

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Иванов Роман Станиславович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Определение чувствительности дифференциального измерителя
напряжения Testec ТТ-SI 9001 к внешнему магнитному полю**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19310

Научный руководитель:

_____ к.ф.-м.н, Судников А. В. _____

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

Целью работы являлось исследование влияния внешнего магнитного поля на показания дифференциального измерителя Testec TT-SI 9001 при различных частотах сигнала, пропускаемого через данное устройство. Для этой цели был использован импульсный источник магнитного поля в виде катушек Гельмгольца с током. Измеритель помещался в катушку вертикально для этого положения снимались гармонические сигналы на входе и выходе прибора, по которым строились фазово-частотная и амплитудно-частотная характеристики без внешнего магнитного поля и при включении магнитного поля.

В ходе работы было установлено, что разница входного и выходного сигналов пропорциональна производной тока в катушке, а значит и магнитного поля по времени. Были найдены примерная зависимость АЧХ и сдвиг фаз, а также коэффициент пропорциональности между производной тока по времени и разницей входного и выходного сигналов, позволяющие оценивать вклад магнитного поля при передаче сигнала в дальнейших экспериментах.

Ключевые слова: АЧХ, ФЧХ, корреляционная функция, магнитное поле, дифференциальная развязка.

Оглавление

Введение	4
Теоретические сведения	5
Экспериментальная установка	7
Обработка экспериментальных данных.....	9
Заключение	15
Список литературы	16

1. Введение

Один из основных методов исследования плазмы при температурах ниже нескольких десятков эВ — электростатические (ленгмюровские) зонды. Электроды зондов данного типа непосредственно контактируют с плазмой, поэтому их потенциал связан с потенциалом плазмы, а с корпусом установки и заземления измерительных приборов [1]. Поэтому для измерения любых напряжений в зондовых цепях нужно использовать дифференциальный усилитель, который преобразует разность потенциалов, смещённых на потенциал плазмы и величину, пропорциональную её электронной температуре $\varphi_n + (1 \dots 3,8) \cdot T_e$ в разность потенциалов, один из которых равен потенциалу заземления. Чувствительность усилителя к внешнему магнитному полю может существенно повлиять на результаты измерений. Целью данной работы было изучение вклада магнитного поля в сигнал, проходящий через измеритель, то есть нахождение амплитудно- и фазово-частотной характеристик прибора. Это позволит правильно учитывать вклад от наводок, при использовании устройств на установках, таких, как линейная ловушка с геликоидальным магнитным полем СМОЛА и получать более точные результаты.

Для решения данной задачи измеритель помещался в магнитное поле, сгенерированное импульсным током в катушках Гельмгольца, и через него пропускаться гармонический сигнал. Все три сигнала: ток в катушках, входной и выходной сигналы синхронно измерялись с помощью осциллографа, после чего обрабатывались в среде Python с использованием математических методов на основе корреляционного анализа. Помимо основного положения измерителя в катушках, были сняты измерения в двух других положениях и данные для положения измерителя под двумя секциями установки СМОЛА. Эти данные не представлены в работе, так как не сохранились при записи. Их примерный вид на осциллографе был схож с данными в первом положении измерителя, что даёт основания полагать, что наводка от магнитного поля для них имела тот же вид.

2. Теоретические сведения

Внешнее магнитное поле влияет на дифференциальный измеритель, искажая проходящий через него сигнал. Эти искажения можно оценить и учесть, зная параметры магнитного поля. В данном эксперименте магнитное поле генерировалось катушками Гельмгольца, через которые пропусклся импульсный ток. Поле в них описывается формулой $B = \mu_0 \cdot j$, где j -погонный ток в катушке, $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ — магнитная постоянная. В данном случае, по правилу Ленца, индукция, создаваемая в контуре, пропорциональна производной тока по времени. Для произвольного контура, помещенного в соленоид, она будет выражаться в виде: $\varepsilon_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 \cdot n \cdot S \cdot \frac{dI}{dt}$, где n — число витков в единице длины, S — проекция площади на нормальное сечение катушки. В случае наличия в конструкции измерителя нескомпенсированных контуров, на которых может индуцироваться ЭДС, может возникать наводка, пропорциональная производной тока в катушках. Помимо этого, внешнее магнитное поле может влиять на чувствительность усилителя за счёт возможных наводок на полупроводниковые элементы и помех в напряжении питания на интегральных схемах, что имеет значение в экспериментах с развязкой в магнитном поле.

