

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

Физический факультет  
Кафедра общей физики  
Гареев Тимур Ильясович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение флуктуаций магнитного поля в многопробочной ловушке ГОЛ-  
NB**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19311

**Научный руководитель:**

к.ф – м.н, Поступаев В. В \_\_\_\_\_

Оценка научного руководителя

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

Мурахтин С. В. \_\_\_\_\_

Оценка преподавателя практикума

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин \_\_\_\_\_

Итоговая оценка

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2020

## Оглавление

<b>1</b>	Введение.....	4
<b>1.1</b>	Предмет исследования .....	4
<b>1.2</b>	Задачи.....	4
<b>2</b>	Теоретическая часть .....	5
<b>2.1</b>	О возникновении токов в плазме .....	5
<b>2.2</b>	Методика измерений.....	6
<b>2.3</b>	Обработка данных.....	7
<b>3</b>	Экспериментальная установка ГОЛ-NB.....	8
<b>4</b>	Трехмерный датчик .....	9
<b>4.1</b>	Конструкция .....	9
<b>4.2</b>	Оценка диапазона измерений.....	11
<b>5</b>	Метод обработки экспериментальной информации .....	11
<b>6</b>	Вывод .....	16
<b>7</b>	Список литературы .....	17

## **Аннотация.**

Целью работы являлось измерение флуктуаций магнитного поля, вызываемых различными процессами, возникающими в плазме, на установке ГОЛ-NB. В ходе выполнения работы потребовалось рассмотреть несколько способов реализации электромагнитной диагностики плазмы. Был смоделирован и собран трёхкоординатный датчик. Данный прибор необходим для анализа флуктуаций магнитного поля, а также определения реальных уровней и частотного спектра сигналов с установки и дальнейшего использования этой информации при конструировании многоканальной магнитной диагностики. Была разработана программа для обработки результатов на языке программирования Python. Проведён анализ тестового сигнала, полученного на установке СМОЛА, и сделан вывод, что программа работоспособна и может быть использована в дальнейшем. В связи с карантинными мерами в НГУ и ИЯФ СО РАН монтажа датчика и включений установки ГОЛ-NB не проводилось.

Ключевые слова: плазма, диагностика плазмы, индукционный датчик, методы измерений магнитных флуктуаций.

Работа выполнена в ИЯФ СО РАН.

# **1 Введение**

## **1.1 Предмет исследования**

Физика плазмы является перспективной развивающейся отраслью в науке на сегодняшний день. В ионизированном газе могут протекать процессы, весьма интересные с точки зрения энергетики: легкие атомные ядра при определенных условиях могут синтезировать в более тяжелые с последующим выделением энергии, которая может быть извлечена. Управляемый термоядерный синтез может решить некоторые проблемы, которые стоят перед человечеством.

Для изучения плазмы учёные используют установки, отличающиеся по конструкции, принципу получения и удержания плазмы. Так, в Новосибирском Институте Ядерной Физики находятся установки формата “длинные открытые ловушки”, следующие принципу нагревания так называемой холодной плазмы, а затем удержанию её магнитными пробками, областями с сильным магнитным полем.

Существующие ловушки отличаются по принципу удержания плазмы: газодинамическая, в которой плазма удерживается в постоянном магнитном поле за счёт пробок на концах ловушки; многопробочные, состоящие из множества секций пробками; установка с геликоидальной пробкой. ГОЛ-НВ представляет собой объединение первых двух типов, тем самым являясь причиной значительного уменьшения потерь плазмы[1].

Помимо самого слабо меняющегося магнитного поля, которое удерживает плазму в установке, также существуют магнитные поля, создаваемые самой плазмой – вследствие её проводимости в ходе некоторых процессов в ней возникают токи, порождающие собственные магнитные поля, т.е. флуктуацию.

## **1.2 Задачи**

Флуктуации вызываются различными причинами и способны дать информацию об особенностях протекания плазменных процессов. Какие-то явления достаточно предсказуемые, т.к. соответствуют начальным параметрам системы, некоторые же процессы являются следствием неустойчивостей,

турбулентности ионизированного газа. Но почти каждый из этих процессов имеет присущие ему особенности, которые могут найти отражение в экспериментальных данных. Данная работа посвящена измерению магнитных флуктуаций, создаваемых плазмой. Для достижения поставленной цели в начале и в ходе работы были поставлены следующие задачи:

1. Смоделировать и сконструировать датчик, фиксирующий поле в полярных координатах, который работает на принципе индукции.
2. Разработать программу для анализа экспериментальной информации.
3. Выполнить анализ тестового сигнала, измеренного аналогичной методикой на установке СМОЛА в качестве демонстрации работоспособности программы, обрабатывающей сигналы.

