

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ»

Факультет физико-математических и естественных наук

Институт физических исследований и технологий

«Допустить к защите»

Директор ИФИТ

д.ф.-м.н., проф.

\_\_\_\_\_ О.Т. Лоза

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022г.

**Выпускная квалификационная работа  
бакалавра**

Направление 03.03.02 «Физика»

«АВТОРЕЗОНАНСНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР  
ЭНЕРГИЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СГУСТКОВ»

Выполнил студент \_\_\_\_\_ **Коршунов Никита Валерьевич**

Группа НФЗбд-01-18

Студ. билет № 1032182607

Руководитель выпускной  
квалификационной работы

Андреев Виктор Викторович к. ф.-м. н.,  
доцент.

Научный консультант

Чупров Денис Викторович, ст.  
преподаватель

Автор

(Подпись)

г. Москва

2022 г.

## Содержание:

<b>Введение и постановка проблемы</b> .....	2-3
<b>Глава 1. Описание установки</b> .....	4
<b>Глава 2. Устройство СВЧ-резонатора</b> .....	5-18
2.1 Анализ резонатора на основной моде.....	7-10
2.2 Модальный анализ резонатора.....	11-12
2.3 Моделирование распределения СВЧ поля в резонаторе.....	13-18
<b>Глава 3. Импульсные катушки</b> .....	19-25
3.1 Система измерения поля стационарных катушек.....	19-23
3.2 Результат измерения стационарного поля.....	24-25
<b>Глава 4. Генератор импульсного тока</b> .....	26-30
<b>Глава 5. Импульсные катушки</b> .....	31-44
5.1 Поле импульсных катушек.....	31-35
5.2 Сканирование магнитного поля.....	36-44
<b>Глава 6. Спектр излучения плазменных сгустков</b> .....	45-49
<b>Заключение</b> .....	50
<b>Библиографический список</b> .....	51

## **Введение:**

Явление электронного циклотронного резонанса (ЭЦР), наблюдаемое в результате совпадения собственной частоты вращения заряженной частицы по ларморовской окружности в магнитном поле и частоты электромагнитного поля, играет уникальную роль во многих областях физики плазмы, поскольку является высокоэффективным способом нагрева плазмы [1, 2]. В настоящее время, его применяют для получения многозарядных ионов [3], создания электрических ракетных двигателей и ускорителей частиц [4], используется для передовых методов плазменного травления полупроводников [5] и во многих других методах обработки поверхностей.

Однако величина энергии электронов, получаемая данным методом ограничена релятивистской расстройкой частоты [6] между частотой вращения заряженной частицы и частотой создаваемого поля генератором, по причине увеличения массы электронов в условиях постоянного магнитного поля.

Одним из способов поддержания резонансных условий, является плавное увеличение напряжённости магнитного поля по мере роста энергии электронов [7, 8]. Данный способ носит название гиромагнитного авторезонанса (ГА). Особенностью которого является сохранение фазовой устойчивости при движении заряженной частицы в условиях циклотронного резонанса. Предельная энергия заряженных частиц в данном случае ограничена лишь потерями на синхротронное излучение.

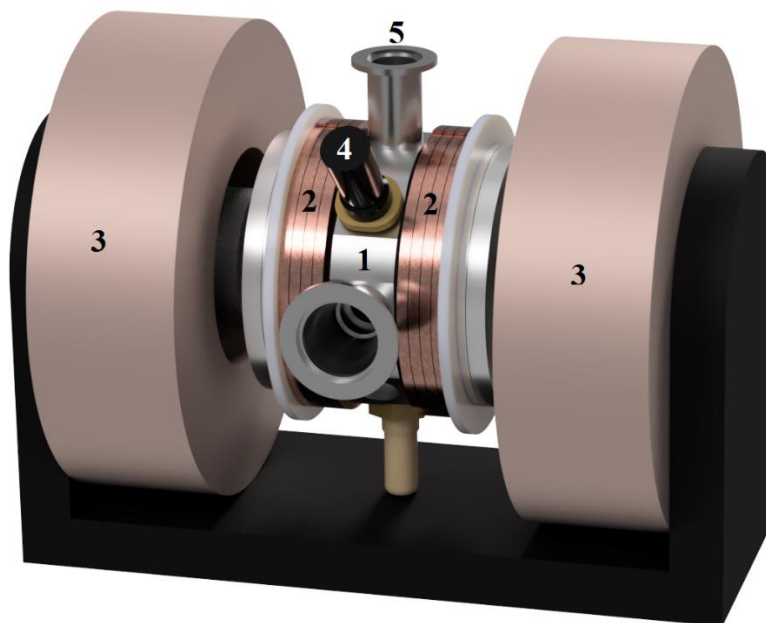
Таким образом, способ нагрева плазмы гиромагнитным авторезонансом позволяет получить частицы с существенно большими энергиями (в сравнении с классическим ЭЦР). В практической реализации, это позволит устройствам, основанным на ГА являться источниками релятивистских электронов при сохранении компактных размеров установки и служить в качестве генераторов жёсткого рентгеновского и синхротронного излучения [10, 12], коллективного ускорителя ионов [13, 14], может служить для получения многозарядных