Для определения сдвига фаз между двумя гармоническими сигналами использовалась ненормированная корреляционная функция. Для двух синусоид она представляет из себя периодическую функцию, с тем же периодом, что и исходный сигнал, отмасштабированную в пределах двух наклонных прямых, как показано на рисунке 1. Для дискретных функций $f = A \cdot \sin(\omega t_i)$ и $g = B \cdot \sin(\omega t_i + \Delta\varphi)$, она выражается через следующую конечную сумму: $(f * g)(x) = \sum_{i=-N}^N f(i) \cdot g(i + x) = \sum_{i=-N}^N A \cdot B \cdot \sin(\omega t_i) \cdot \sin(\omega t_i + \Delta\varphi + x)$. Разница между первым максимумом по времени для этой функции и нулем времени — значением t_0 будет являться сдвигом между исходными сигналами.

Нуль по времени определяется через теперь уже абсолютный максимум корреляционной функции для одного сигнала.

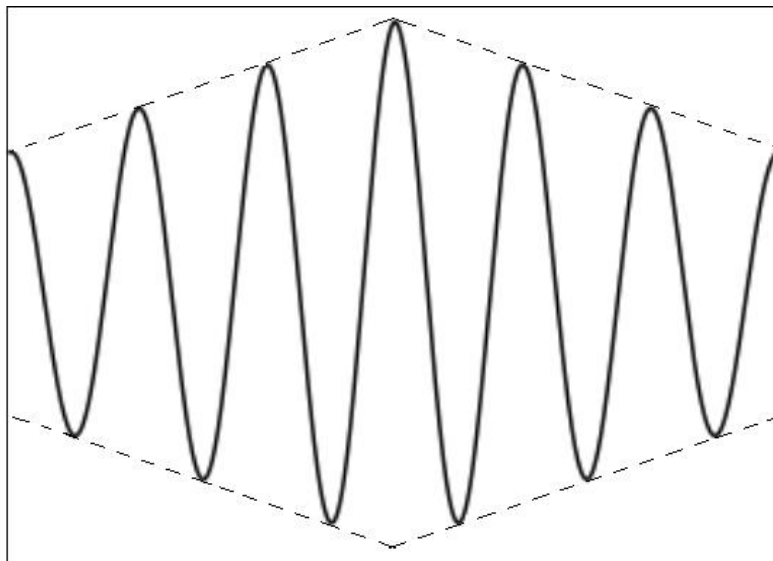


Рис. 1. Ненормированная корреляционная функция.

Для определения АЧХ, то есть нахождения отношения амплитуд на входе и выходе измерителя, использовались характеристики эллипса, полученного из зависимости одного сигнала от другого. А именно, в эллипс вписывалась прямая по большой полуоси и находился ее угол наклона θ . Далее по связи преобразования координат при повороте эллипса получалось отношение $\tan 2\theta = \frac{2 \cos \Delta\varphi}{\kappa - 1/\kappa}$. Из которого при решении квадратного уравнения

получались значения отношений амплитуд $\kappa = \sqrt{1 + \frac{\cos^2(\Delta\varphi)}{\tan 2\theta}} + \frac{\cos \Delta\varphi}{\tan 2\theta}$. Для повышения точности, перед построением эллипса и нахождением его параметров, сигналы сдвигались на найденное ранее запаздывание так, что разность фаз между ними была равна нулю. Это приводило к вырождению эллипса в прямую с тем же наклоном, которой теми же методами определялся точнее.

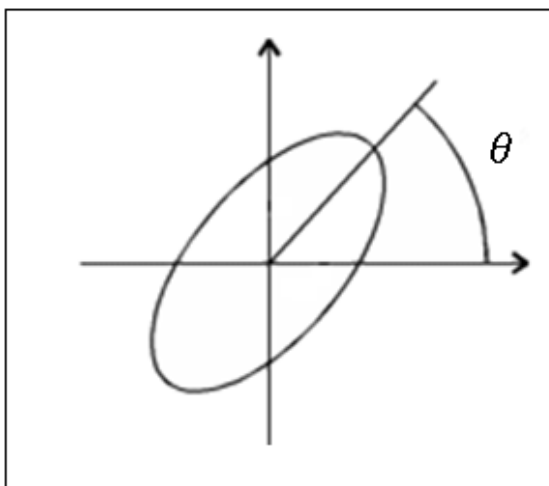


Рис. 2. Вид наклонного эллипса, полученного из зависимости одного сигнала от другого.

3. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состояла из осциллографа, дифференциальной развязки Testec TT-SI 9001 [2], генератора переменного напряжения, катушек Гельмгольца, измерителя тока HASS 100S [3] и импульсного источника тока. Развязка помещалась в катушки, на которые передавался импульсный сигнал, вызванный разрядкой конденсатора, ограниченного диодом. Сигнал с катушек передавался на осциллограф через измеритель тока. На вход развязки подавался переменный гармонический сигнал, который на выходе попадал на осциллограф, также этот исходный сигнал напрямую дублировался на осциллограф. Все три сигнала записывались в формате csv и впоследствии обрабатывались в среде Python. Схема установки представлена на рис. 3.

Экспериментальная часть состояла из трёх этапов: измерения с выключенной катушкой, то есть без внешнего магнитного поля, со включенной катушкой, при трёх различных положениях измерителя в ней и при нескольких положениях измерителя вблизи работающей установки СМОЛА (данные для двух положений измерителя в катушках и вблизи установки СМОЛА не сохранились.)

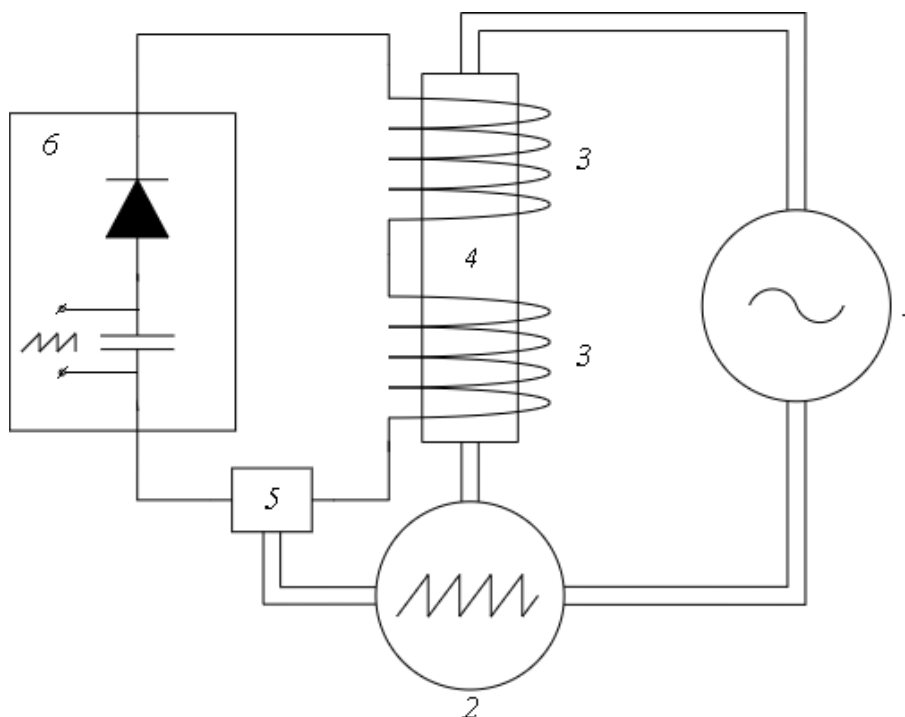


Рис. 3. Схема установки: 1- генератор переменного напряжения; 2- осциллограф; 3- катушки Гельмгольца; 4- дифференциальная развязка; 5- измеритель тока HASS 100S; 6- импульсный источник тока.

Спиральная магнитная открытая ловушка (СМОЛА) [4] имеет сложную конфигурацию и способ удержания плазмы в ней. Магнитное поле имеет винтовую симметрию. Плазма вращается в скрещенных электрическом и магнитном полях, при этом скорость вращения пропорциональна векторному произведению $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. В системе отсчёта вращающейся плазмы периодические максимумы магнитного поля движутся в сторону, определяемую направлением винтовой обмотки и направлением вращения плазмы. Максимумы магнитного поля передают импульс заряженным частицам за счёт сохранения магнитного момента, что приводит к возникновению удерживающей или ускоряющей силы. В данной работе не акцентировалось внимание на детальном рассмотрении этой установки, требовались лишь данные о магнитном поле вблизи неё. На рисунках 3 и 4 представлены распределение магнитного поля и схема установки (СМОЛА).

