

Калибровка магнитной измерительной системы винтовой магнитной ловушки СМОЛА

Кожевников Федор Дмитриевич

Физический факультет. Электромагнитный практикум. 3 семестр. Группа № 19313, 2020 год.

Научный руководитель:

Ломов Константин Андреевич, ст. лаборант ИЯФ СО РАН.

Соруководитель:

Судников Антон Вячеславович, к.ф.-м.н., ст. научный сотрудник ИЯФ СО РАН.

Аннотация.

Данная работа посвящена калибровке магнитной измерительной системы для винтовой магнитной ловушки СМОЛА. Измерительная система состоит из нескольких зондов, представляющих собой катушки индуктивности. Основным параметром такого зонда является эффективная площадь сечения. Калибровка заключается в экспериментальном измерении эффективных площадей сечения для правильной интерпретации результатов дальнейших экспериментов. Для целей данной работы были собраны несколько контуров, состоящих из конденсатора и провода, ток через который измерялся одновременно измерителем тока HASS 300-S и магнитной измерительной системой, подключенными к АЦП ADC1250. Были получены и обработаны данные с АЦП, выбраны оптимальные методики обработки данных, получены конечные результаты. Оценены погрешности полученных результатов.

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Кожевников Федор Дмитриевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**«Калибровка магнитной измерительной системы винтовой
магнитной ловушки СМОЛА»**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19313

Научный руководитель:

К.А. Ломов

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Д.С. Чуркин

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация.

Данная работа посвящена калибровке магнитной измерительной системы для винтовой магнитной ловушки СМОЛА. Измерительная система состоит из нескольких зондов, представляющих собой катушки индуктивности. Основным параметром такого зонда является эффективная площадь сечения. Калибровка заключается в экспериментальном измерении эффективных площадей сечения для правильной интерпретации результатов дальнейших экспериментов. Для целей данной работы были собраны несколько контуров, состоящих из конденсатора и провода, ток через который измерялся одновременно измерителем тока HASS 300-S и магнитной измерительной системой, подключенными к АЦП ADC1250. Были получены и обработаны данные с АЦП, выбраны оптимальные методики обработки данных, получены конечные результаты. Оценены погрешности полученных результатов.

Оглавление.

1. Введение.....	5
2. Теоретическая часть.....	6
2.1 Магнитное поле провода с током.....	6
2.2 Метод наименьших квадратов.....	7
3. Экспериментальная часть.....	8
3.1 Описание установки.....	8
3.2 Обработка экспериментальных данных.....	10
4. Выводы.....	13
5. Литература.....	14

1. Введение.

Изучение предложенной в 1950 г. А.Д. Сахаровым и И.Е. Таммом концепции магнитной термоизоляции плазмы [1] на сегодняшний день является очень перспективным направлением научной деятельности. Это не удивительно, ведь альтернативная энергетика на основе управляемого термоядерного синтеза выступает одним из претендентов на закрытие энергетического кризиса, ожидаемого в недалеком будущем [2].

В ИЯФ СО РАН активно исследуется удержание плазмы с помощью линейной конфигурации магнитного поля – открытых магнитных ловушек [3]. В частности, была построена Спиральная магнитная открытая ловушка СМОЛА [4] для проверки новейшей идеи винтового удержания [5].

Для эффективного удержания плазмы необходимо исследовать причины взаимодействия плазмы со стенками ловушки, а также макроскопическое состояние плазмы. Интерес автора обращен к зондовой методике изучения процессов в плазме [6].

Зонд представляет собой катушку индуктивности. Если в плазме протекают электрические токи, то система таких зондов позволит дать некоторую количественную оценку данному процессу. Протекающий в плазме переменный электрический ток создает переменное магнитное поле, а переменное магнитное поле внутри катушки, в свою очередь, создаст ток на этой катушке [7, страница 21]. Для правильной интерпретации данных, полученных при такого рода измерениях необходимо знать параметры катушки, такие как площадь эффективного сечения, собственное сопротивление и паразитная индуктивность.

