



Факультет физики

Москва
2024

Измерение однородности поля в электромагните Отчет о проделанной работе

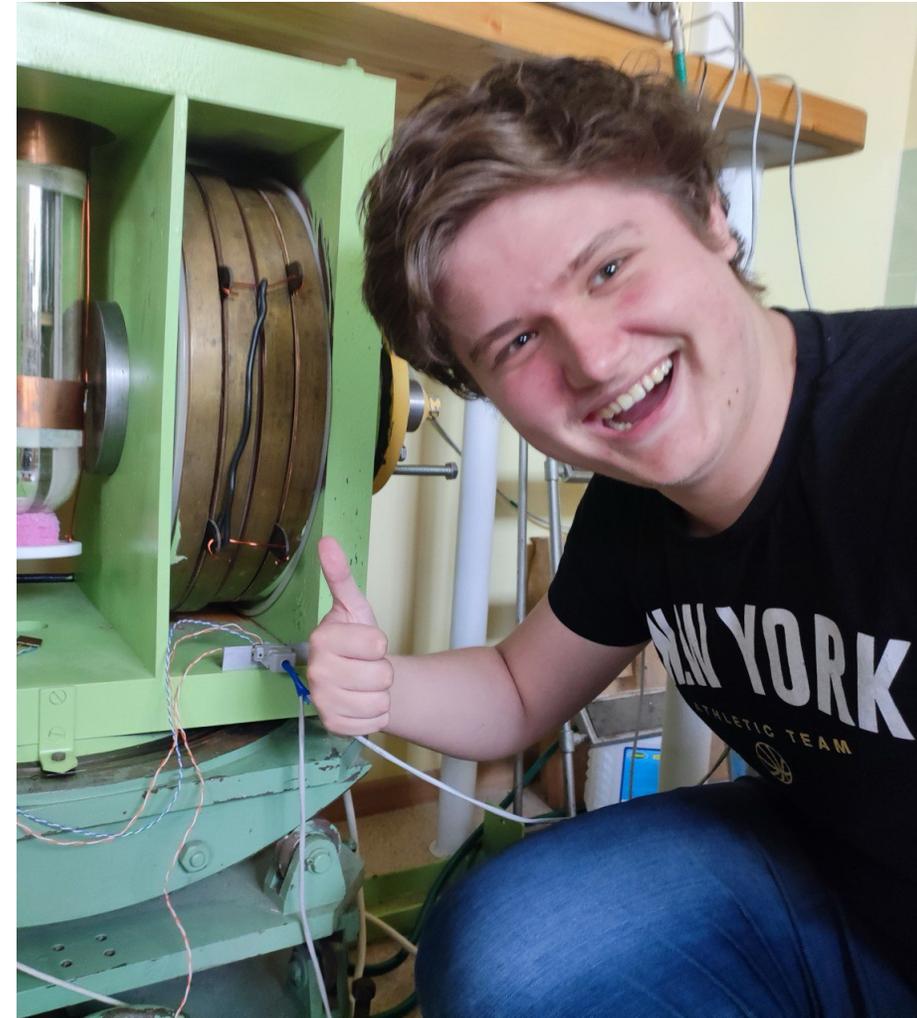
Ряжапов Айдар, Дмитрий Малиницкий



Постановка задачи

В ходе работы было поставлено несколько задач:

- 1) С максимальной возможной точностью измерить неоднородность поле в электромагните
- 2) Получить карту измеренного поля
- 3) Попробовать аппроксимировать полученные данные полиномом
- 4) Выявить минимальный набор точек, для создания сетки магнитного поля