ионов тяжёлых элементов [3, 15] и в других приложениях, не исключая приложений, описанных для ЭЦР.

Основной целью данной работы, является создание и исследование именно такого компактного устройства, основанного на методе гиромагнитного авторезонанса, обеспечивающего импульсно-периодическую генерацию плазменных сгустков.

## Описание установки

Установка (Рис.1) представляет собой вакуумно-плотный СВЧ-резонатор (1) с размещёнными поверх него импульсными катушками (2), помещённые в поле магнитной ловушки пробкового типа, образованная стационарным электромагнитом вейсовского типа (3), с системами СВЧ-нагрева (4) и газонапуска (5).

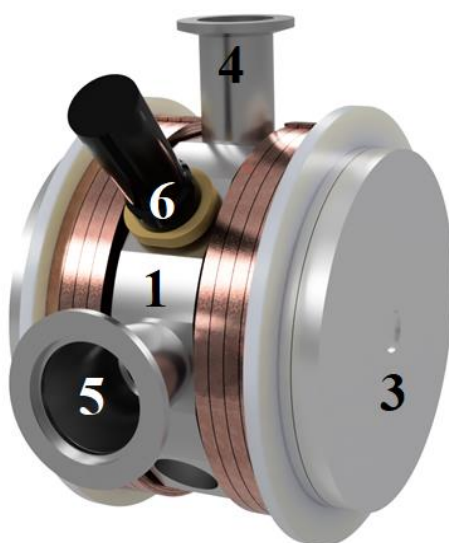


*Рисунок 1*

Из камеры СВЧ-резонатора откачивается газ, после чего производится напуск инертного газа (Ar), который в следствии естественного наличия свободных зарядов, разогревается и ускоряется СВЧ-волной в поле пробочной конфигурации, в этот же момент включается генератор импульсного поля катушек, обеспечивая плавное нарастание магнитного поля, тем самым поддерживая режим ГА. После отключения генератора, происходит удержание частиц за счёт плавно спадающего тока системы рекуперации импульсных катушек. Один из портов резонатора закрыт бериллиевой пластиной, толщиной 1мм, через которую регистрируются кванты тормозного излучения при помощи спектрометра на основе сцинтиллятора NaI(Ta).

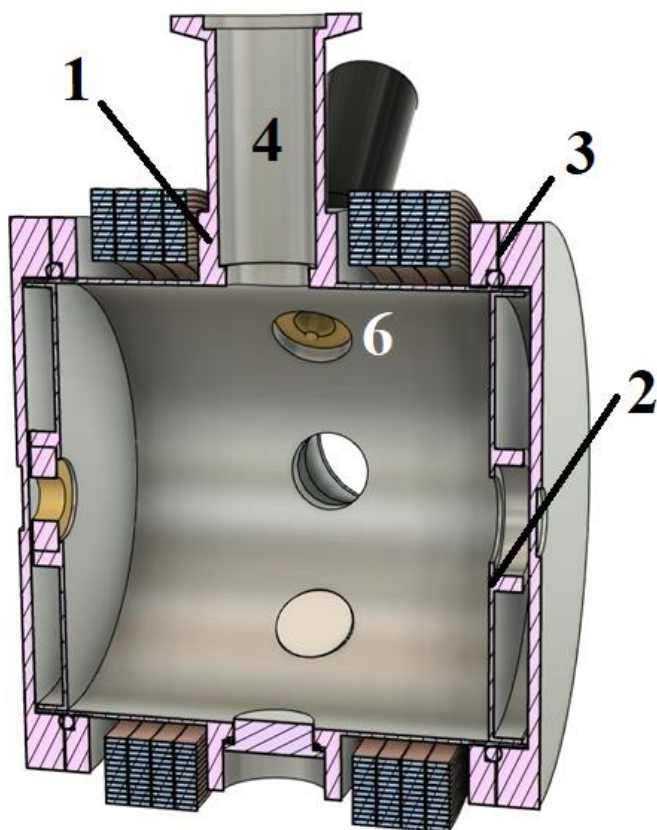
В следующих разделах каждый узел установки, будет описан подробнее.