Данные параметры можно определить теоретически, в момент создания данной катушки, если известны параметры материала, из которого она сделана и геометрическая конфигурация катушки. Однако, при таком подходе легко

ошибиться, поэтому проводятся измерения для практического определения параметров катушки (калибровка), чему и посвящена данная работа.

В ходе этой работы решались следующие задачи:

- 1) Разработка методики калибровки. То есть, качественное описание эксперимента, который позволит рассчитать необходимые параметры.
- 2) Проведение эксперимента. Подтверждение качественной оценки.
- 3) Разработка метода обработки экспериментальных данных. Получение конечного результата.

2. Теоретическая часть.

2.1 Магнитное поле провода с током.

Для определения искомых параметров зондов необходимо понять, какое именно по величине магнитное поле будут измерять наши зонды во время проведения эксперимента. Магнитное поле будет создаваться прямолинейным куском провода, проходящим перпендикулярно плоскости расположения измерительной системы (зонды измеряют азимутальную составляющую поля)

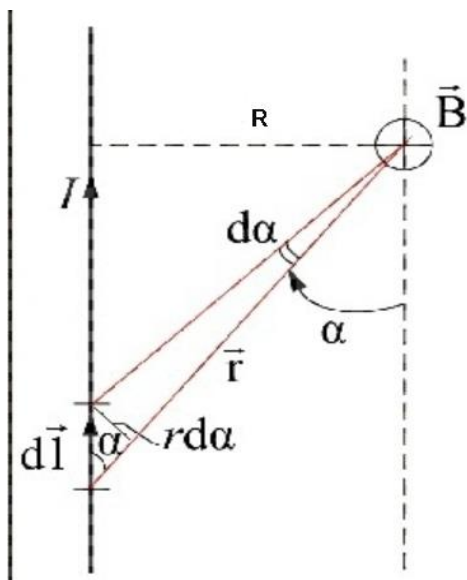


Рисунок 1. Иллюстрация для наглядности расчетов.

и делится пополам этой плоскостью.

Пусть l – длина провода, R – расстояние от центра провода до точки измерения, тогда $\alpha \in [\varphi; \pi - \varphi]$, где $\varphi = \arctg(\frac{2R}{l})$. По закону Био-Савара [8, страница 139]:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} * I * \frac{[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3};$$

$$|[d\vec{l} \times \vec{r}]| = dl * r * \sin \alpha; \quad r = \frac{R}{\sin \alpha}; \quad dl = \frac{r * d\alpha}{\sin \alpha}, \text{ откуда:}$$

$$|d\vec{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi} * \frac{I}{R} * \sin \alpha * d\alpha;$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} * \frac{I}{R} * \int_{\varphi}^{\pi - \varphi} \sin \alpha * d\alpha = \frac{\mu_0}{4\pi} * \frac{I}{R} * (\cos \varphi - \cos(\pi - \varphi)) = \frac{\mu_0}{4\pi} * \frac{I}{R} * 2 * \cos \varphi.$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{2R}{l}\right); \operatorname{tg}(\varphi) = \frac{2R}{l}; 1 + \operatorname{tg}^2(\varphi) = \frac{1}{\cos^2(\varphi)}; \cos(\varphi) = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{2R}{l}\right)^2}}.$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} * \frac{I}{R} * 2 * \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{2R}{l}\right)^2}}. \quad (1)$$

2.2 Метод наименьших квадратов.

Обработка экспериментальных данных – важный этап любого эксперимента. В ходе работы встает вопрос о сравнении двух графиков одинаковой формы (рис. 2).

