

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Прокопьев Матвей Андреевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Разработка магнитного зонда для измерения высокочастотных полей
геликонных волн в плазме**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19306

Научный руководитель:

Кузьмин Е.И.
Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Солдаткина Е.И.
Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

**Разработка магнитного зонда для измерения высокочастотных полей
геликонных волн в плазме**

Прокопьев Матвей Андреевич

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа № 19306, 3 семестр, 2020 год.

Научный руководитель:

Кузьмин Евгений Игоревич

Аннотация

Целью работы являлась разработка зонда для измерений магнитного поля в высокочастотных плазменных разрядах. Для этого были рассчитаны оптимальные параметры магнитного зонда, проведены эксперименты по фильтрации электростатических наводок и калибровка зонда по известному магнитному полю для определения коэффициента чувствительности зонда, оценены погрешности полученных значений. Полученный зонд предполагается использовать для измерений в плазменных системах с геликонным разрядом.

Ключевые слова: магнитный зонд, диагностика плазмы, ВЧ геликонный разряд.

Оглавление

1. Введение – 4
2. Описание зонда – 5
3. Описание методики эксперимента – 7
4. Экспериментальные результаты – 9
5. Заключение – 12
6. Список использованной литературы – 12

1. Введение

Высокочастотный плазменный разряд в зависимости от величины подводимой ВЧ мощности бывает трех видов – емкостной (Е-разряд), индукционный (Н-разряд) и волновой (W-разряд). Волновой режим характеризуется наличием в плазме продольных электромагнитных волн с круговой поляризацией (геликонов), возникающих при наличии в плазме внешнего магнитного поля и при частотах $\sim 10^7 \div 3 \cdot 10^7$ Гц. Благодаря высокой эффективности поглощения вводимой в разряд энергии такие системы характеризуется большей по сравнению с другими ВЧ разрядами степенью ионизации газа, а также высокой плотностью при относительно низких температурах, что определяет их практическую значимость, в том числе как инструмент для проведения экспериментальных исследований. Геликонные плазменные источники в неоднородном внешнем магнитном поле все еще слабо изучены, и распределение высокочастотного магнитного поля в разряде играет ключевую роль в понимании механизмов генерации высокочастотного разряда. [1]

Основным преимуществом зондовых измерений является возможность получения полного пространственного распределения измеряемых параметров плазмы, в отличие от большинства других методов диагностики, дающих линейное распределение. При этом одним из основных недостатков зондовой диагностики является возмущение, вносимое в плазму. Тем не менее, зондовые измерения позволяют получить пространственное распределение ВЧ магнитного поля. Наиболее часто используемым типом зонда для измерений магнитного поля является магнитный зонд на основе закона индукции Фарадея, что связано с легкостью его изготовления по сравнению с другими датчиками магнитного поля. [3, гл. 9] [4, гл. 3]

Целью работы является разработка магнитного зонда, а также его калибровка с целью минимизации электростатических наводок и определения точности измерения магнитного поля для дальнейших экспериментов с ВЧ плазменным разрядом.

2. Описание зонда

Магнитный зонд представляет собой катушку, находящуюся внутри диэлектрической колбы, помещаемую в плазму для измерений (рис. 1). Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, ЭДС индукции пропорциональна производной полного магнитного потока через катушку, считая магнитное поле однородным внутри катушки, получаем:

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

где N – число витков катушки, A – эффективная площадь, B – компонента магнитного поля, перпендикулярная плоскости витков катушки. Меняя ориентацию катушки, можно измерить все компоненты магнитного поля. Считая $B \propto B_0 e^{i\omega t}$, получаем:

$$B_0 = \frac{U}{\omega NA} = K_B U \quad (2)$$

где $K_B = 1/\omega NA$ – коэффициент пропорциональности между измеряемым полем и ЭДС индукции.