## **2 Теоретическая часть**

### **2.1 О возникновении токов в плазме**

В слабо неоднородном магнитном поле справедливо ларморовское приближение, при котором движение заряженных частиц можно описать так называемой ларморовской орбитой [2]. Появление, помимо магнитного, электрического или (значительного) гравитационного поля меняет ситуацию. Под действием новых сил орбита будет плавно смещаться в направлении перпендикулярном силам и магнитному полю. Так как, например, скорость дрейфа в гравитационном поле (1) зависит от заряда, ионы и электроны будут двигаться в разных направлениях – образуется дрейфовый ток. Неоднородность магнитного поля также влияет на положение вещей. Существует классификация дрейфовых токов, появляющихся в зависимости от условий, в которых находится ионизированный газ.

$$v_{\text{д}} = \frac{mc[\mathbf{g} \times \mathbf{B}]}{eB^2} \quad (1)$$

В нашей работе помимо флуктуаций, вызываемых электрическим током, пущенным по плазме вдоль установки ГОЛ-NB, будут возникать токи,

обусловленные нестабильностью исследуемого объекта. Их подразделяют на магнитогидродинамическую неустойчивость: конвекция, неравномерное распределение температуры плазмы – а также кинетическую, опять же, как следствие неравномерного распределения по скоростям, только в более мелких масштабах. Генерацией в плазме ускоряющих полей, неустойчивости значительно уменьшают время жизни плазмы [3].

Турбулентное состояние, при котором колебания плазмы становятся нерегулярными, т.е. имеют хаотичный характер, также может присутствовать.

## 2.2 Методика измерений

Такие флуктуации в поле могут быть обнаружены при его анализе. Для диагностики плазмы необходимо подобрать самый оптимальный инструмент для получения данных.

Существуют датчики, работающие за счёт эффекта Холла. Эффект, в простейшем случае, заключается в том, что в электромагнитном поле под действием силы Лоренца будут скапливаться разноименные заряды на противоположных сторонах проводящего участка, по которому изначально тѣк электрический ток. Действие силы будет продолжаться до тех пор, пока поле скопившихся зарядов не скомпенсирует её. Получаемая разность потенциалов пропорциональна магнитному полю (2).

$$\Delta\varphi = \kappa IB \quad (2)$$

Помимо вышеупомянутого датчика, существуют класс приборов, основанных на электромагнитной индукции. В катушке, помещѣнной в переменное магнитное поле, начинает течь ток, а наведенная электродвижущая сила, которая и снимается в качестве данных, пропорциональна изменению магнитного потока, исходя из закона Фарадея (3).

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Из одного только принципа определения магнитного поля вытекает первое преимущество индукционного датчика, заключающееся в том, что получаемый сигнал пропорционален производной. Это значит, что самым медленным сигналом будет являться сигнал от магнитного поля, удерживающего плазму, и обнаружение колебаний поля заметно проще. В отличие от датчика, основанного на эффекте Холла, где слабозаметные флуктуации будут теряться на фоне поля установки, т.к. сигнал в этом случае пропорционален уже величине поля. Также плюсами индукционного метода являются: скорость – датчик Холла работает значительно медленнее, а мы имеем дело с высокочастотными процессами; вычисляемая чувствительность, тогда как прибор второго типа требует специальной калибровки. Также датчики Холла – это полупроводники, они гораздо сильнее подвержены помехам от рентгеновского излучения плазмы.

После сравнения двух методов, очевидным выбором является датчик второго типа.

### **2.3 Обработка данных**

Как уже отмечалось выше, от полученных данных можно отталкиваться при определении и исследовании процессов, протекающих в плазме. Сами процессы, а именно появление токов, имеют различную пространственную структуру, и наш трехкоординатный датчик способен фиксировать положение вещей во всём пространстве.

Каждый сигнал состоит из напряжений на датчике и соответствующим моментам времени измерения. Преобразование Фурье (4) – это разложение сигнала на гармонические колебания. Так как обработать огромное количество точек составляет проблему, вместо дискретного преобразования Фурье, в котором для анализа берётся  $N^2$  точек, мы используем реализованное во многих математических пакетах быстрое преобразование, пользующееся  $N \cdot \ln(N)$  позициями. Данное интегральное преобразование позволяет построить Фурье-спектр и спектрограмму, необходимые при анализе процессов,

протекающих в плазме [4]. Алгоритм обработки данных решено было создать на языке программирования Python.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{i\omega t} dt \quad (4)$$

Об ограничениях, а также об особенностях преобразования будет сказано в практической части работы.