## Устройство СВЧ-резонатора

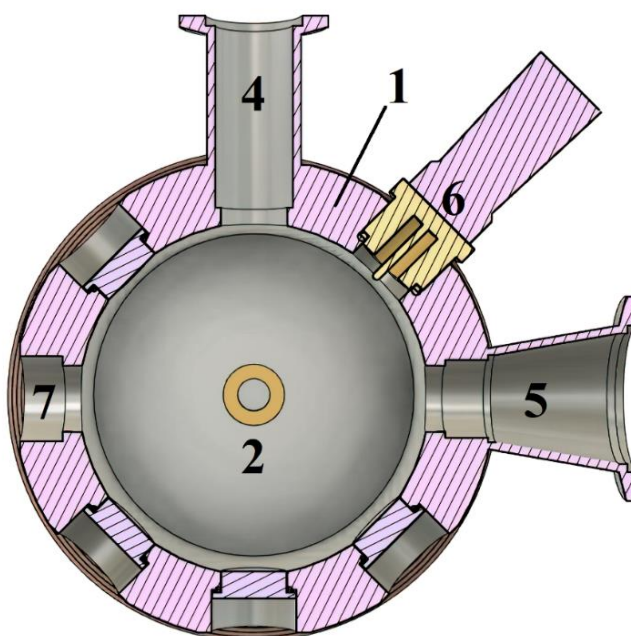


*Рисунок 2*

В свою очередь, резонатор представляет собой цилиндр из нержавеющей стали, толщиной стенки 1мм, с расположенным в медианной плоскости массивным ребром жёсткости, называемым в дальнейшем основанием (1). В торцах цилиндра на резьбовом соединении, расположены подвижные поршни (2), позволяющее отъюстировать длину резонатора, обеспечивая точную подстройку частоты. Поверх же самих поршней, имеются торцевые алюминиевые крышки (3), обеспечивающие вакуумную плотность резонатора. Основание имеет восемь осесимметричных отверстий, называемые портами, два из которых имеют приваренные фланцы: KF25 (4) предназначенное для установки газона пуска и KF40 (5) для подключения к вакуумной системе. В отверстие, расположенное между фланцами, установлен СВЧ фидер (6), представляющий из себя коаксиальный кабель с регулируемой по глубине ввода центральной жилой. Отверстие (7), расположенное напротив фланца KF40, закрыто бериллиевой пластиной толщиной 1мм, и предназначено для регистрации квантов тормозного излучения. Оставшиеся порты, закрыты вакуумноплотными заглушками, на место которых в дальнейшем, будут установлены дополнительные системы диагностик.



*Рисунок 3 Осевое сечение резонатора*



*Рисунок 4 Медианное сечение резонатора*

## Анализ резонатора на основной моде

Был произведён анализ резонатора на основной моде колебаний  $H_{111}$ :

Для этого в СВЧ фидер поступал импульсный сигнал с аналогового генератора сигналов Agilent Technologies E8257D, имеющий приближенные временные параметры к экспериментальным:

Частота - 2,45 ГГц, соответствующая конструкционно расчётной основной моде резонатора.

Длительность импульса – 500 мкс

Амплитуда сигнала – 25dBm (316 мВт)