В геликонном разряде ВЧ колебания плазменного потенциала создают емкостные наводки на зонд, искажающие измерения магнитного поля. Для уменьшения наводок в конечном сигнале в данной работе применяется балансный трансформатор [2] (рис. 2). Принцип его действия заключается в следующем: при подключении контакта к средней точке первичной обмотки балансного трансформатора ток I_e , создаваемый емкостной наводкой, стекает по этому выводу, при этом на половине первичной обмотки трансформатора создается напряжение $V_b/2 + V_e$, на другой - $V_b/2 - V_e$, что создаёт на вторичной обмотке напряжение амплитудой V_b , фильтруя наведённый электростатический сигнал.



Рис. 1. Магнитный зонд

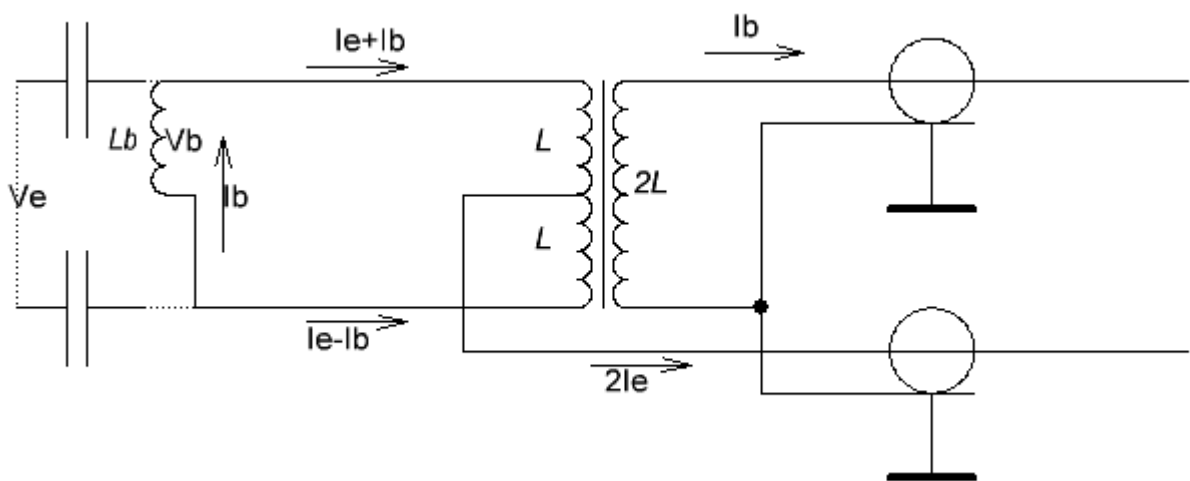


Рис. 2. Электрическая схема измерений методом балансного трансформатора.

Основными характеристиками зонда являются пространственное и временное разрешения и чувствительность, также важна минимизация возмущений, вносимых зондом в плазменную систему, которые определяются прежде всего размерами зонда. Пространственное разрешение определяется линейными размерами зонда, чувствительность – общей эффективной площадью витков. Временное разрешение имеет смысл верхней границы диапазона частот электромагнитных колебаний, на которые реагирует измерительная система, и определяется постоянной времени $\tau = L/X$, где L – индуктивность катушки, X –

волновое сопротивление соединительных кабелей [4, стр. 63] (для коаксиального кабеля характерная величина X порядка 50 Ом).

Для катушек зонда был выбран линейный размер (длина и диаметр) 3,0 мм, что дает достаточные пространственное разрешение и чувствительность. Измерительное оборудование допускает дальнейшее уменьшение размера и сопутствующее снижение чувствительности. При таких размерах индуктивность катушки, определяемая формулой $L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$, равна $L \approx 10^{-7}$ Гн, как следствие, постоянная времени $\tau \approx 2 \cdot 10^{-9}$ с много меньше любых ожидаемых временных периодов э.-м. волн в плазме.

3. Описание методики эксперимента

Применение балансного трансформатора позволяет значительно снизить уровень наводок в измеряемом сигнале, но некоторая часть емкостной наводки создаёт паразитную компоненту в измеряемом сигнале V_2 . Использование фарадеевского экрана позволит определить эффективность фильтрации помех и измерить долю паразитного электростатического сигнала в V_2 , что с учетом известного V_1 позволит ее вычесть для дополнительного повышения точности. Калибровка зонда по известному магнитному полю позволяет определить коэффициент пропорциональности K_B , который может отличаться от теоретической оценки (2), что позволит повысить точность измерений магнитного поля.

