

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Бурдин Всеволод Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Проведение прецизионных стендовых измерений продольного
магнитного поля соленоида для ЛИУ**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19310

Научный руководитель:

Д.А. Старостенко

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н., А.А. Симонов

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Магнитная система линейного индукционного ускорителя (далее ЛИУ-2), обеспечивающая транспортировку и фокусировку пучка на мишень, состоит из импульсных соленоидальных линз и корректоров. Точность расчетов динамики пучка в транспортном канале ускорителя существенно повышается, когда в программу вводятся не расчетные, а измеренные распределения магнитных полей от магнитных элементов. Возникающие в случае применения импульсных источников питания нелинейные скин-эффекты в магнитном экране соленоида сложно учесть при моделировании. Кроме того, экранировка вакуумной камерой приводит к появлению задержки между максимумом магнитного поля внутри вакуумной камеры и максимумом тока в соленоиде, которую важно знать и учитывать при настройке ускорителя.

Целью работы являлось проведение прецизионных измерений распределения продольного магнитного поля на оси соленоида для ЛИУ-2.

В ходе работы были выполнены:

- измерения продольного распределения магнитного поля на оси соленоида;
- измерения временного интервала между максимумами тока в соленоиде и поля внутри вакуумной камеры;
- измерения влияния подводящих контактов на симметрию магнитного поля на оси соленоида;
- измерения зависимости величины магнитного поля в центре соленоида от тока в соленоиде с учетом вакуумной камеры;
- измерения стабильности импульсного источника питания на его средних параметрах;
- расчеты эффективной длины линзы.

Ключевые слова: линейный индукционный ускоритель, магнитная линза, экранировка, эффективная длина линзы.

Оглавление

1. Введение	4
2. Теоретическая часть.....	5
2.1 Калибровка катушки.....	5
2.2 Описание стенда.....	6
2.3 Методика измерений.....	7
3. Экспериментальная часть	9
3.1 Результаты измерения зависимости величины магнитного поля в центре соленоида от тока в соленоиде.....	9
3.2 Результаты измерений магнитного поля внутри линзы.....	10
3.3 Расчет эффективной длины линзы	11
3.4 Стабильность источника питания	11
3.5 Результаты.....	12
4. Список литературы	12

1. Введение

В исследованиях динамики сильноточных аксиально-симметричных пучков требуется учитывать влияние пространственного заряда и собственных полей пучка. Сила Лоренца, действующая на частицы внутри пучка, состоит из двух компонент: силы кулоновского расталкивания и сжимающей пучок силы, обусловленной взаимодействием движущихся зарядов со своим собственным магнитным полем. С ростом энергии расходимость пучка квадратично уменьшается. На энергиях 10 – 20 МэВ, характерных для индукционных ускорителей, требуется внешнее продольное магнитное поле для компенсации кулоновского расталкивания. Одним из решений такой задачи является применение аксиально-симметричных магнитных линз – соленоидов.

Установка экрана из магнито-мягкого железа вокруг соленоида снижает расплывание магнитного потока вдоль оси z и приводит к увеличению силы соленоидальной линзы [1, стр. 94].

Однако, в импульсном режиме работы применение экрана приводит к возникновению вихревых токов в экране, в элементах вакуумной камеры, к