Частота следования импульсов – 20 Гц

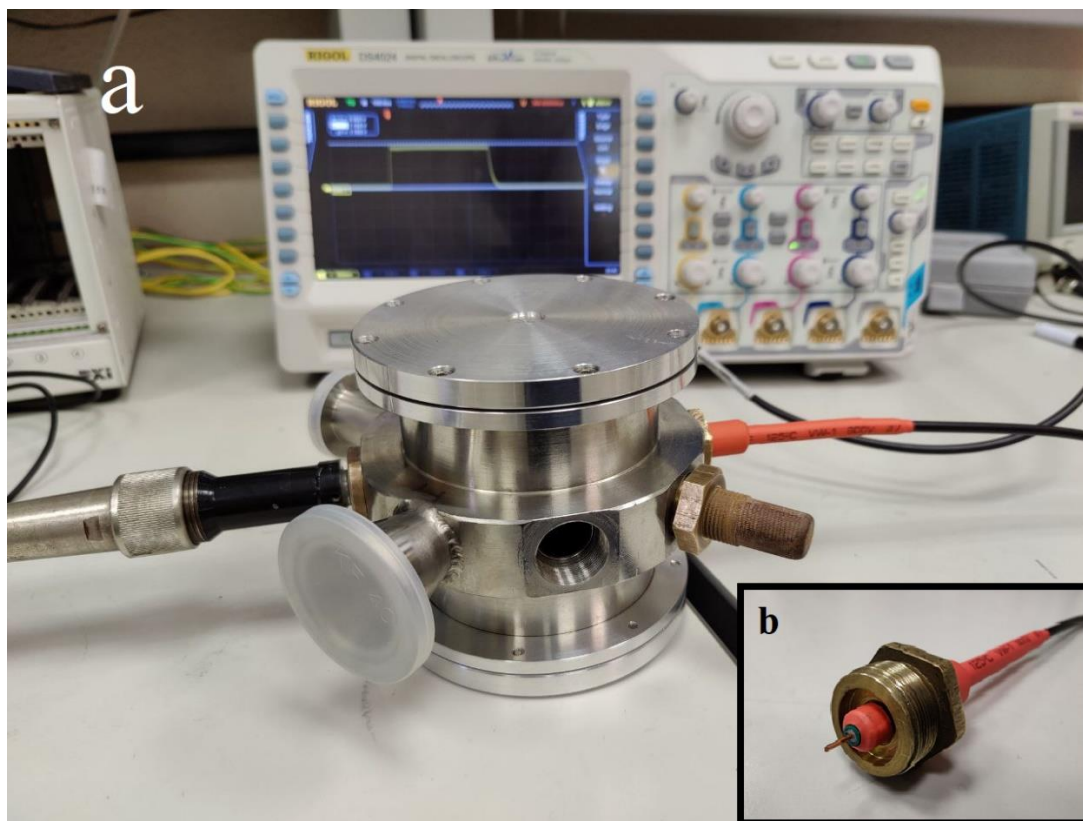


Рисунок 5

На противоположном порту к фидеру, вдоль силовых линий электрического поля была расположена штыревая антенна (Рис.5b), подключённая через СВЧ диод MUEGGE-GERLING MM1001B-111AB к осциллографу RIGOL DS4024. На котором наблюдалась следующая осциллограмма:



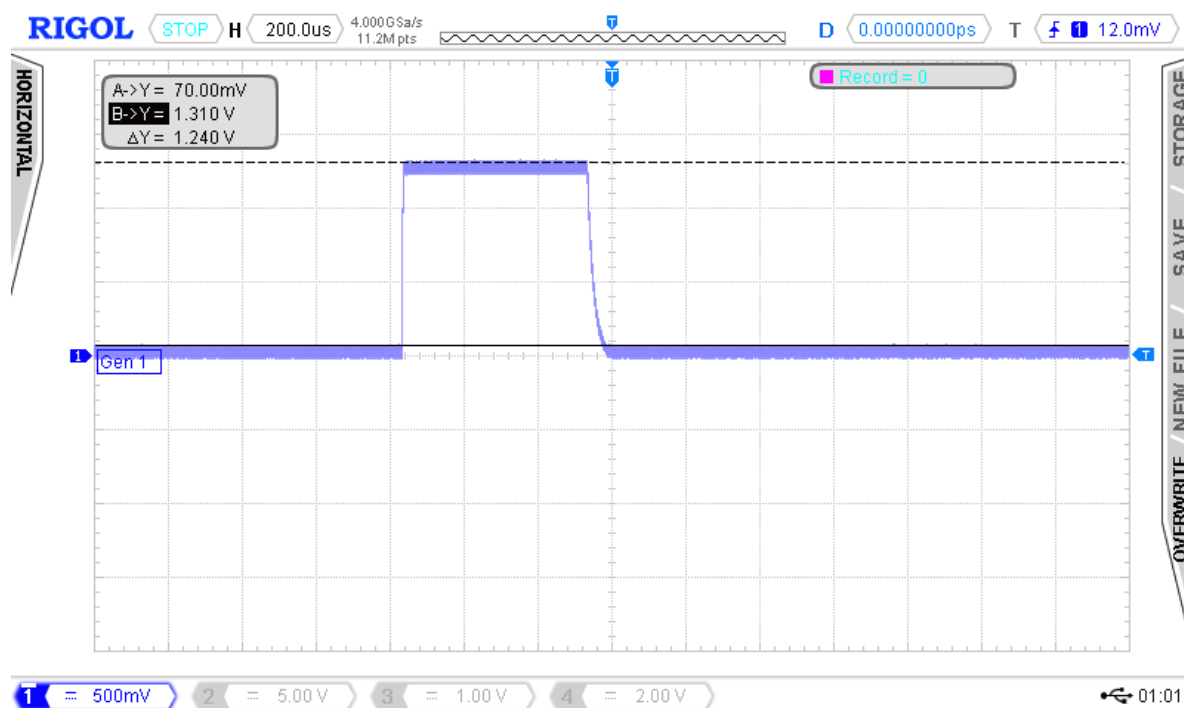


Рисунок 6

Путем вращения поршня по резьбе с шагом 1 мм, добивалось такое положение поршня, при котором наблюдался максимум амплитуды сигнала с штыревой антенны. Процесс был осложнён дребезгом контакта на по резьбе, из-за чего условие максимума было не постоянным. Однако после установки торцевых крышек, устанавливался надёжный контакт из-за равномерного обжатия резонатора, уплотнительной резинкой, находящейся в крышке. Дополнительно условие наблюдения максимума амплитуды, регулировалось силой натяжения отдельных болтовых соединений в крышке.

После фиксации положения поршней, было произведено измерение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) резонатора (Рис.7), путём изменения частоты сигнала, подаваемого с генератора:

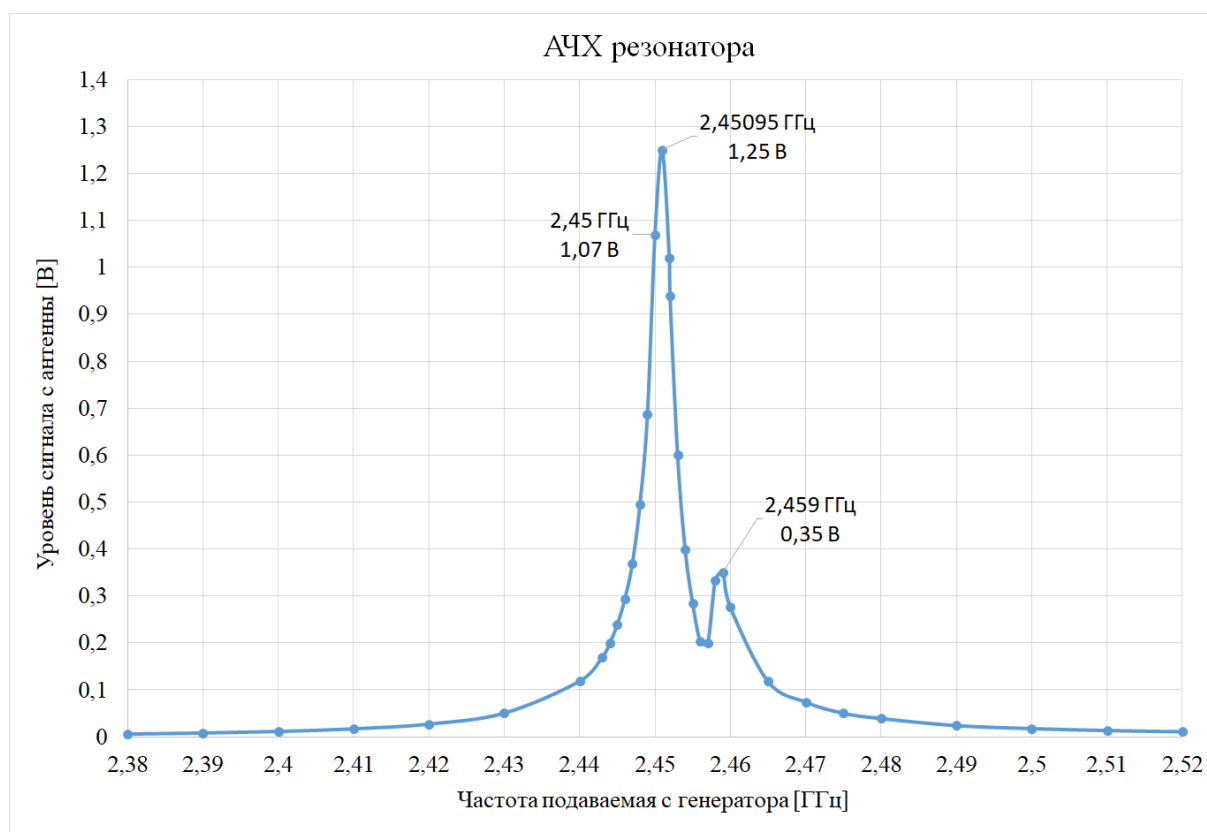


Рисунок 7

Однако, вместо ожидаемого одиночного характерного пика, было обнаружено два резонансных максимума, в окрестности основной частоты. Природа наблюдаемых пиков, является предметом дискуссий.

После ручного снятия АЧХ, при помощи генератора функций было осуществлено так называемое “Сви́пирование” частоты – функция линейного роста частоты генерируемого сигнала во времени, которая синхронизируется с развёрткой осциллографа. В результате чего на осциллограмме можно наблюдать АЧХ (Рис.8), полученную ранее ручным методом. Для корректного отображения АЧХ, скорость роста частоты излучения, должна быть много больше суммы характерных времён нарастания и затухания СВЧ волны в резонаторе.

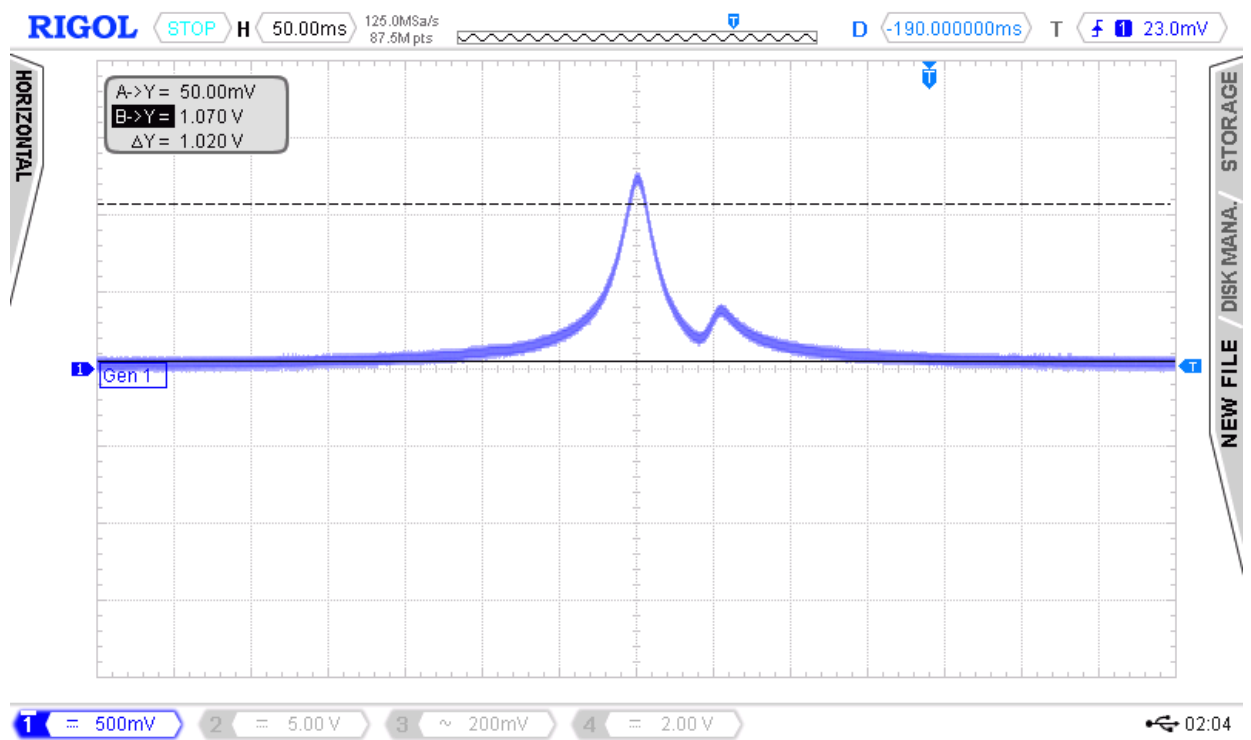


Рисунок 8

Измеренная добротность резонатора составляет:

$$Q = \frac{f_{\text{рез}}}{\Delta f_{0.5}} = \frac{2.45095 \text{ ГГц}}{0,00454 \text{ ГГц}} = 540, \text{ при } \Delta Q = 30 \text{ (1)}$$