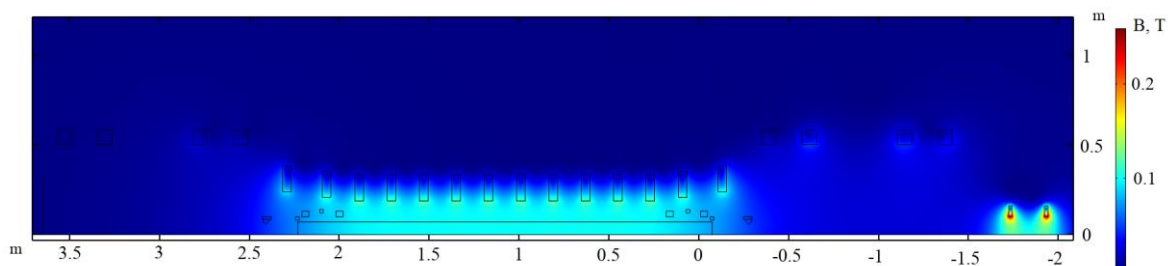


Рис. 3. Схема распределения магнитного поля вблизи установки (СМОЛА)

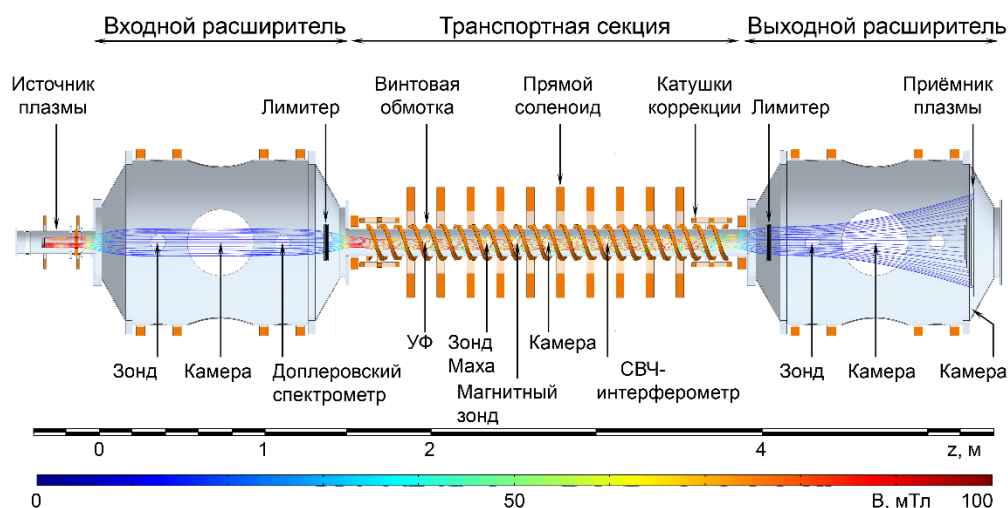


Рис. 4. Спиральная магнитная открытая ловушка (СМОЛА)

4. Обработка экспериментальных данных.

Все вычисления проводились в среде Python. В первой серии экспериментов сигналы на входе и выходе дифференциальной развязки снимались без включения внешнего источника магнитного поля и представляли из себя сдвинутые друг относительно друга и отмасштабированные с коэффициентом, близким к единице, синусоиды. Для определения сдвига фазы между ними использовалась рассуждения, приведенные в разделе 2, а именно использование корреляционной функции и нахождение её первого по времени максимума. Среднее значение запаздывания выходного сигнала при этих расчётах получается равным $\Delta\varphi = 16$ нс и почти постоянным, что свидетельствует о том, что сигнал практически не искажается самим прибором. Данные представлены в таблице 1.

f, Гц	$3 \cdot 10^2$	$9 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$
$\Delta\varphi$, нс	160	160	16	16	16	17	11	7
κ	0,997	0,997	1	0,998	0,999	0,999	1,002	1,007
f, Гц	$3 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	$9 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^7$	$2.5 \cdot 10^7$
$\Delta\varphi$, нс	9	13	15	16	17	17	18	19
κ	1,022	1,027	1,029	0,982	1,013	0,997	1,182	1,784

Таблица 1 Зависимости сдвига фаз и отношения амплитуд без магнитного поля

Для расчета АЧХ использовались теоретические сведения, приведенные в пункте 2, результатом которых была итоговая формула отношения амплитуд $\kappa =$

$$\sqrt{1 + \frac{\cos^2(\Delta\varphi)}{\tan 2\theta} + \frac{\cos \Delta\varphi}{\tan 2\theta}}.$$

Данные зависимости отношения амплитуд от частоты представлены в таблице 1. График АЧХ в этой серии экспериментов представлен на графике 4.