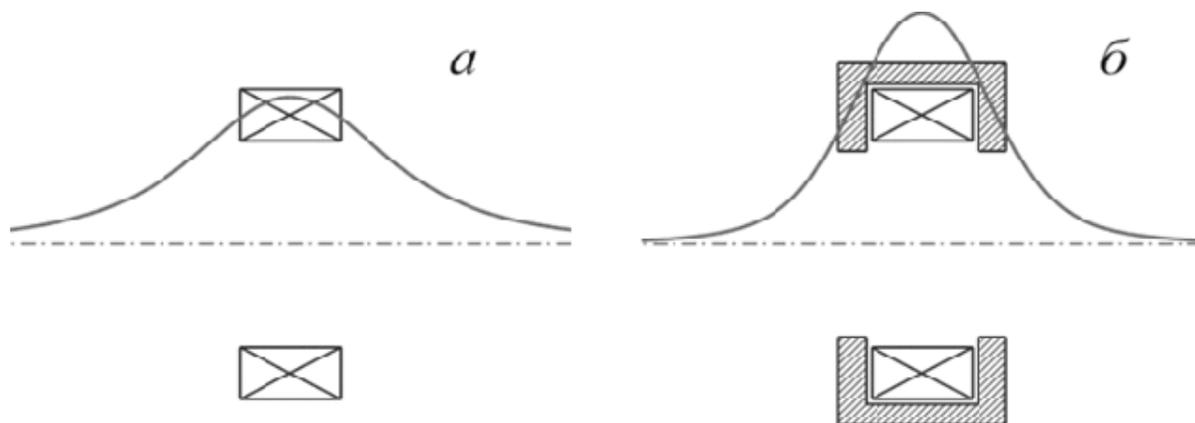


Рис. 1. Распределение магнитного поля на оси магнитных линз различных конструкций.

а – линза без экрана; б – линза с железным экраном

нелинейным изменениям магнитной проницаемости, в том числе к насыщению экрана. Данные эффекты сложно учесть при моделировании, более оптимальным вариантом является непосредственное измерение магнитного поля внутри линзы.

Измерение изменяющегося во времени магнитного поля нельзя выполнить стандартным образом с помощью датчиков Холла на стендах с постоянными источниками питания. Поэтому магнитные измерения проводились индукционным датчиком на специальном стенде, который позволяет с высокой точностью интегрировать производную магнитного поля в интервале от нескольких микросекунд до десятков секунд.

2. Теоретическая часть

2.1 Калибровка катушки

Форму, габариты и число витков катушки для измерения импульсных магнитных полей выбирают исходя из величины и длительности измеряемого поля, и требуемой точности измерений. В нашем случае была изготовлена катушка на капролоновом каркасе со средним диаметром 5 мм и числом витков 86 из медного провода диаметром 0.19 мм.

Калибровка измерительной катушки выполнялась путем прецизионных измерений наводимой электродвижущей силы (ЭДС) в катушке за счёт её перемещения из области постоянного магнитного поля величиной в несколько Тл, в область нулевого поля - магнитный экран. Магнитный поток, проходящий через неё изменяется по закону электромагнитной индукции: $d\varepsilon = -\frac{Nd\Phi}{dt}$, где Φ – магнитный поток, N – количество витков в катушке, ε – ЭДС, t – время. Магнитным потоком называют величину $\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha$, где B – модуль вектора магнитной индукции, S – площадь контура, через который проходит магнитный поток, α – угол между векторами B и нормалью к поверхности S . В нашем случае угол между вектором B нормалью к поверхности S был равен нулю, поэтому уравнение магнитного потока можно переписать $\Phi = BS$. Тогда уравнение электромагнитной индукции примет вид: $d\varepsilon = -\frac{dB}{dt}NS$, где величина NS является характеристикой катушки и не зависит от внешних факторов. Зная эту величину и ЭДС, измеряемую при изменении магнитного потока, можно вычислить магнитное поле.

2.2 Описание стенда

В состав стенда входит импульсный источник питания ГИД-160 (рис. 2), параметры источника приведены в таблице 1, радиостойка с крейтом управления и цифровым интегратором Volt - second to Digital Converter (VsDC2), компьютер. Внутри соленоида (рис. 3) на оси расположена катушка, закрепленная в капролоновой втулке (рис. 4) К втулке прикреплена пластиковая трубка, проградуированная по длине с шагом в 5мм. Сигнал с катушки – производная магнитного поля, регистрируется с помощью VsDC2. Отношение шума интеграла к вольтсекундной площади импульса не более 10^{-6} , ошибка интегрирования не хуже 10^{-5} на длительностях порядка 1 мс [2]. Основные параметры интегратора приведены в таблице 2.