### **3 Экспериментальная установка ГОЛ-NB.**

ГОЛ-NB(ГОЛ – аббр. от “гофрированная открытая ловушка”, NB–аббр. “neutralbeams” (с англ. “нейтральные пучки”)) – это ловушка открытого типа, состоящая из центральной газодинамической ловушки и секций с многопробочным полем на её концах. Проектная схема готовой установки представлена на рисунке 1. Принцип её работы можно описать следующим образом.

Центральная ловушка длиной около 2,5 м и максимальной магнитной индукцией  $B_{max} = 4,5$  Тл соединена с соленоидами по 3 м каждый с двух сторон. Соленоиды содержат по 28 катушек, образующих секции, в которых удерживается плазма. Максимальная и минимальная магнитная индукция  $B_{max} = 4,5$  Тл и  $B_{min} = 3,5$  Тл соответственно. На концах слева и справа установлены баки, в которых принимается плазма. В одном из них есть дуговой источник, создающий первоначальную плазму. Затем через два инжектора пускаются нейтральные пучки, нагревающие исследуемые объект. Нагретая плазма может удерживаться в установке в двух режимах, в зависимости от поставленной задачи. Так, соленоиды могут использоваться для создания однородного магнитного поля с  $B = 4,5$  Тл, а также работать в режиме многопробочной ловушки с установленными выше конфигурациями [5].

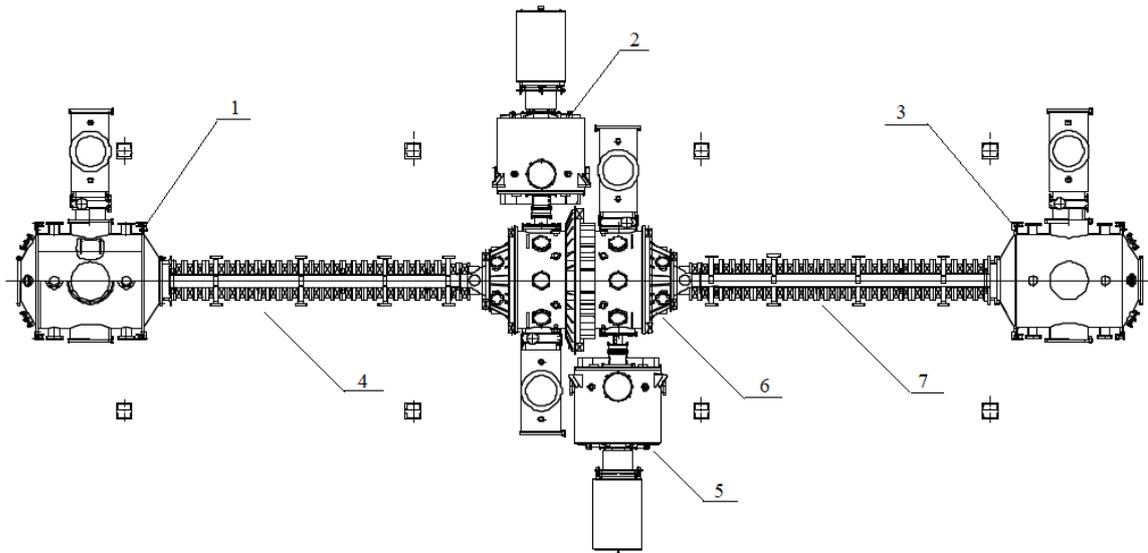


Рис. 1. Схема установки ГОЛ-НВ: 1, 3–плазмоприёмники, 2, 5 – инжекторы, 4, 7 – многопробочные секции, 6 – центральная ловушка

Для размещений различных датчиков, предусмотрены диагностические окна. При разработке нашего устройства, необходимо было отталкиваться от их геометрии. Данное окно расположено в средней плоскости центральной ловушки, поле установки в месте расположения датчика  $B = 0,3$  Тл.

## 4 Трёхмерный датчик

### 4.1 Конструкция

Принцип работы устройства, необходимого для измерений магнитного поля описан ранее. Сейчас же коснемся деталей его производства.

Основой трехкоординатного датчика являются три катушки, необходимые для снятия показаний во всём пространстве сразу. Катушки индуктивности, с числом витков 20 каждая, намотаны на каркас – кубик, сторона которого равна 20 мм. На каждой грани выполнена фаска посередине ребра с наклоном в 45 градусов, высотой 5 мм и с катетом по 3 мм в каждую сторону. Сделано это для того, чтобы при намотке витки не съезжали в сторону. Каркас сделан из полиэфирэфиркетона, или РЕЕК, – специального материала, использующегося при работах с вакуумом. Такой пластик способен выдержать довольно высокую температуру, обладает высокой прочностью и низким газоотделением[6].