Для определения величины паразитного сигнала, наводимого на V_2 применялся фарадеевский экран. Схема калибровки состоит из двух экранов; на внутренний экран с генератора сигналов АКПП-3407/4А подается переменное напряжение V_g относительно внешнего экрана, который заземлен через генератор. Так как клетка Фарадея экранирует переменное магнитное поле, сигнал, измеряемый на вторичной обмотке, является нескомпенсированной электростатической наводкой на измеряемый сигнал V_2 : $V_b = V_2 - k_f V_1$, $k_f = (V_2/V_1)_0$.

Второй используемый в работе вид калибровки – калибровка с помощью поворота магнитного поля. Идея метода заключается в том, что при повороте зонда в магнитном поле на 180° магнитная составляющая сигнала меняет знак, в то время как электростатическая остается неизменной, что позволяет проверить уровень электростатической наводки в отфильтрованном сигнале V_b . Для этого используются катушка Гельмгольца и соленоид (см. рис. X):

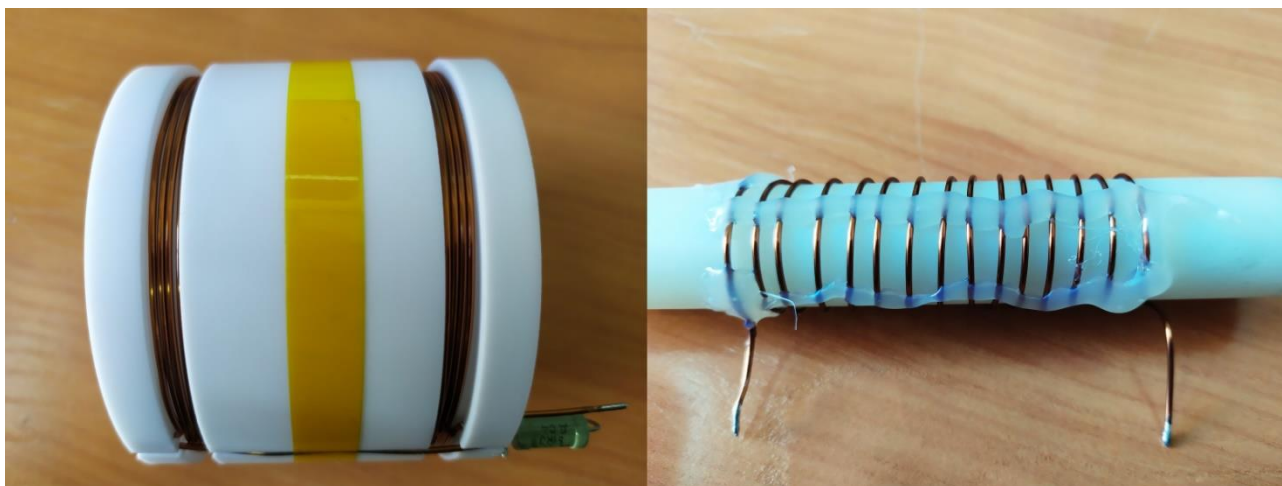


Рис. 3. Фотографии катушки Гельмгольца (слева) и соленоида (справа), использовавшихся в работе. Характеристики: для катушки Гельмгольца - радиус витков $R = 36$ мм (расстояние между витками $l = 2R$), число витков $N_G = 8$; для соленоида – длина $l = 67$ мм, число витков $N_S = 15$; индуктивность катушки Гельмгольца $L_G = 5,4$ мкГн, сопротивление катушки $R = 50$ Ом, индуктивность соленоида $L_S = 2,2$ мкГн.

Коэффициент пропорциональности K_B между U и B можно найти из геометрических параметров катушки зонда, но для повышения точности можно откалибровать зонд по известному магнитному полю. Для этого использовались те же соленоид и катушка Гельмгольца, что и при калибровке поворотом.