Рис.2. ГИД-160



Рис. 3. Магнитная линза

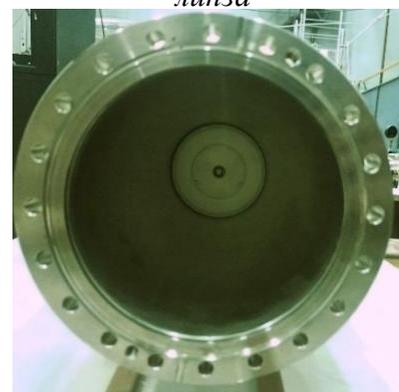


Рис. 4. Измерительная катушка внутри линзы

Диапазон напряжения накопителя	$\pm 1000\text{В}$
Емкость накопителя	320мкФ
Максимальная энергия выходного импульса	160Дж
Максимальный импульсный ток	600А
Частота циклов перезарядки	0,25Гц
Точность стабилизации напряжения	$<0,1\%$
Напряжение питания	+24В
Конструктив исполнения	3U x 21НР (высота 130мм, ширина 100мм, глубина 235мм)

Таблица 1. Параметры ГИД-160

Параметры		VsDC2 (CAN)	VsDC3(VME)
Ошибка интеграла относительно $U_{\text{шк}}T_{\text{инт}}$	$T_{\text{инт}} = 5 \text{ мкс}$	10^{-4}	
	$T_{\text{инт}} = 50 \text{ мкс}$	$5 \cdot 10^{-5}$	
	$T_{\text{инт}} \geq 500 \text{ мкс}$	10^{-5}	
Шум интеграла относительно $U_{\text{шк}}T_{\text{инт}}$	$T_{\text{инт}} = 10 \text{ мкс}$	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}
	$T_{\text{инт}} = 1 \text{ мс}$	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-7}$
	$T_{\text{инт}} \geq 500 \text{ мс}$	$5 \cdot 10^{-7}$	10^{-7}
Нелинейность от $-U_{\text{max}}$ до $+U_{\text{max}}$		$\pm(2 \cdot 10^{-5})$	
Разрядность АЦП		24 бита	
Частота выдачи отсчётов F_{DRDY}		312,5 кГц	
Эффективная разрядность в полосе 110 кГц		17	18
Задержка по времени при внешних импульсах Старт/Стоп		$21 \pm 2 \text{ нс}$	$21 \pm 2 \text{ нс}$

Таблица 2. Параметры VsDC2.

2.3 Методика измерений

1. Измерение распределения магнитного поля вдоль оси линзы выполнялось путем перемещения измерительной катушки вдоль геометрической оси соленоида с шагом в 5 мм. Для повышения точности в каждой точке выполнялось по 5 измерений.

2. Построение зависимости магнитного поля внутри вакуумной камеры в центре соленоида от напряжения импульсного источника питания ГИД-160

выполнялось путем установки измерительной катушки в центр соленоида и подстройкой времени остановки интегратора к моменту нулевой производной магнитного поля. Подстройка времени остановки интегратора является важным в таких измерениях, поскольку оно изменяется в зависимости от амплитуды тока и его скорости нарастания в соленоиде.

3. Построение зависимости временного интервала между максимумом поля внутри вакуумной камеры и максимумом тока в линзе выполнялось путем дополнительными ко второму пункту измерениями тока.

4. Проверка пригодности применения импульсного источника питания ГИД-160 на ускорителе ЛИУ-2. Согласно расчетам динамики пучка, отклонение поля в соленоиде на уровне ± 1 Гс не влияет на качество фокусировки и является допустимым. Стабильность магнитного поля на уровне 650 Гс за 400 импульсов оказалась $\pm 0,15$ Гс, что удовлетворяет расчетам.