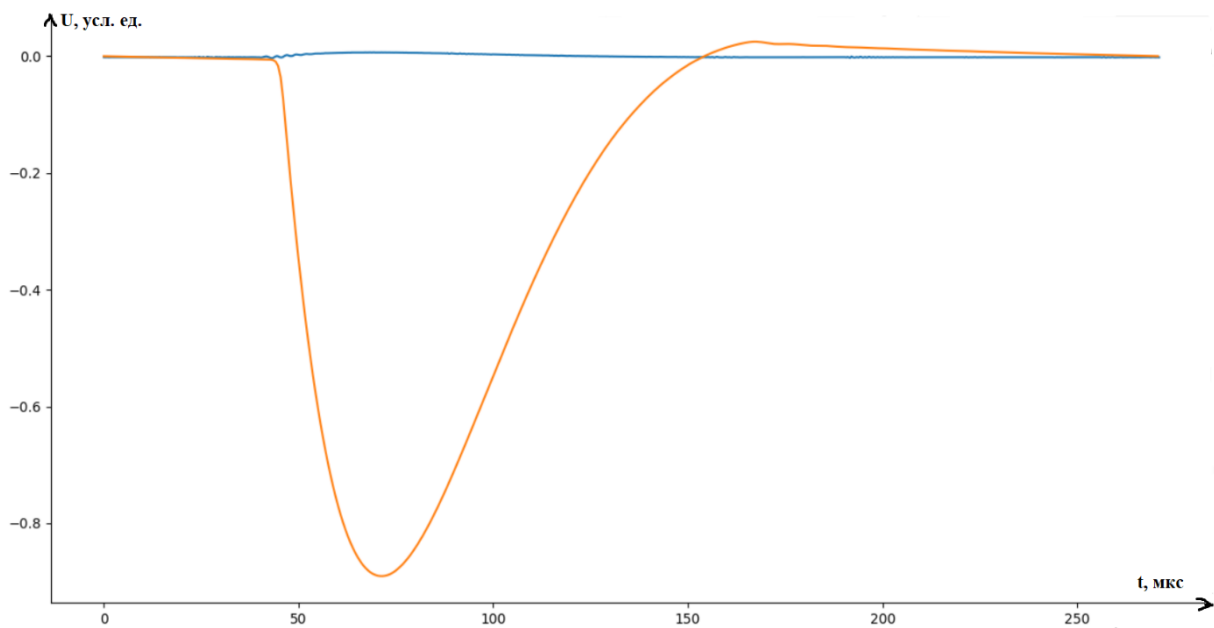


Рисунок 2. Пример сравниваемых графиков.

Итак, нам необходимо установить такой коэффициент подобия между двумя наборами дискретных данных, чтобы максимально приблизить полученные значения друг к другу:

$$F(S) = \sum (S * U_1[i] - U_0[i])^2$$

, где суммирование подразумевается по индексу [i], S – искомый коэффициент подобия, U_1 и U_0 – дискретные наборы данных. $F(S)$ – парабола, ветви которой, идут вверх. Тогда из следующего уравнения находим S_{min} , при котором $F(S)$ принимает наименьшее значения:

$$\frac{dF}{dS} = 0$$

$$S_{min} = \frac{\sum U_1[i] * U_0[i]}{\sum (U_1[i])^2} \quad (2)$$

3. Экспериментальная часть.

3.1 Описание установки.