При проведении измерений на катушку (соленоид) подается переменное синусоидальное напряжение известной амплитуды частотой 13.56 МГц с генератора сигналов. Амплитуда тока: $I = V_f / Z$, где $Z = \sqrt{R^2 + (\omega_0 L)^2}$. Из катушки Гельмгольца и соленоида получаем: $Z_G = 88,7$ Ом, $Z_S = 29,8$ Ом. Из I можно получить величину магнитного поля B , создаваемого магнитным элементом: для катушки Гельмгольца $B_G = 0,8^{3/2} \frac{\mu_0 N}{R} I = k_G I$, для соленоида $B_S = \frac{\mu_0 N}{l} I = k_S I$ (3); коэффициенты k_G и k_S рассчитываются, исходя из геометрических характеристик, указанных выше и равны: $k_G = 1,00 \pm 0,05$ Гс/А,

$k_S = 2,8 \pm 0,2$ Гс/А. Подставляя V_f в соотношения (3), получаем: $B_G = \frac{k_G}{Z_G} V_f$, $B_S = \frac{k_S}{Z_S} V_f$ (4).

4. Экспериментальные результаты

В эксперименте были исследованы две конструкции диагностического зонда – с витой парой и коаксиальными кабелями. Результаты калибровки с использованием клетки Фарадея – приведены на рис. 4.

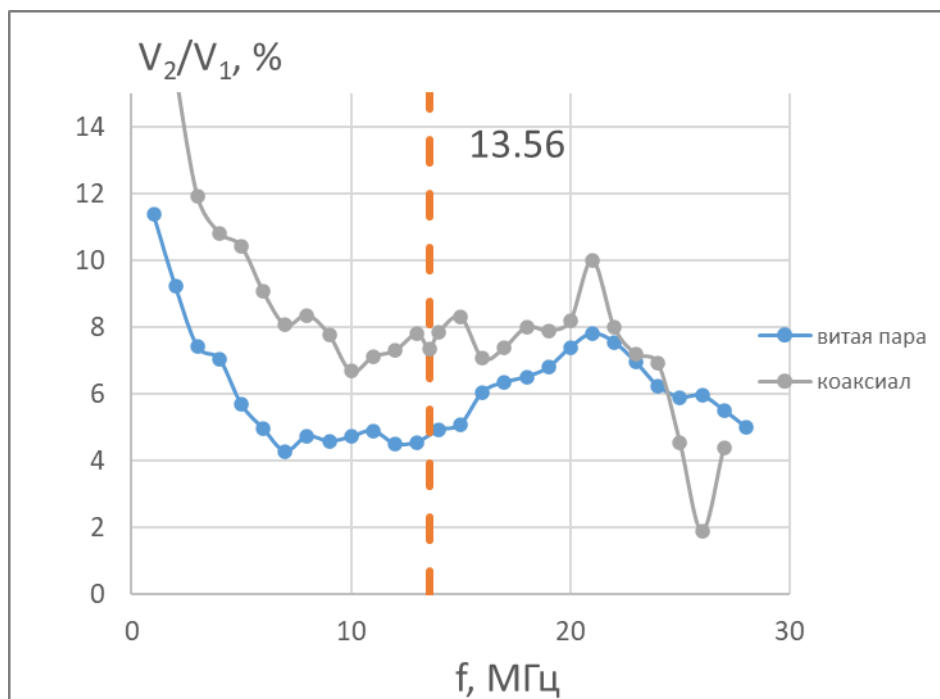


Рис. 4. Калибровка фарадеевским экраном

Из графика видно, что вариант зонда с витой парой дает меньшую величину помех в итоговый сигнал – в частности, на рабочей частоте 13,56 МГц соотношение V_2/V_1 равно 4,9% для зонда с витой парой и 7,4% для зонда с коаксиальным кабелем. В связи с этим принято решение в дальнейшем использовать вариант с витой парой. Коэффициент $k_f = (V_2/V_1) = 0,05$.

Графики калибровки поворотом для катушки Гельмгольца приведены на рисунке 5. Величина нескомпенсированного электростатического сигнала $\Delta V_b = (V_b(0^\circ) + V_b(180^\circ))/2$ очень мала, уровень электростатической наводки в V_2 пренебрежимо мал.