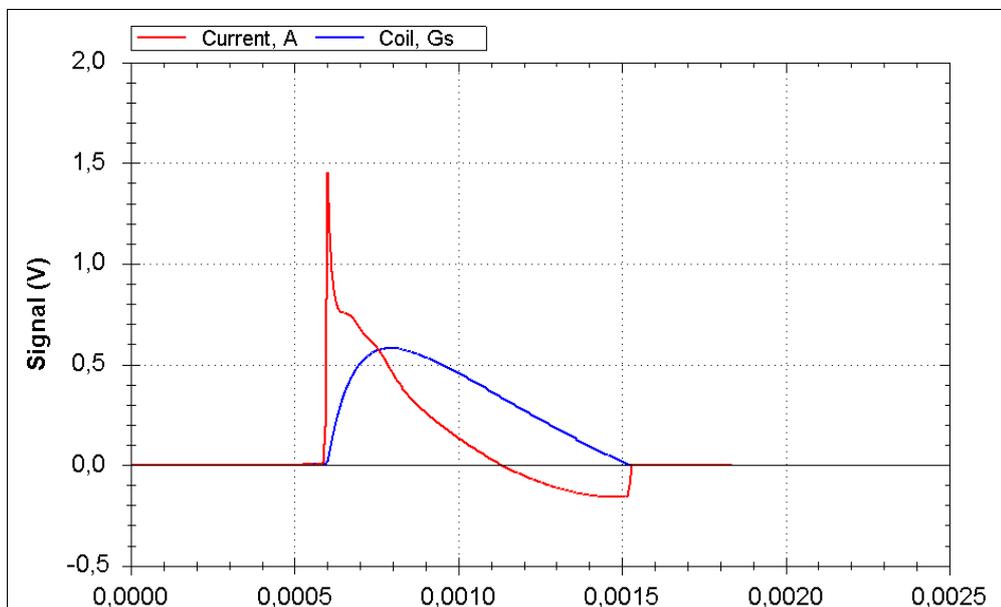


Рис. 5. Зависимость сигналов тока (красный сигнал) и производной магнитного поля (синий сигнал). Остановка интегрирования в максимуме поля.

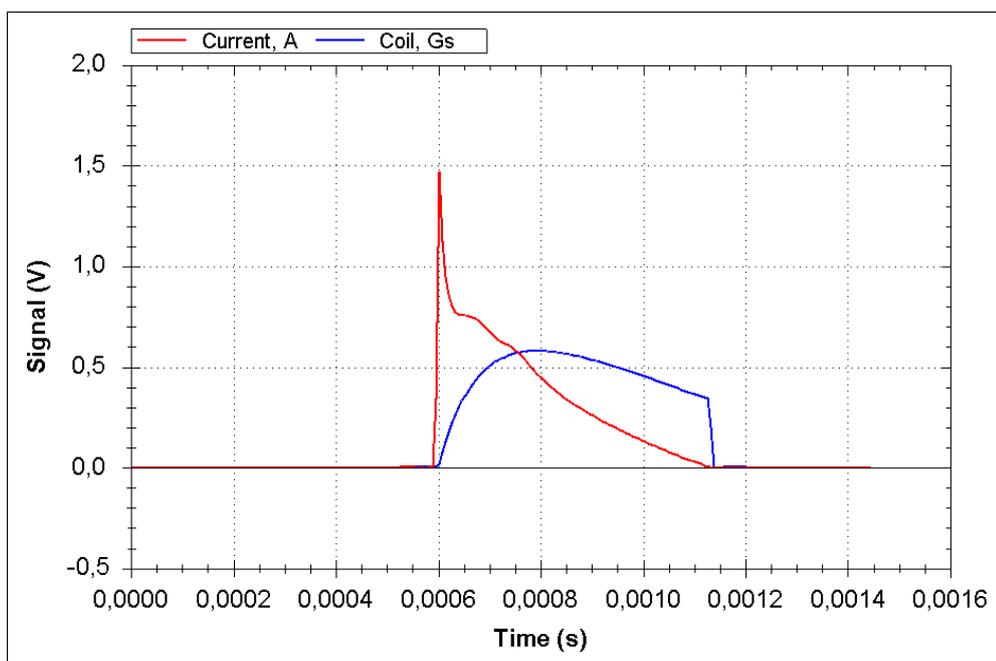


Рис. 6. Зависимость сигналов тока (красный сигнал) и производной магнитного поля (синий сигнал). Остановка интегрирования в максимуме тока.

3. Экспериментальная часть

3.1 Результаты измерения зависимости величины магнитного поля в центре соленоида от тока в соленоиде

На рис. 7 изображена зависимость магнитного поля внутри вакуумной камеры в центре соленоида от тока в соленоиде. Эти данные позволяют настраивать ускоритель, используя результаты моделирования и измеренные значения токов в каждом соленоиде.