На графике 1 представлены входной и выходной сигналы для частоты входного сигнала 25 МГц. Из этого графика видно смещение выходного сигнала на величину порядка 20 нс (более точные расчёты представлены выше, получившееся значение 19 нс), а также его сжатие на величину близкую к 2 (1,783).

Во второй серии экспериментов, с участием внешнего магнитного поля, требовалось учесть сдвиг сигнала из-за магнитного поля, чтобы получить АЧХ. На графике 2 представлены исходные сигналы: входной и выходной сигналы, ток в катушках (для наглядности увеличенный в 10 раз) и разница входного и выходного сигналов для частоты входного сигнала 9 кГц.

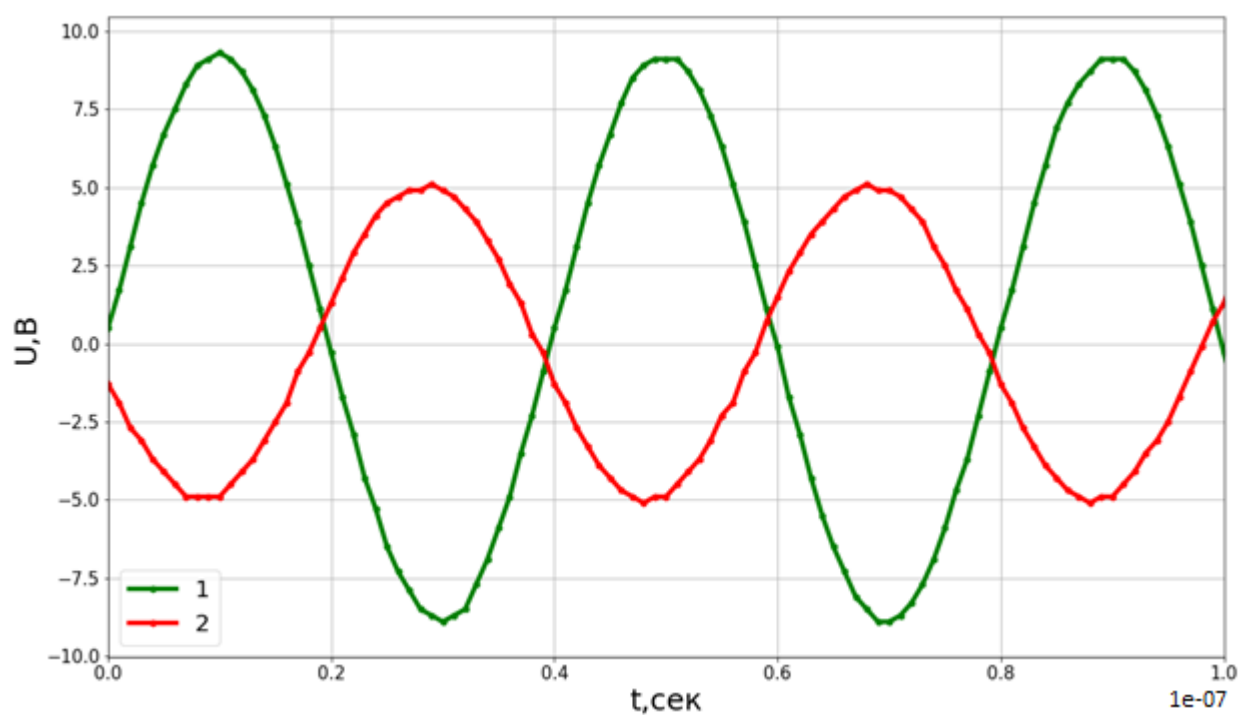


График 1. Временные развертки сигналов для частоты входного сигнала 25 МГц без внешнего поля: 1-сигнал на входе развязки; 2-сигнал на выходе развязки