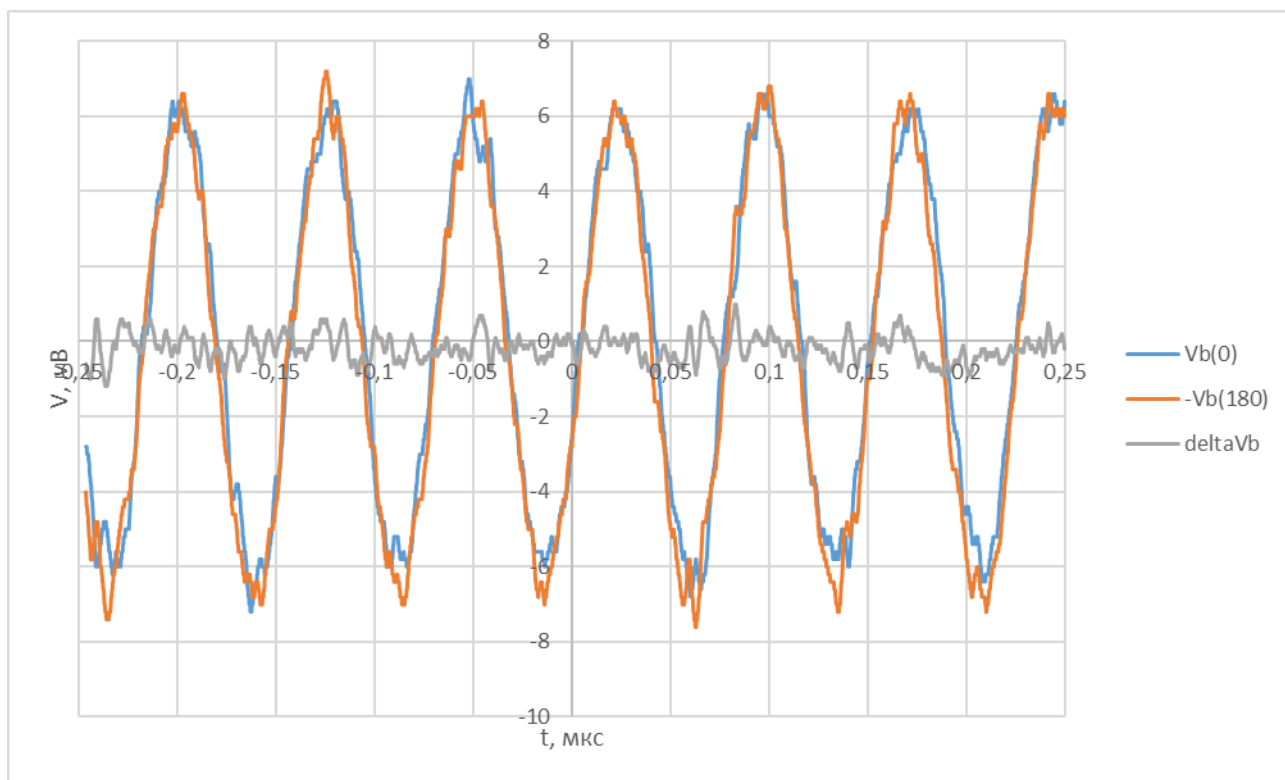


Рис. 5. Калибровка поворотом с использованием катушки Гельмгольца.

Результаты измерения зондом магнитного поля приведены на графиках на рисунках 6, 7. График «на основе хар-к зонда» означает магнитное поле, полученное на основе геометрических характеристик – расчетной эффективной площади зонда – согласно формуле (2). Линия «на основе тока» означает магнитное поле, рассчитываемое из подаваемого на соленоид или катушку напряжения V_f по формулам (4) при измеряемом на зонде напряжении V_2 .