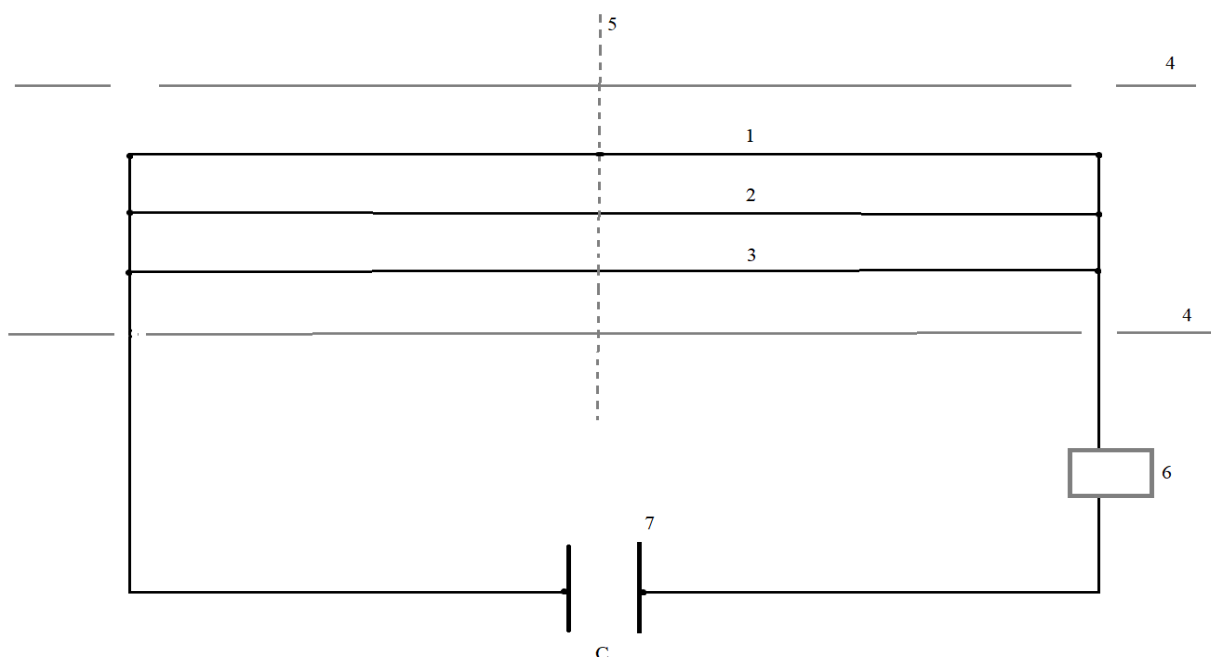


Рисунок 3. Схема экспериментальной установки. 1, 2, 3 - провода, через которые пускают ток; 4 - стенки установки СМОЛА; 5 - плоскость расположения зондов; 6 - измеритель тока; 7 - конденсатор.

На рисунке 3 изображена схема калибровочного стенда. Для целей данной работы мы будем поочередно разряжать конденсатор через 3 одинаковых провода (1, 2 и 3 на рис. 3). Длина каждого – 36 см (прямолинейный участок, который создает поле). 2 провод проходит по оси установки, провода 1 и 3 находятся на расстоянии 2 см от него. Зонды распределены по окружности в плоскости 5 на расстоянии 7 см от оси установки. Всего имеется 12 зондов с порядковыми номерами 0 – А (шестнадцатеричная система), каждый подключен к АЦП. Их расположение в пространстве показано на рисунке 4.

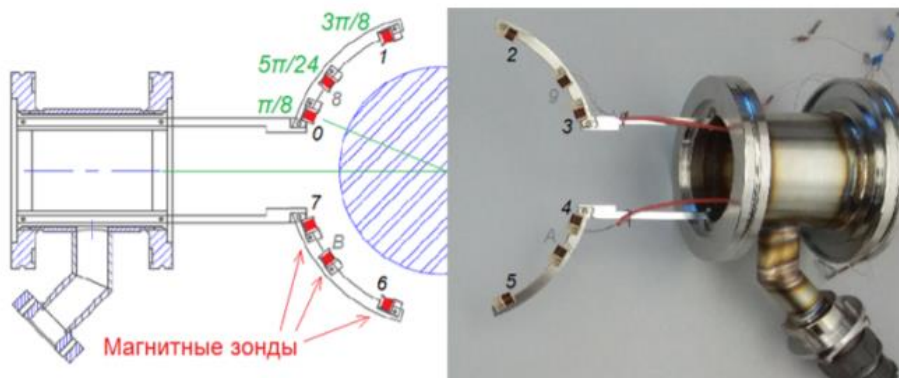


Рисунок 4. Схема и фотография магнитной измерительной системы

В качестве измерителя тока используется LEM-HASS 300-S. Данное устройство создает напряжение, зависящее от силы тока, проходящего через

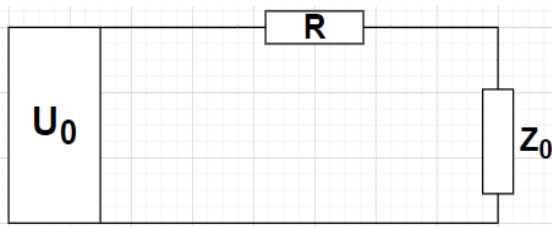


Рисунок 5. Схема подключения измерителя тока. U_0 – напряжение измерителя; R – сопротивление 1956 Ом; Z_0 – сопротивление АЦП 52 Ом.