Разложение поля

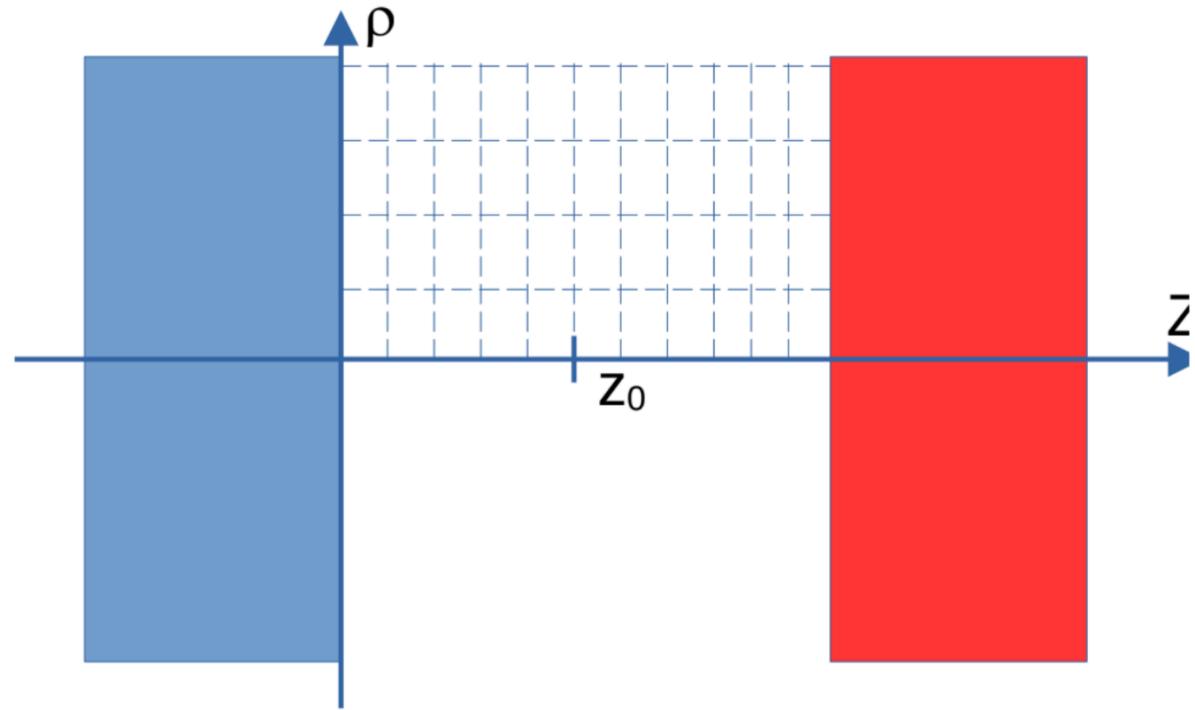
Запишем уравнения Максвелла для поля и рассмотрим разложение в ряд Тейлора радиальной и аксиальной компоненты поля

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad \operatorname{rot} \vec{B} = 0$$

$$\begin{cases} B_z(z, r) = \sum_n a_n^m (z - z_0)^m r^{n-m} \\ B_r(z, r) = \sum_n b_n^m (z - z_0)^m r^{n-m} \end{cases}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rB_r)}{\partial r} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r} = 0$$

$$\begin{cases} b_n^m (n - m + 1) = -a_n^{m+1} (m + 1) \\ a_n^m (n - m) = b_n^{m+1} (m + 1) \end{cases} \implies a_n^{m-2} = \frac{-m(m-1)}{(n-m+2)^2} a_n^m.$$



Первый подход

Для начала мы реализовали, самый прямолинейный способ, вырезать измерительное поле из бруска. Однако в ходе измерений, мы столкнулись с некоторыми проблемами:

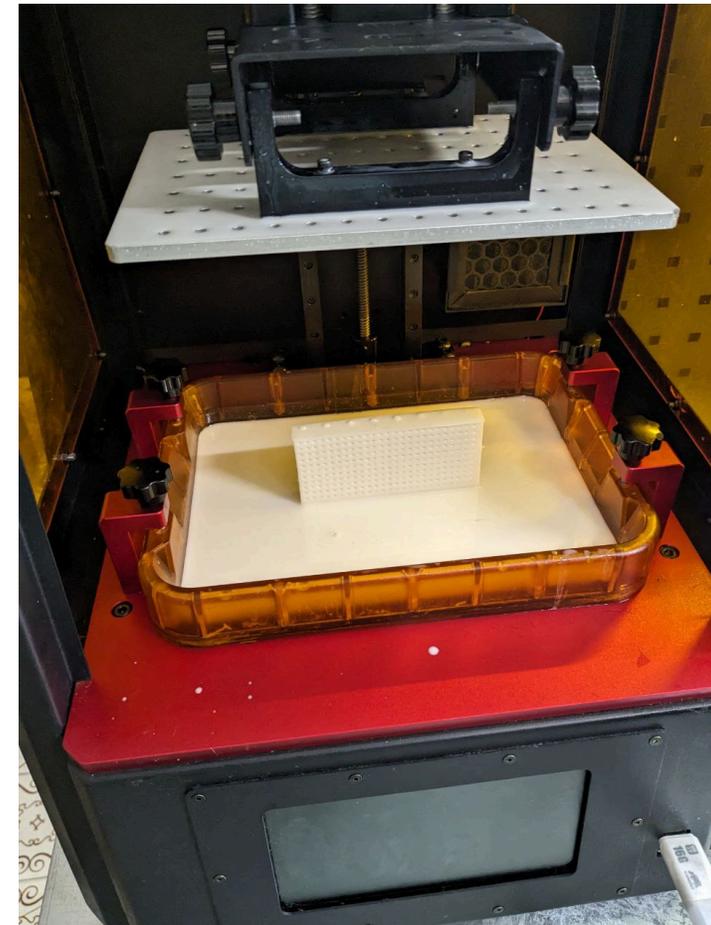
- 1) Ужасная точность позиционирования бруска
- 2) Неудовлетворительная точность измерения, из-за плохого позиционирования датчика хола





Второй подход

Для решения возникших проблем, мы решили воспользоваться 3д печатью. Так как у нас в доступе на факультете физики был фотополимерный 3д принтер, мы решили им воспользоваться. В ходе печати возникали некоторые трудности, введу не знания технологии, и того что данная технология не очень подходит под нашу задачу.