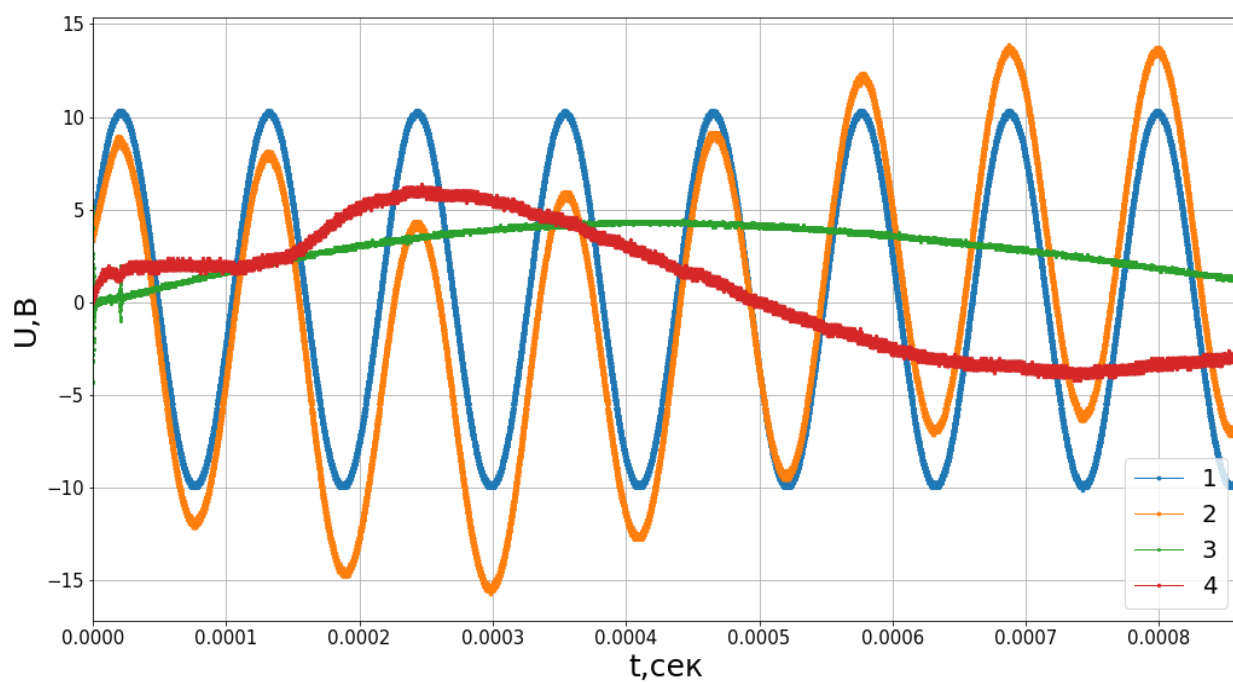


График 2. Временные развертки сигналов для частоты входного сигнала 9 кГц с внешним полем: 1-сигнал на входе развязки; 2-сигнал на выходе развязки; 3- ток в катушках Гельмгольца; 4- разница входного и выходного сигналов.

Для построения АЧХ по сигналу с катушки строился график производной от этого сигнала по времени, после чего этот график складывался с графиком функции, полученной на выходе прибора с коэффициентом. Для нахождения производной в кривую сигнала с катушки вписывался полином четвертой степени, по которому аналитически находилась производная с применением правил дифференцирования элементарных функций. Далее по разности входного и выходного сигналов находился примерный вид кривой, соответствующей наводкам, в неё вписывался полином третьей степени и искался размерный коэффициент k пропорциональности между этой кривой и производной тока. Затем из выходного сигнала вычиталась функция, полученная умножением коэффициента пропорциональности на производную тока. Для полученной кривой находились отношения амплитуд с исходным сигналом, как в случае с выключенным полем. На графике 3 представлены входной и выходной сигналы, а также кривая, полученная из разницы выходного сигнала и производной тока, умноженной на коэффициент k .