него. Коэффициент пересчета – 1 В / 480 А [9]. Так как данное устройство подключено к АЦП через напряжение (рис. 5), напряжение на АЦП в $38,6 = (1956 + 52)/52$ раз меньше, чем на выходе измерителя.

Из формулы (1) видно, что поле, измеряемое зондами будет зависеть от расстояния до провода, по которому течет ток. Значит эти расстояния надо посчитать. Расстояния между осью установки СМОЛА и зондами составляет 7 см, это же расстояние будет между проводом 2 и каждым зондом (назовем это расстояние r_2). Расстояния до проводов 1 и 3 можно посчитать по теореме косинусов, так как нам известны расстояния между зондами и проводом 2, между проводами (2 см) и угол между горизонтальной прямой и прямой, соединяющей середину провода 2 с зондами. Результаты вычислений представлены в таблице 1.

Таблица 1. Расстояния между зондами и проводами r_1 – расстояние до провода 1, r_3 – до провода 3.

№ Зонда	r_1 , см	r_3 , см
0	8,88	5,2

1	7,98	6,5
2	6,5	7,98
3	5,2	8,88
4	5,2	8,88
5	6,5	7,98
6	7,98	6,5
7	8,88	5,2
8	8,67	5,55
9	5,55	8,67
A	5,55	8,67
B	8,67	5,55

3.2 Обработка экспериментальных данных.

Была проведена серия из 4 экспериментов (2 раза для провода 2 и по одному для проводов 1 и 3). Было получено по 13 массивов данных (12 для зондов и 1 для измерителя) для каждого эксперимента. Массив представляет собой показания АЦП в вольтах в определенный промежуток времени. Период дискретизации – 0.16 – 0.64 мкс (разные для зондов и измерителя и в разных экспериментах серии). Пример можно видеть на рисунке 6.

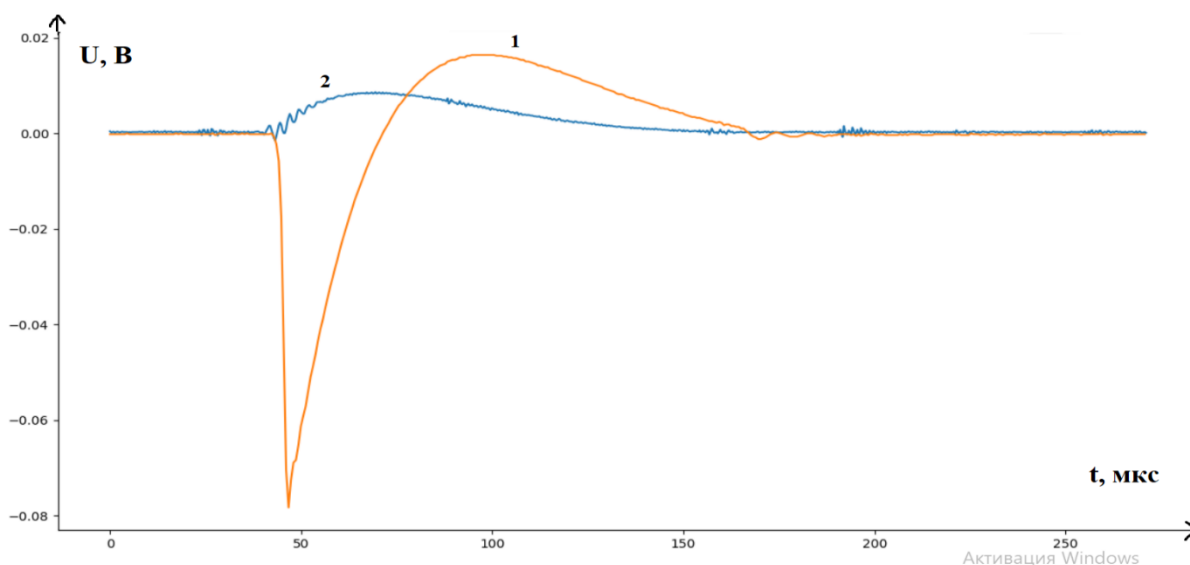


Рисунок 6. Пример данных с АЦП до обработки. 1 - напряжение на АЦП, подключенном к зонду 0; 2 - напряжение на АЦП, подключенном к измерителю тока.