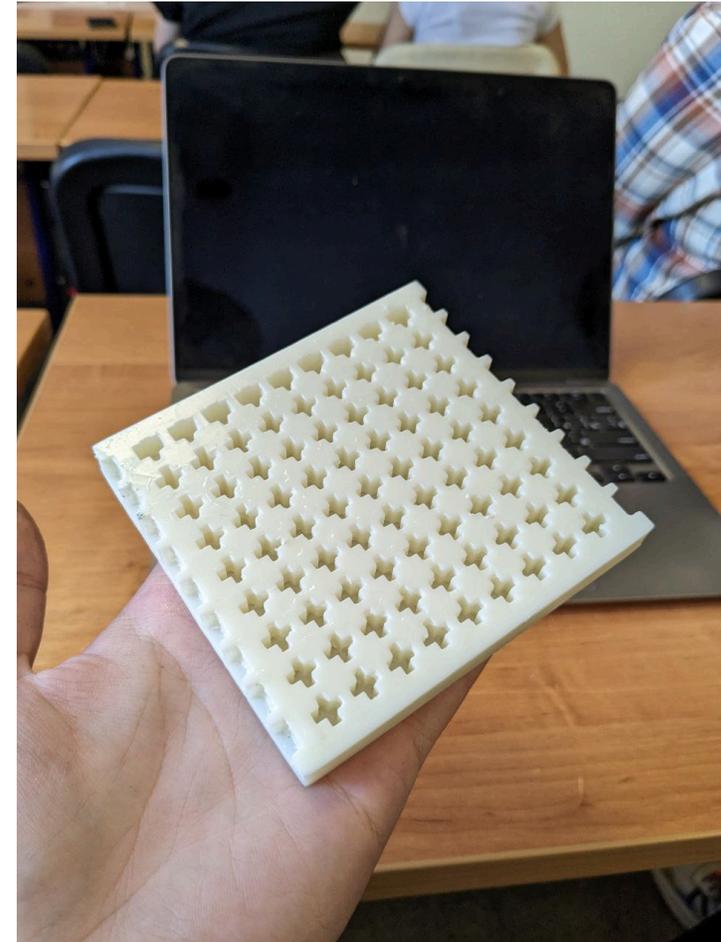


Ошибка печати



В целом, деталь была напечатана, но и с ней возникли некоторые проблемы:

- 1) Очень не удобный в техническом плане метод
- 2) Проблема с усадкой смолы
- 3) Проблема с центровки сетки

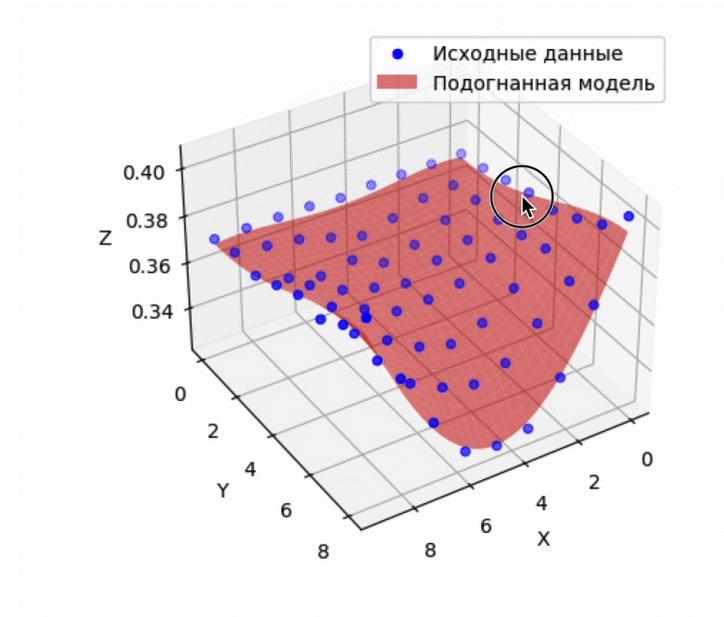


Однако, уже так у нас получились достаточно приемлемые данные, где ось Z это поле в теслах, а Y и X координаты точки измерения в сантиметрах. Мы смогли аппроксимировать эти данные полиномом 5 степени, получились достаточно приемлемые результаты

$$R^2 = 0.94$$

Так же в ходе работы было выяснено, что достаточно только крайних точек (32 штуки), для получения полного поля, погрешность возрастет примерно на 1%.

При использовании всего 8 точек, отклонение составит уже около 10%, однако для оценки кривизны, и таких данных достаточно



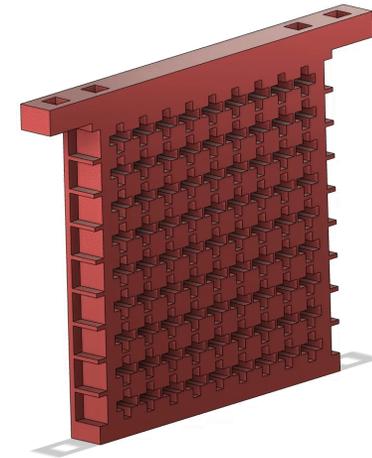


Третья реализация

Мы решили учесть все ошибки предыдущих моделей, и решили изготовить новую измерительную сетку путем FDM (fused deposition modeling) 3д печати.