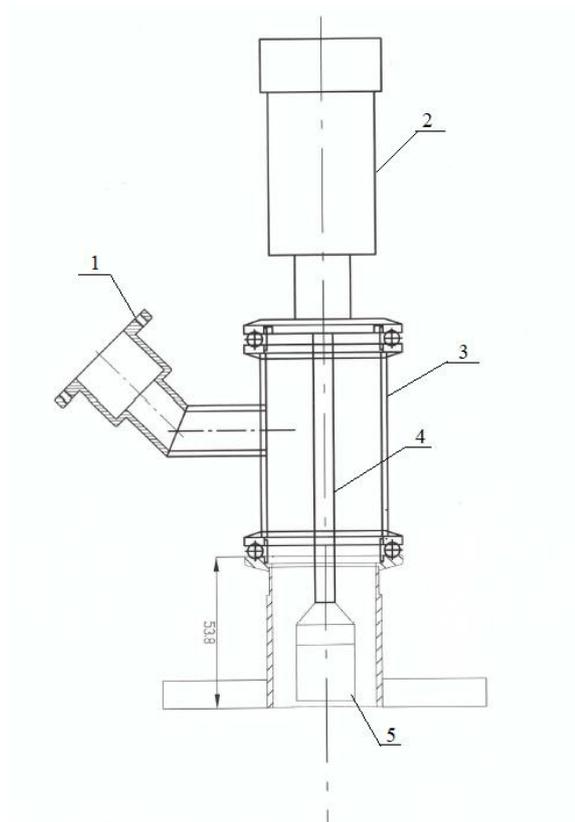


Рис. 2. Схема датчика: 1 – место подключения датчика, 2 – механизм, выдвигающий шпильку, 3 – основной каркас, 4 – шпилька, 5 – головка датчика

Кубик присоединён к шпильке (рис. 2), вдоль которой пучок проводов выводится наружу для подключения к измерительной цепи. Шпилька в нашем датчике подвижна, способна выдвигаться вдоль своей длины, что в своём роде является подушкой безопасности для устройства, а также позволяет выбрать оптимальную позицию внутри установки. Шпилька находится в основном каркасе. Один из концов каркаса выполнен в виде переходника ISO-KF 40 для вакуумных установок, поперечный размер фланца составляет 130 мм [7]. На другом конце находится механизм для регулировки уровня погружения головки датчика в установку, к которой и крепится шпилька. Помимо этого, сбоку выполнен отросток, на конце которого находится герметичная вилка 2PMГ24Б19Ш1Е2, размер корпуса который составляет 24 мм, имеет 19 контактов [8]. К ней проводятся концы катушек, через неё и выполняется подключение к измерительному прибору. Также головка датчика покрыта электростатическим экраном из фольги нержавеющей стали толщиной 20 мкм.

## 4.2 Оценка диапазона измерений

Измерительные приборы позволяют регистрировать датчику сигнал с шагом в 20 нс, откуда частота дискретизации составляет около 50 МГц. Но максимальной частотой в спектре сигнала является критическая частота Найквиста (5) по теореме Котельникова. Эта величина является границей для дискретного преобразования Фурье, иначе полученный Фурье-спектр будет значительно искажаться.

$$\nu = \frac{1}{2\Delta t} \quad (5)$$

Кроме этого есть собственное время датчика:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

, где  $R=75$  Ом (входное сопротивление АЦП), а величина индуктивности  $L$  катушки рассчитывается по формуле для индуктивности соленоида (6), где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $4\pi * 10^{-7}$  Гн,  $d$  – это средний диаметр катушки,  $N$  – число витков, а  $\Phi$  – коэффициент для отношения длины катушки к диаметру.

$$L = \frac{\mu_0 N^2 d \Phi}{4\pi} \quad (6)$$

Катушки, намотанные на кубический каркас, всё равно приближенно имеют форму длинного соленоида.

В нашем приближении  $\tau$  получилось равным около 0,6 мкс. Полоса частот находится в диапазоне примерно 800 КГц.

## 5 Метод обработки экспериментальной информации

Дальнейшим шагом в работе являлась разработка алгоритма, способного обработать экспериментальные данные, вывести спектрограмму и спектр частот. Было принято решение создать программу на языке программирования Python.

Простейший принцип обработки приведён на блок-схеме ниже (рис. 3). Процесс выполняется в несколько пунктов, были использованы несколько встроенных и дополнительно загруженных модулей. Для начала необходимо было привести данные в удобный в работе вид. Использовалась библиотека `pandas` для создания массива данных из показаний датчика и времени. Затем было использовано быстрое преобразование Фурье, реализованное через библиотеку `scipy`. Результатом обработки являются графики, отображающие сам сигнал, его Фурье-спектр и спектрограмму. Зависимости строились с помощью пакетов `matplotlib`. По причине того, что преобразование в пакете `scipy` первой точкой берёт  $t = 0$  с [4], необходимо было вырезать это значение с графиков. Итог работы программы представлен ниже.