Теперь можно приступать к обработке. Нам известна связь между U – напряжением на АЦП и полем B в зонде [10]:

$$B(t) = B(0) + \frac{1}{S_{\text{эф}}} \left(1 + \frac{R_3}{Z}\right) \int_0^t U(t) dt \quad (3)$$

, где $S_{\text{эф}}$ – эффективная площадь сечения катушки (мы ее ищем), R_3 – сопротивление зонда (сопротивления зондов указаны в таблице 2), Z – сопротивление 50 Ом, $B(0) = 0$. По формуле (1) нам известна связь между магнитным полем в катушке и током в проводе. Как было сказано выше, ток в измерителе и показания АЦП связаны коэффициентом $k = 1 \text{ В} / (480 * 38,6 \text{ А})$. Тогда с формулой (3) получится:

$$\frac{\mu_0}{4\pi} * \frac{kU_{\text{изм}}}{r} * 2 * \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{2r}{l}\right)^2}} = \frac{1}{S_{\text{эф}}} \left(1 + \frac{R_3}{Z}\right) \int_0^t U(t) dt$$

, где $U_{\text{изм}}$ – напряжение, которое показывает АЦП, подключенное к измерителю тока, r – расстояние между зондом и проводом с током. Обозначим S – коэффициент пропорциональности $U_{\text{изм}}$ и $\int_0^t U(t) dt$ ($S * U_{\text{изм}} = \int_0^t U(t) dt$). Они линейно зависимы, так как отличны от силы тока в проводе только постоянными коэффициентами. Тогда:

$$S_{\text{эф}} = \left[\left(1 + \frac{R_3}{Z}\right) S \right] / \left[\frac{\mu_0}{4\pi} * \frac{k}{r} * 2 * \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{2r}{l}\right)^2}} \right] \quad (4)$$

Коэффициент S будем искать методом наименьших квадратов. Для наглядности рисунок 7 с данными после обработки и таблица 3 с коэффициентами, полученными после обработки данных эксперимента.

Таблица 2. Сопротивления зондов [10].

№ Зонда	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	А	В
R_3 , Ом	10,4	10,2	8,4	14	11,2	10,9	9,6	8,5	8,5	9	11,3	8,2