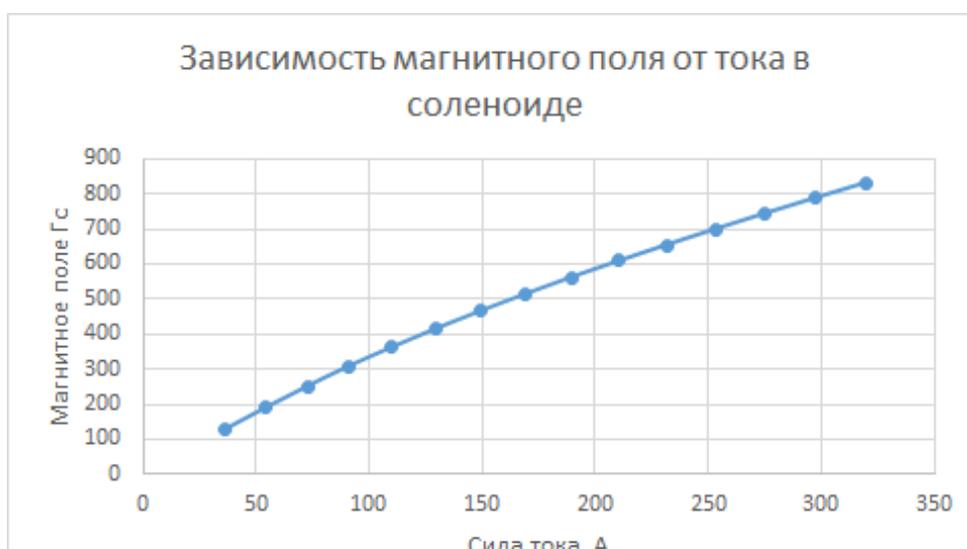


Рис. 7. Зависимость магнитного поля от тока в соленоиде

3.2 Результаты измерений магнитного поля внутри линзы

Магнитное поле линзы вдоль оси z, измеренное при 400В с шагом 0.5 см

рис. 8.