Рис. 3. Блок-схема программы обработки

Для проверки работоспособности алгоритма был использован сигнал длительностью 20 мс, полученный аналогичным образом на установке СМОЛА. Он изображён на рис. 4 и на первый взгляд похож на обычный шум. При внимательном рассмотрении (рис.5) может быть отмечено, что колебания

имеют характерный период колебаний масштаба 10 мкс.

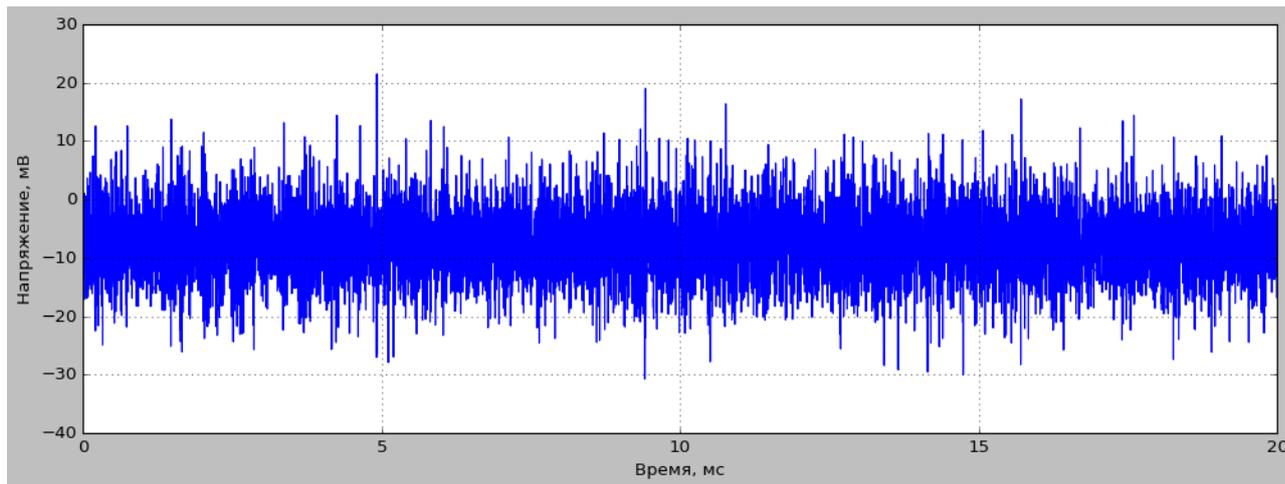


Рис. 4. Полный сигнал поля установки СМОЛА

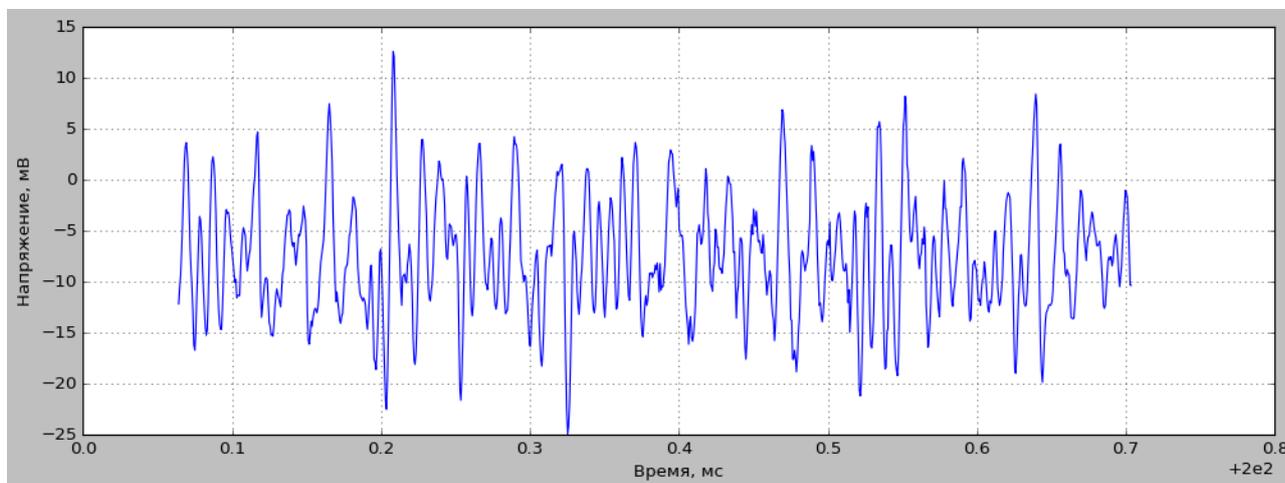


Рис. 5. Часть сигнала

Спектр частот представлен в нескольких вариантах, что позволяет провести анализ со всех возможных ракурсов. На рис. 6 изображён Фурье-спектр в линейном масштабе, легко прослеживаются особенности в области низких частот. Рассматривая спектр для короткого отрезка времени (рис. 7), можно увидеть, что двугорбый пик в области 100 кГц остался видимым, но также появились пики и на более высоких частотах.