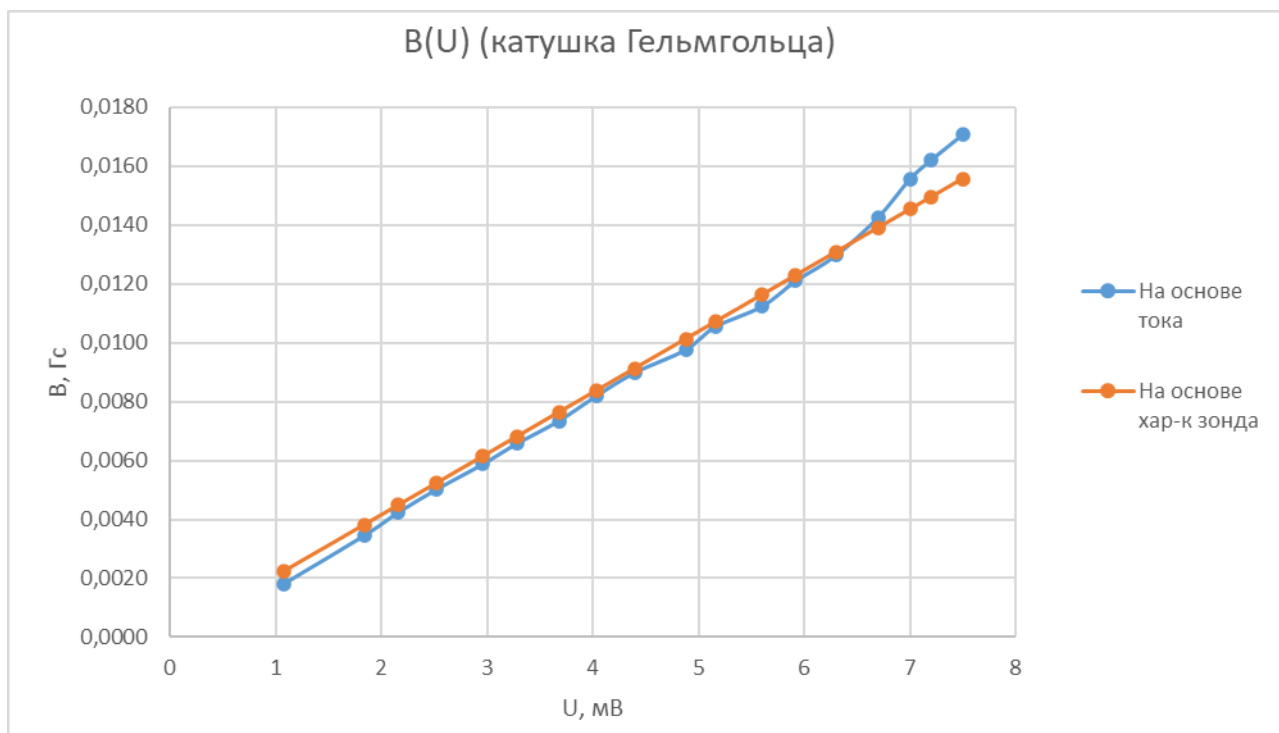


Рис. 6. Зависимость $B(V_2)$, измеренная на катушке Гельмгольца и соответствующие измеренным величинам V_2 расчетные величины магнитного поля.

