
4. Ю.В. Петенев // «Компенсация высших азимутальных гармоник квадрупольной линзы изменением профиля полюса»
5. В.М. Павлов // «Линейные ускорители: часть II »
6. И.Кооп // «Предложения по оптимизации оптической структуры накопительного кольца СКИФ»
7. П.Н. Бурдин, Т.А. Девятайкина, Э.С. Казанцева, Т.В. Рыбицкая, Б.А. Скарбо, А.А. Старостенко, А.С. Цыганов // «Улучшение качества поля квадрупольных линз при серийном производстве»