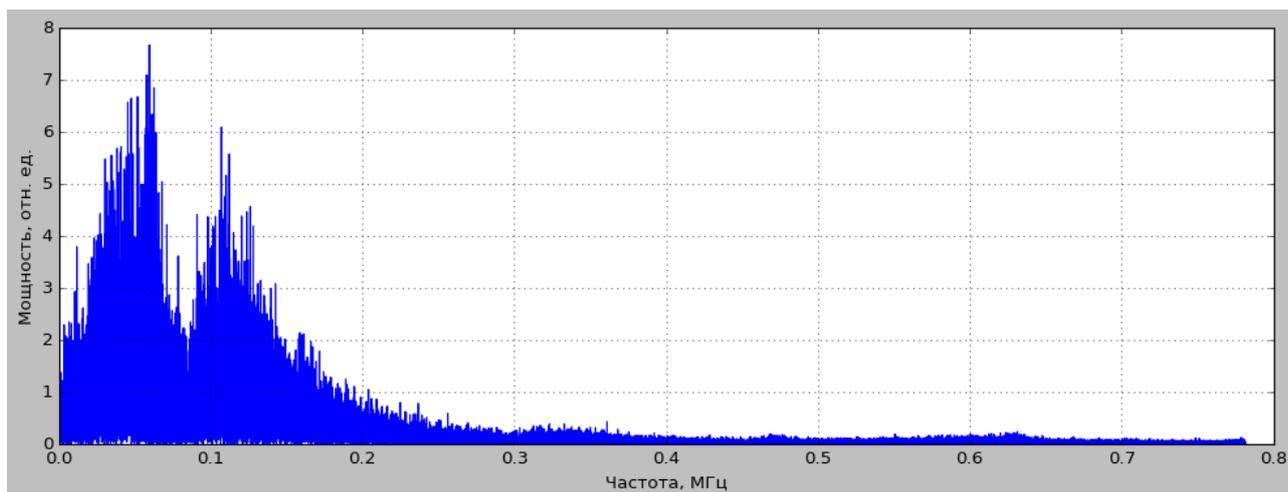


Рис. 6. Фурье-спектр всего сигнала

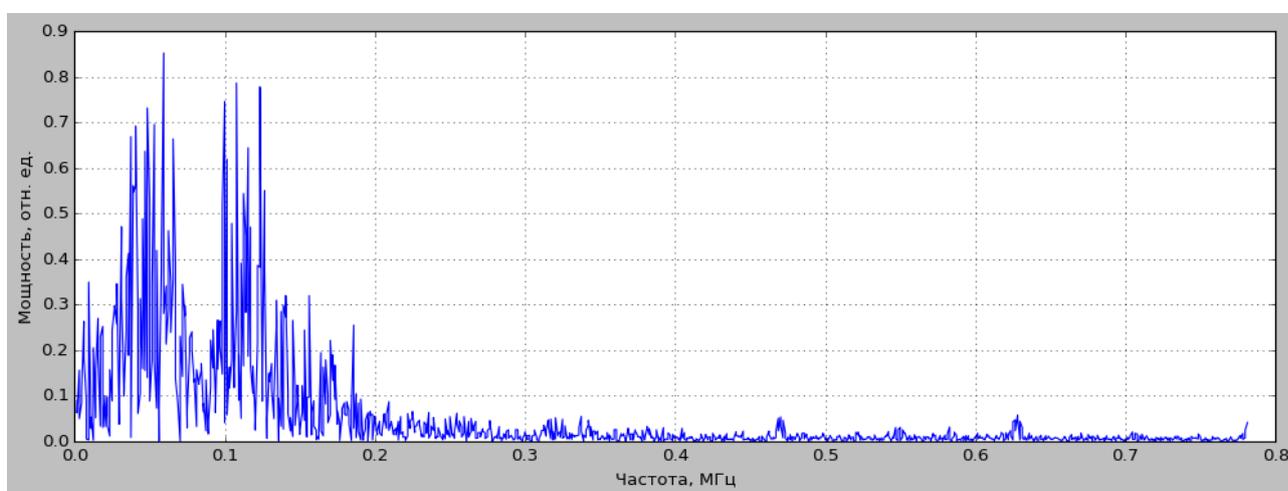


Рис. 7. Фурье-спектр части сигнала

Вводя логарифмический масштаб по оси Y (рис. 8), лучше просматриваются особенности на высоких частотах. На рис. 9 представлен спектр в логарифмическом масштабе по частоте. Из графика можно сделать вывод, что основными частотами колебаний действительно являются два пика в области 60-120 кГц.