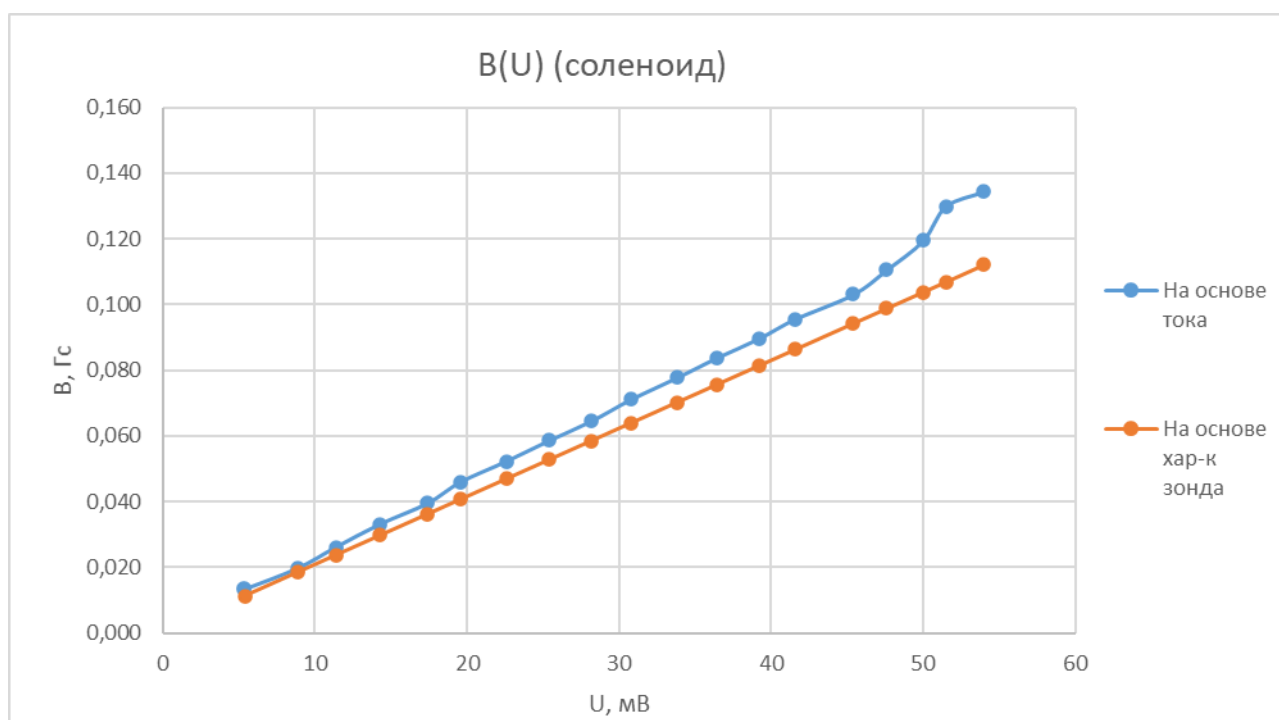


Рис. 7. Зависимость $B(V_2)$, измеренная на соленоиде и соответствующие измеренным величинам V_2 расчетные величины магнитного поля.

По данным катушки Гельмгольца $K_{BG} = 2,14 \pm 0,21$ Гс/В, по данным соленоида $K_{BS} = 2,3 \pm 0,2$ Гс/В. Наибольший вклад в погрешность дают погрешность расчёта k_G и k_S по формулам (3) и погрешность измерения тока осциллографом по сравнению с погрешностью метода наименьших квадратов,

используемого для получения K_B (погрешность МНК оценивается по формулам из [5]) – относительная погрешность k_G – 5%, k_S – 5%, относительная погрешность измерений V_f – 5%, погрешность МНК $\sim 0,5\%$ - значительно меньше других источников погрешностей.

5. Заключение

Итоговый коэффициент пропорциональности между магнитным полем и измеряемым на зонде напряжением $K_B = 2,2 \pm 0,3$ Гс/В хорошо согласуется с теоретическим коэффициентом $K_{B0} = 2,1 \pm 0,6$ Гс/В, при этом имеет меньшую погрешность. Проверена эффективность измерения магнитной компоненты сигнала зонда и найден коэффициент фильтрации $k_f = 0,05$, позволяющий еще более повысить точность измерения магнитного поля путем удаления электростатической компоненты в результатах измерений. Всё это позволяет использовать изготовленный магнитный зонд в будущих измерениях в плазме.

6. Список использованной литературы

1. Е. И. Кузьмин. Высокочастотный источник плотной плазмы с магнитным удержанием на основе геликонного разряда. Новосибирск, 2018.
2. Helicon Wave Propagation in Low Diverging Magnetic Fields. Т. А. Lafleur, 2011.
3. Методы исследования плазмы. Под ред. В. Лохте-Хольтгревена, перевод с английского, М. 1971.
4. Диагностика плазмы. Под ред. Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда, перевод с английского, М. 1967.
5. П.В. Попов, А.А. Нозик. Обработка результатов учебного эксперимента.