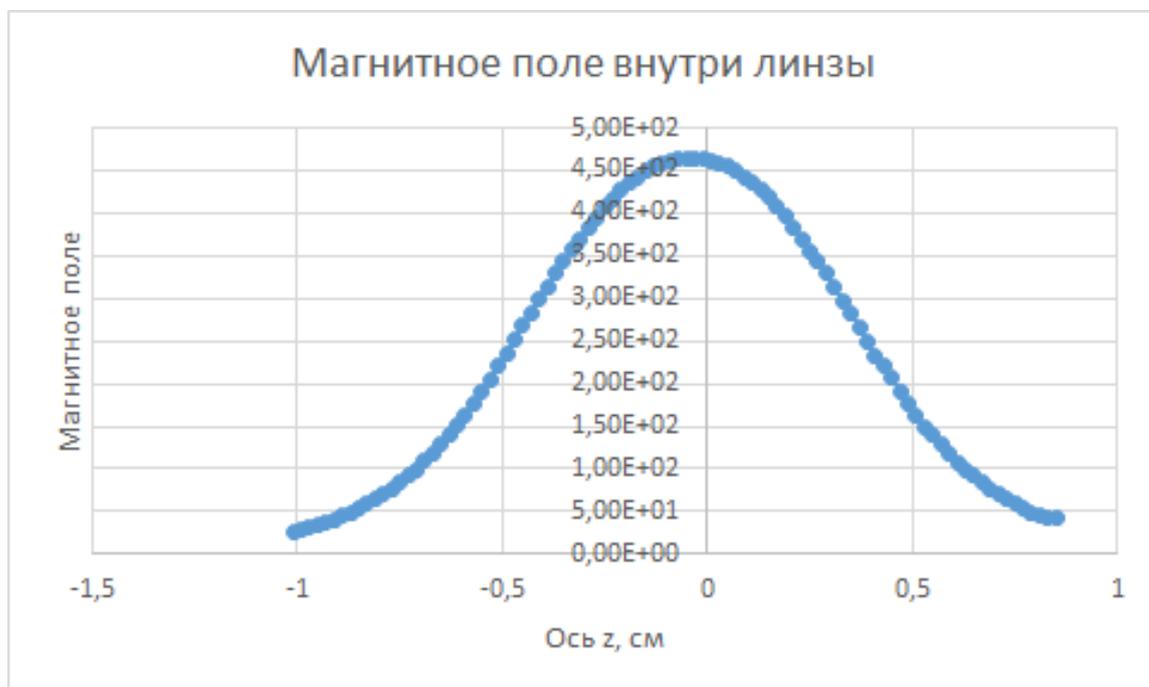


Рис. 8. Распределение магнитного поля внутри линзы

То же самое магнитное поле линзы вдоль оси z (рис. 9), измеренное при 400В с шагом 0.5 см, но в этот раз линза была повернута на 180 градусов.

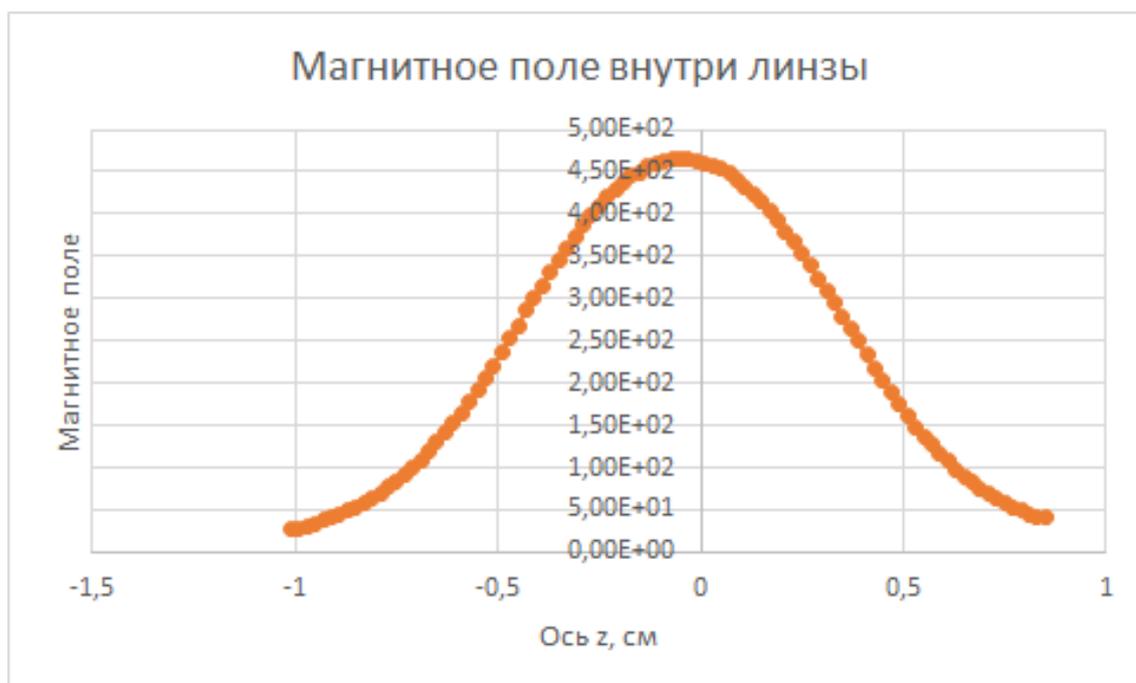


Рис. 9. Распределение магнитного поля внутри линзы при развороте на 180 градусов

Сравнение двух зависимостей (рис. 10):