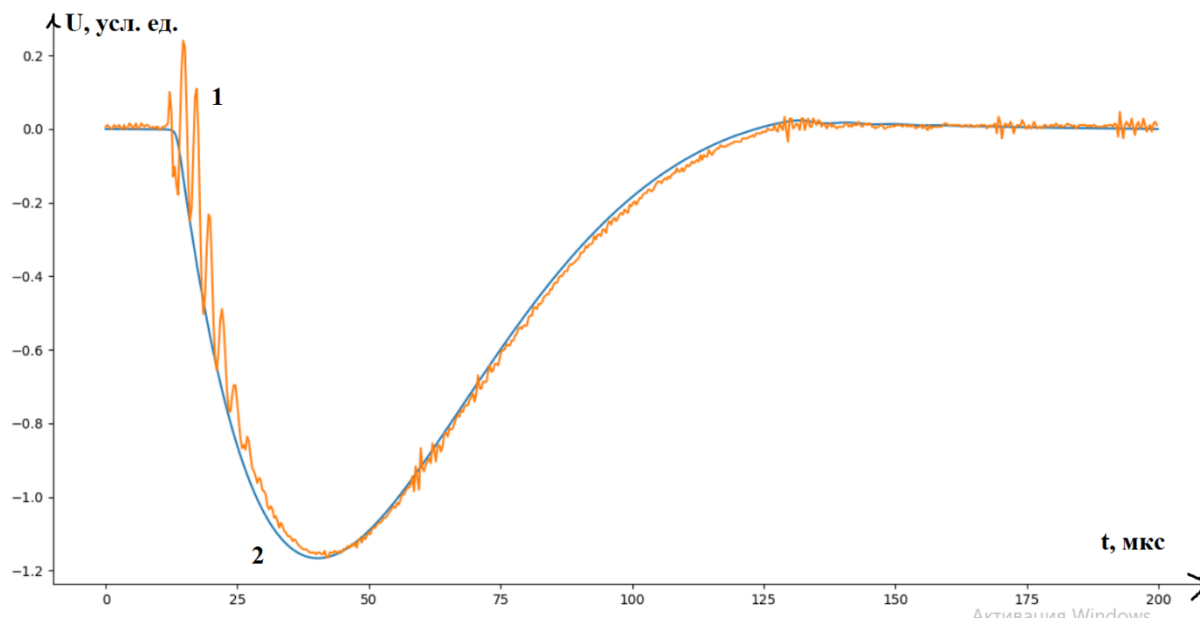


Рисунок 7. Пример схожести графиков, после интегрирования показаний зондов и растяжения показаний измерителя. 1 – данные с измерителя; 2 – интеграл данных с зонда.

Таблица 3. Таблица коэффициентов пропорциональности в ходе 1 эксперимента серии (ток течет по проводу 2).

№ Зонда	0	1	2	3	4	5
S	-108,55	101,22	-112,52	-105,69	107,1	97,83
№ Зонда	6	7	8	9	A	B
S	-118,25	-113,04	99,84	115,9	96,22	-95,02

Можно заметить, что некоторые коэффициенты приведены со знаком «-». Это происходит из-за полярности подключения. При расчете эффективной площади сечения зонда это учитывается, эффективная площадь тоже будет иметь знак.

4. Выводы.

Мною проведена серия из 4 экспериментов, в результате которых получены данные для экспериментального определения эффективных площадей сечения зондов. Ниже представлены результаты, где значение эффективной площади – среднее из 4 экспериментов, а погрешность – среднеквадратическое отклонение.

№ зонда	$S_{эф}, \text{ см}^2$ (с учетом полярности)
0	$-(26,09 \pm 2,97)$
1	$23,79 \pm 1,3$
2	$-(25,95 \pm 1,2)$
3	$-(27,14 \pm 2,8)$
4	$24,9 \pm 1,8$
5	$23,5 \pm 1,12$
6	$-(27,67 \pm 1,3)$
7	$-(26,29 \pm 2,88)$
8	$23,09 \pm 2,2$
9	$27,28 \pm 1,93$
A	$23,43 \pm 2,41$
B	$-(21,84 \pm 2,02)$

5. Литература.

- [1] Э. А. Азизов, Токамаки от А.Д. Сахарова до наших дней (60 лет токамакам) // УФН, 2012, том 182, номер 2, 202–215
- [2] C. N. Zou et al. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era // Natural Gas Industry B 3 (2016) 1-11.
- [3] P. A. Bagryansky, A. D. Beklemishev, V. V. Postupaev. Encouraging Results and New Ideas for Fusion in Linear Traps // J Fusion Energy 38, 162-181 (2019).
- [4] A. V. Sudnikov et al. SMOLA device for helical mirror concept exploration // Fusion Engineering and Design. 122, 85 (2017).
- [5] A. D. Beklemishev. Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps // Fusion Sci. Technol. 63 (1T) (2013) 355-357.
- [6] Мирнов С. В. Зондовая методика измерения смещения токового шнура в цилиндрической и тороидальной камерах // Атомная энергия, 1964, т. 17, с. 209–211.
- [7] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. / М.: «Высшая школа», 1996, с. 638.
- [8] Яковлев В.И. Классическая электродинамика: Учеб. пособие/ Новосиб. ун-т. Новосибирск 2003, с. 267.
- [9] LEM Current Transducer HASS 300-S datasheet / <https://www.lem.com/en/hass-300s>
- [10] НГУ. Выпускная квалификационная работа Ломова Константина Андреевича. / Новосибирск 2020, с.45.