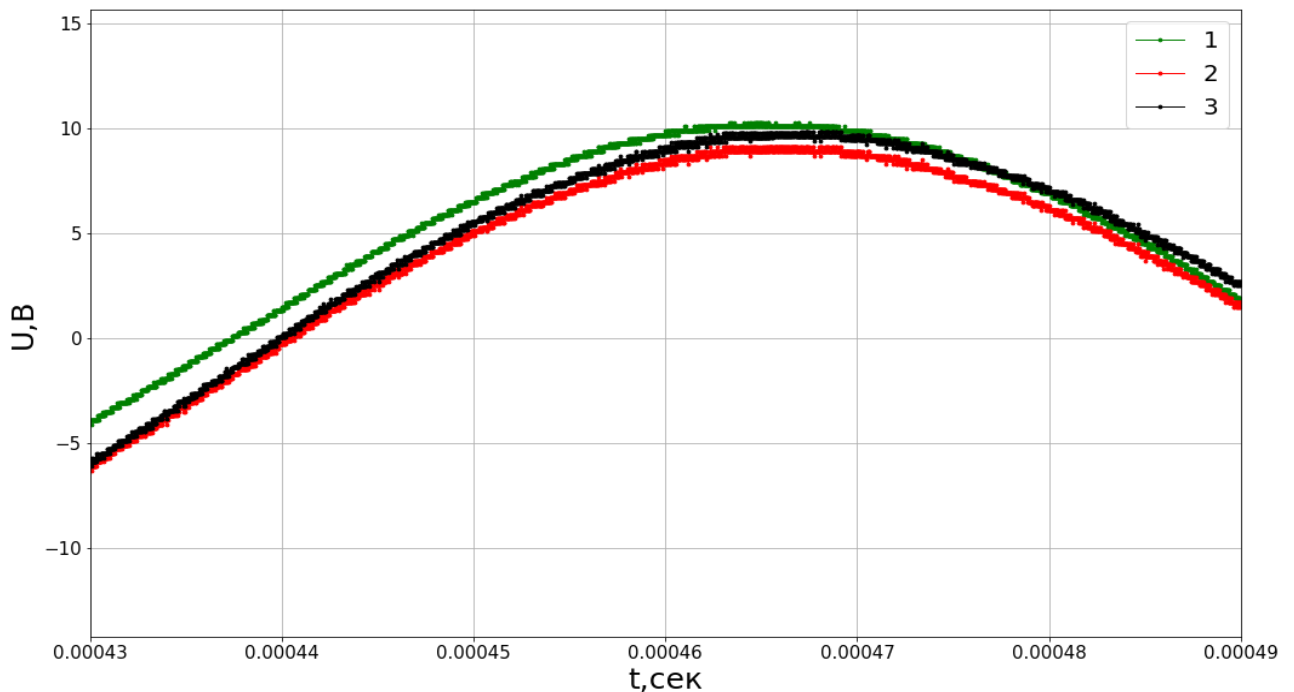


График 3. Временные развертки сигналов: 1-сигнал на входе развязки; 2-сигнал на выходе развязки; 3-разница сигналов на выходе и производной тока, умноженной на коэффициент k ;

Из расчётов средний коэффициент пропорциональности равен $k = 0,0044 \pm 0,0005$ с. График АЧХ в этой серии экспериментов представлен на графике 4. Вычисление ФЧХ ничем не отличалось от предыдущего случая. Данные вертикального положения прибора в катушке представлены в таблице 2.

f, Гц	$3 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$
$\Delta\varphi$, нс	0	0	0	16	16	0
κ	0,989	0,960	1,005	1,015	1,013	1,019
k , с	0,0046	0,0044	0,0038	0,004235	0,00453	0,0048
f, Гц	$3 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	$9 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	-
$\Delta\varphi$, нс	0	16	16	32	16	-
κ	1,034	1,049	1,039	1,10	1,082	-
k , с	0,0036	0,003829	0,004235	0,004642	0,00545	-

Таблица 2 Зависимость сдвига фаз с магнитным полем в 1 положении измерителя в катушке