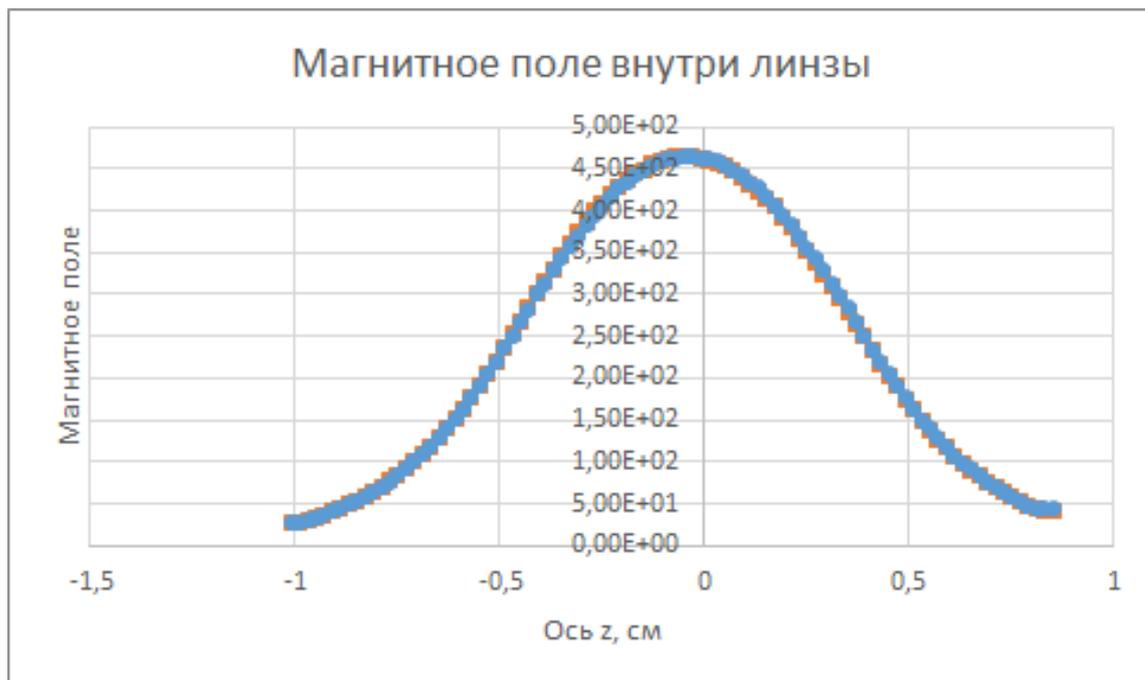


Рис. 10. Сравнение распределений магнитного поля внутри линзы

Как видно, измерения совпадают при развороте линзы на 180 градусов. Это позволяет сделать вывод о том, что несимметрично выполненные выводы из соленоида не вносят искажений в симметрию создаваемого магнитного поля.

3.3 Расчет эффективной длины линзы

Расчет эффективной длины линзы был выполнен численно методом прямоугольников [3].

$$L_{eff} = \sqrt{\frac{2 \int_{-\infty}^{+\infty} B_z^2 dz}{\int_{-\infty}^{+\infty} B_z'^2 dz}}$$

Полученное значение для эффективной длины $L_{eff} = 19,4$ см.

3.4 Стабильность источника питания

В режиме работы источника питания на нагрузку в виде соленоидальной линзы при $U=400$ В, $I=149$ А и периодом следования между импульсами 6

секунд относительная погрешность тока в линзе составила 0,045% за 80 импульсов.

3.5 Результаты

В процессе работы были получены следующие результаты:

- измерено продольное распределение магнитного поля на оси соленоида;
- измерен временной интервал между максимумами тока в соленоиде и поля внутри вакуумной камеры;
- измерено влияние подводящих контактов на симметрию магнитного поля на оси соленоида;
- измерена зависимость величины магнитного поля в центре соленоида от тока в соленоиде с учетом вакуумной камеры;
- измерена стабильность импульсного источника питания на его средних параметрах;
- вычислена эффективная длины линзы.

4. Список литературы

1. А. В. Иванов, «Динамика заряженных частиц и интенсивных пучков в стационарных полях». 2018, 228 с.
2. А. М. Батраков, И. В. Ильин, А. В. Павленко. «Прецизионные цифровые интеграторы сигналов с точной синхронизацией». Автометрия. 2015. Т. 51, № 1.
3. Н. А. Винокуров, «Лекции по электронной оптике для ускорительных физиков». 73 с.