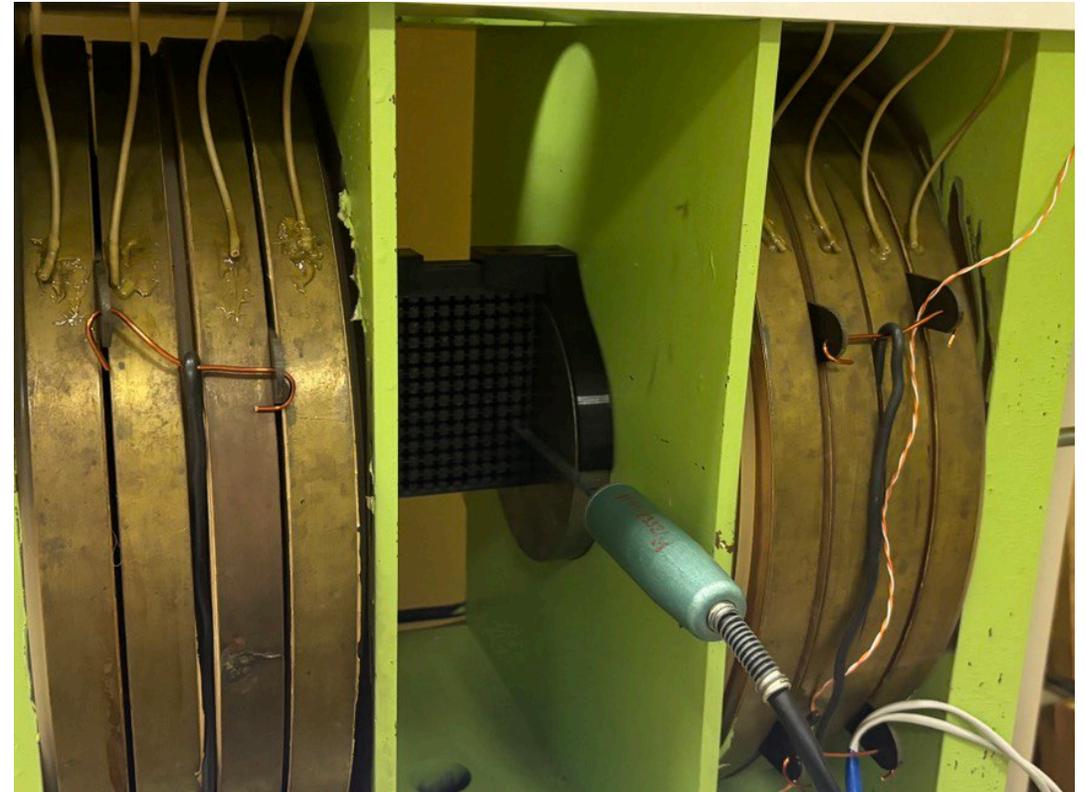
Этот способ больше подходит для данной задачи. Таким образом мы решили первые 2 проблемы, из предыдущей реализации.

Для решения проблемы центровки, была напечатана модель опирающаяся на грани магнита, с помощью этого метода мы с точностью до нескольких миллиметров смогли расположить нашу модель