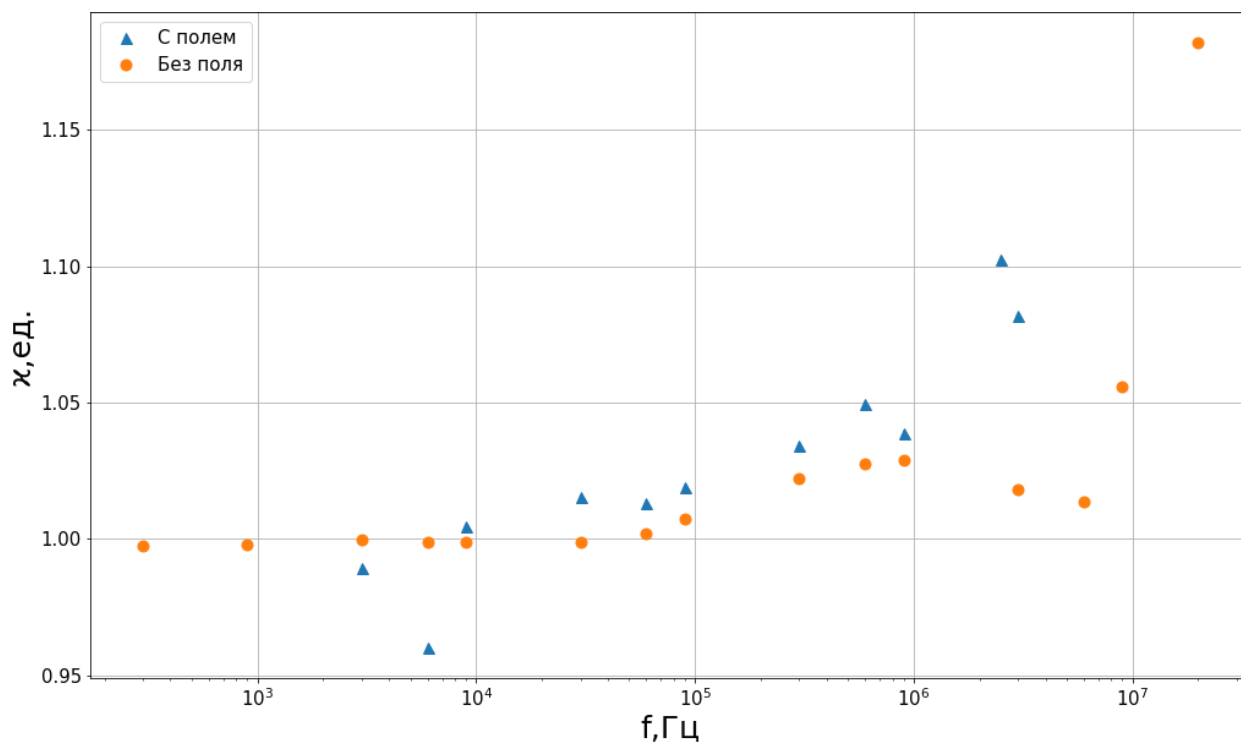


График 4. Зависимость отношения амплитуд от частоты в лог. масштабе в двух экспериментах: с внешним магнитным полем и без него.

Из графика АЧХ по систематическому сдвигу точек соответствующих части эксперимента с полем видно, что магнитное поле вносит вклад в амплитуду выходного сигнала, увеличивая её в некоторое число раз. Исходя из отношений η для одних частот в диапазоне (10-1000 кГц) для разных серий эксперимента средний коэффициент увеличения амплитуды получился равным $\sigma = 1,012 \pm 0,001$.

Заключение.

В результате проделанной работы было выяснено, что добавка магнитного поля в сигнал, проходящий через дифференциальный измеритель аддитивна и пропорциональна производной внешнего магнитного поля, был найден средний коэффициент пропорциональности между производной тока по времени и разницей сигналов на входе и выходе дифференциальной развязки $k = 0,0044 \pm 0,0005$ с. По ФЧХ и АЧХ для серий экспериментов с полем и без было найдено запаздывание сигналов на входе и выходе развязки $\Delta\varphi = 16 \pm 3$ нс, которое было постоянным в пределах погрешности, а также было обнаружено и оценено увеличение отношения амплитуд сигналов $\sigma = 1,012 \pm 0,001$, из чего сделан вывод о постоянстве формы пропускаемого сигнала и его масштабировании в сторону уменьшения по вертикальной оси при пропускании через развязку.

Данные в других положениях измерителя и вблизи установки СМОЛА могут быть полезны в дальнейших исследованиях для уточнения влияния магнитного поля на дифференциальную развязку.

Список литературы.

1. М. В. Ларичкин, Электростатический зонд для измерения профиля плотности плазмы в транспортной секции установки СМОЛА // доклад на 58 Международной научной студенческой конференции
2. INSTRUCTION MANUAL TT-SI 9001 / TT-SI 9002
3. Current transducer HASS 50 ... 600-S//22 April 2020
4. A. V. Sudnikov et al., Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness. *J. Plasma Phys.* (2020), vol. 86, 905860515.
5. К. А. Ломов, Локальные магнитные измерения в винтовой магнитной ловушке СМОЛА// Выпускная квалификационная работа, г. Новосибирск, 2020. МНСК-2020, г. Новосибирск, 10-13 апреля 2020 г.