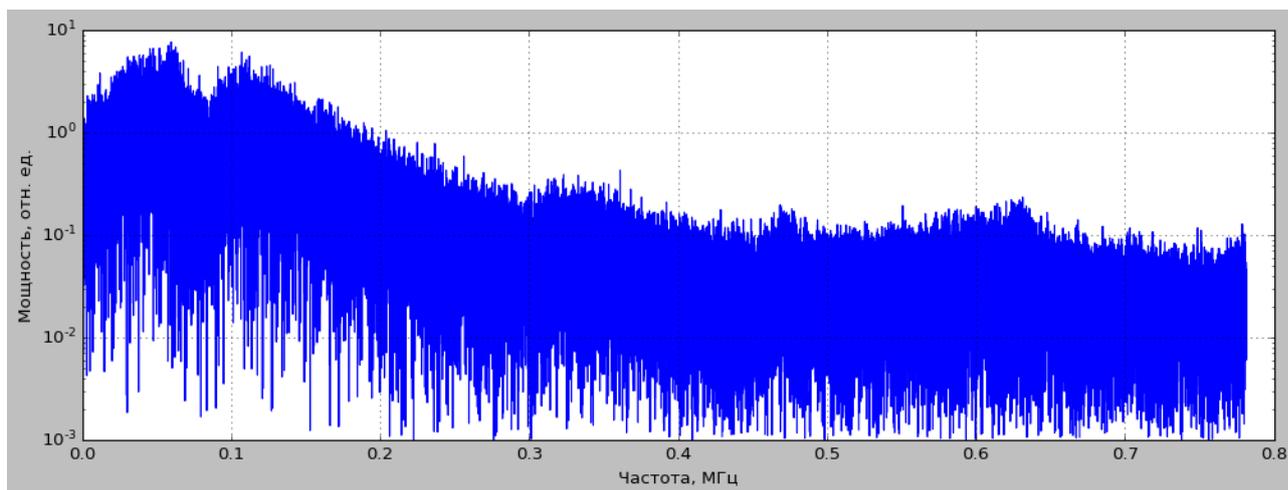


Рис. 8. Фурье-спектр с логарифмической шкалой по оси Y

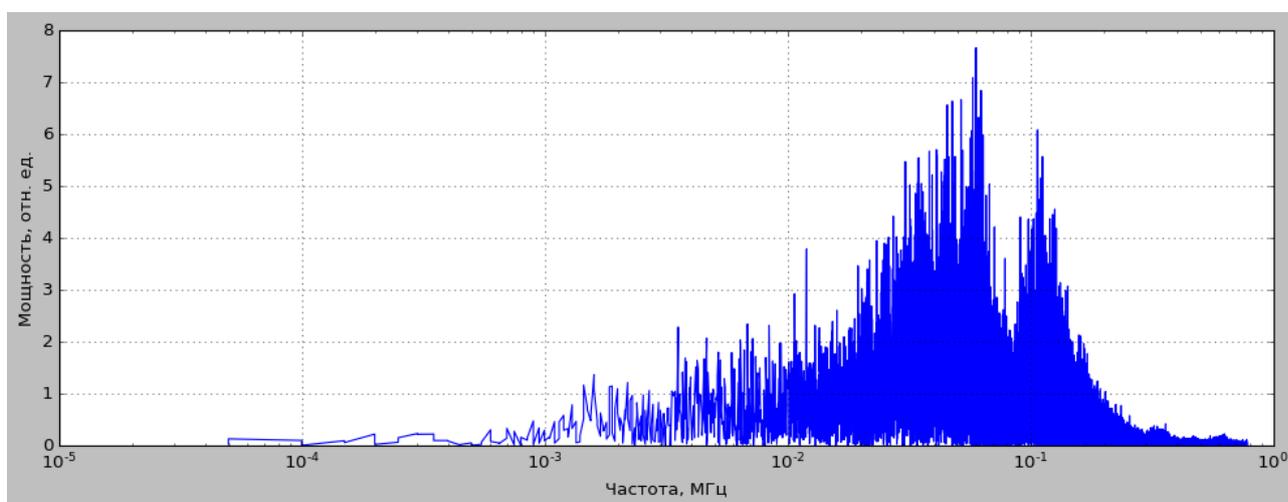


Рис. 9. Фурье-спектр с логарифмической шкалой по оси X

Спектрограмма представлена на рис. 10. По результатам можно утверждать, что на интервале по времени, который обрабатывался в качестве тестового сигнала, существенного изменения характерных частот колебаний не наблюдается. Что, в принципе, и ожидалось, поскольку плазма всего существует около 1 секунды, а мы выбрали для обработки небольшой отрезок по времени.