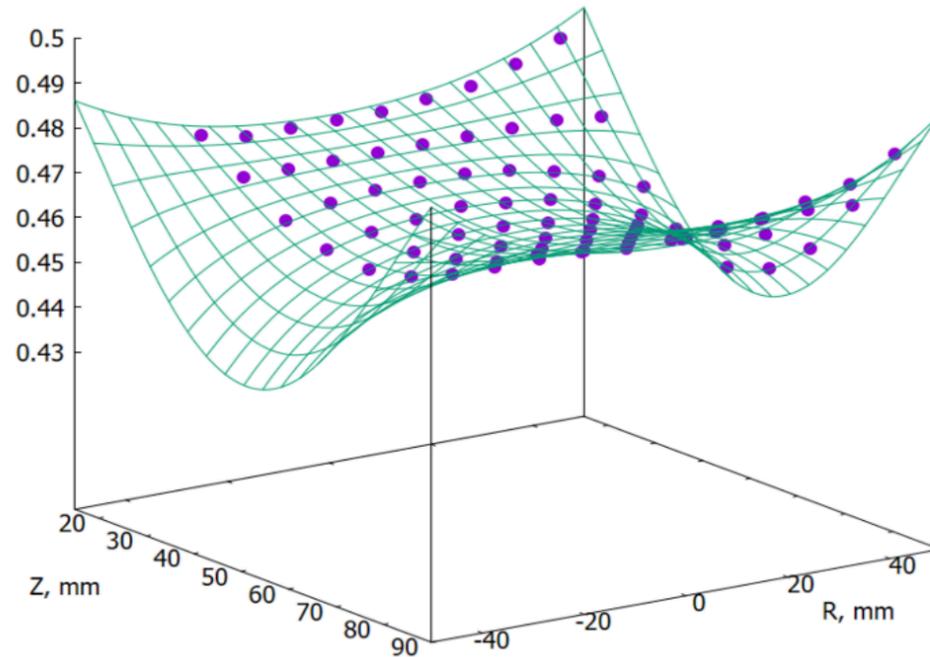
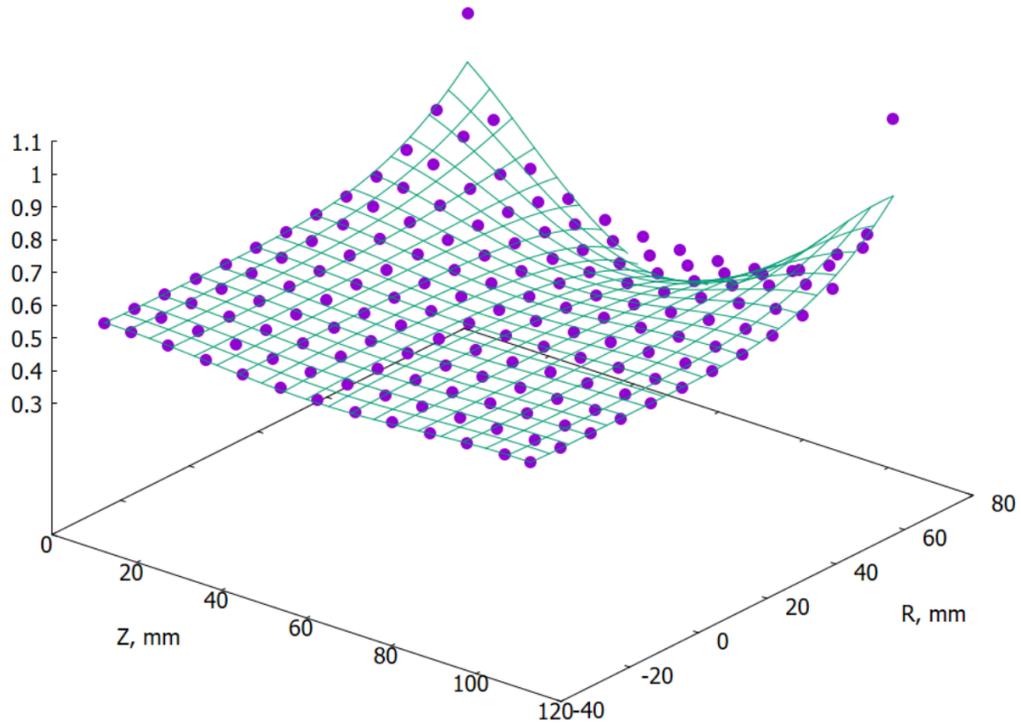


Решив все проблемы, мы провели измерения и получили
ещё более точное значение кривизны поля





Подогнанные данные





Вывод

- 1) Мы научились строить различные сетки на 3d принтере и оптимизировали процесс измерения, убрав излишние неточности
- 2) Подогнали полиномом наши измеренные данные
- 3) Построили сетку магнитного поля внутри зазора электромагнита