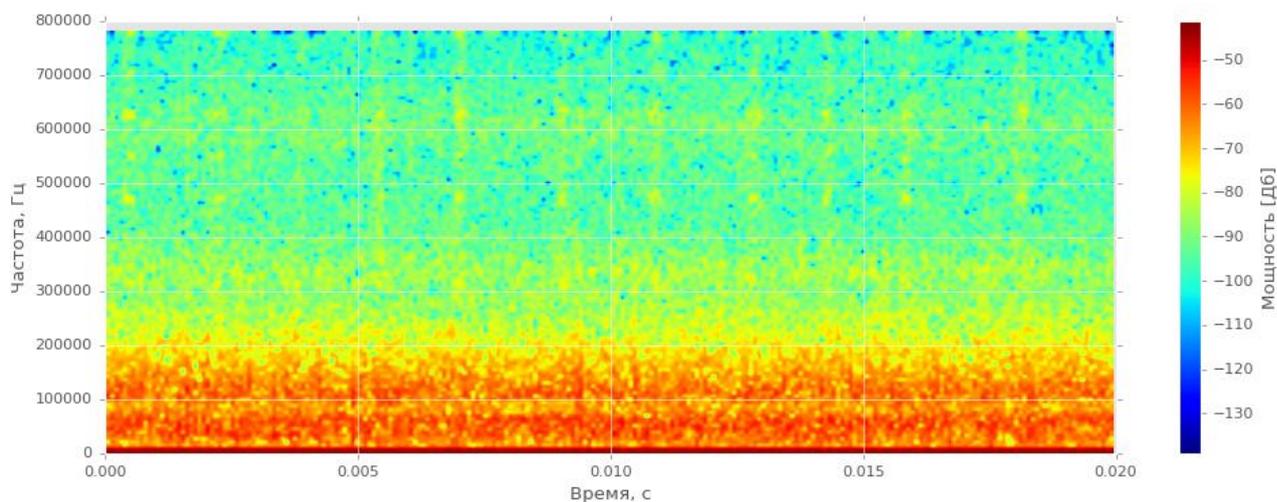


Рис. 10. Спектрограмма

За проведённую работу и помощь благодарю своего научного руководителя Поступаева В. В.

## 6 Вывод

В ходе выполнения работы был проведён анализ доступных методов измерения флуктуаций магнитного поля плазмы, произошло знакомство с установками ГОЛ-NB, принципом её работы, а также причинами возникновения токов в ионизированном газе. Был смоделирован и сконструирован датчик, с помощью которого можно проводить диагностику плазмы. Была разработана программа для обработки результатов на языке программирования Python. Работоспособность алгоритма была проверена на сигнале, полученном аналогичным образом на установке СМОЛА. К сожалению, монтаж датчика и запуск ГОЛ-NB не проводились в связи с карантинными мерами в НГУ и ИЯФ СО РАН. Основная часть работы выполнена.

## 7 Список литературы

1. <http://www.inp.nsk.su/nauka/issledovatelskaya-infrastruktura/nauchnye-ustanovki/kompleks-dol>
2. Котельников, И. А. Основы физики плазмы. Новосибирск: НГУ, кафедра физики плазмы, 2017. 480 с.
3. С.К. Жданов, В.А. Курнаев, М.К. Романовский, И.В. Цветков. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках./ Под ред. В.А. Курнаева. М: МИФИ, 2007. 368 с.
4. Б. А. Князев, В. С. Черкасский. Дискретное преобразование Фурье – как это делается: Учеб. пособие. Новосибирск, 2008. 13 с.
5. А. В. Бурдаков, В. В. Поступаев. Многопробочная ловушка: путь от пробкотрона Будкера к линейному термоядерному реактору. // Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – № 6. – С. 651 – 671.
6. [https://en.wikipedia.org/wiki/Polyether\\_ether\\_ketone](https://en.wikipedia.org/wiki/Polyether_ether_ketone)
7. [https://blms.ru/flancy\\_i\\_fitingi\\_standar](https://blms.ru/flancy_i_fitingi_standar)
8. <https://www.chipdip.ru/product/2rmg24b19sh1e2>