## Модальный анализ резонатора

Аналогичным методом произведём построение АЧХ резонатора в диапазоне от 100 кГц до 5 ГГц (Рис.9):

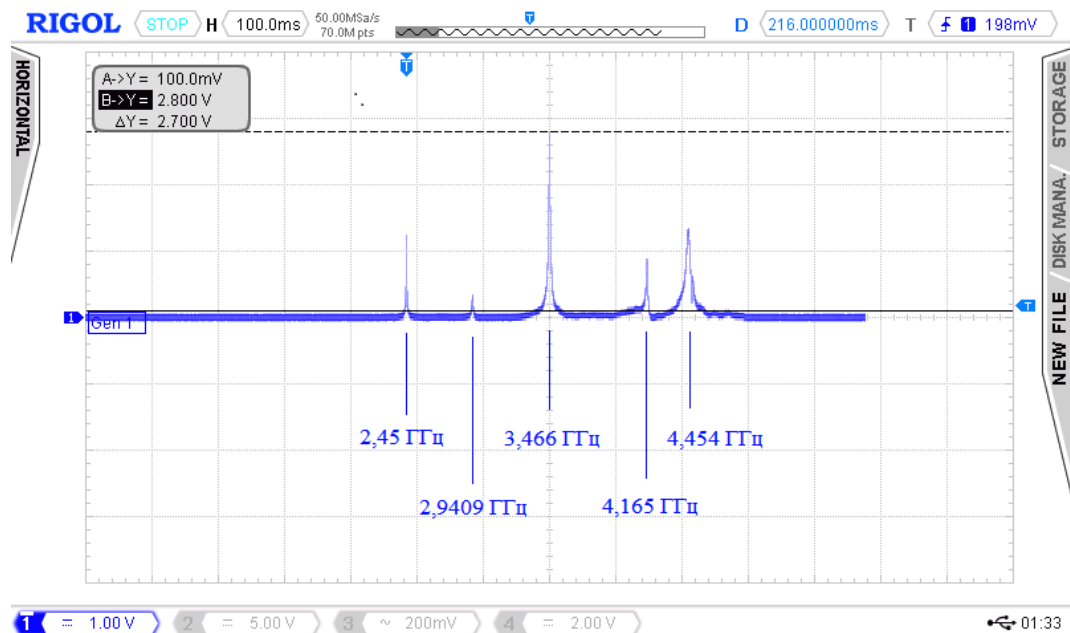


Рисунок 9

Определим резонансные моды для данных частот, которые можно найти из следующего уравнения для волны  $H_{mnp}$  и  $E_{mnp}$  типа, которые получены из решения трёхмерного волнового уравнения Гельмгольца для вектора Герца:

$$H \text{ тип: } \omega_{mnp} = c \sqrt{\left(\frac{\chi_{mn}}{2\pi R}\right)^2 + \left(\frac{p}{2l}\right)^2} \quad (2)$$

$$E \text{ тип: } \omega_{mnp} = c \sqrt{\left(\frac{\vartheta_{mn}}{2\pi R}\right)^2 + \left(\frac{p}{2l}\right)^2} \quad (3)$$

Где:

$\omega_{mnp}$  – резонансная частота собственных колебаний

$\chi_{mn}$  – корень с номером  $m$  производной функции Бесселя порядка  $n$

$\vartheta_{mn}$  – корень с номером  $m$  производной функции Бесселя порядка  $n$

$l$  – длина резонатора, равная 93,85 мм

$r$  – радиус резонатора, равный 47 мм

Корни  $\chi_{mn}$  производной функции Бесселя порядка  $n$ :

Таблица 1

$n \backslash m$	0	1	2
1	3,832	1,840	3,054
2	7,016	5,335	6,705

Корни  $\vartheta_{mn}$  производной функции Бесселя порядка  $n$ :

Таблица 2

$n \backslash m$	0	1	2
1	2,405	3,832	5,135
2	5,520	7,016	8,417

Таким образом частотам соответствуют следующие моды:

Таблица 3

Частота моды	2.45095 ГГц	2,941 ГГц	3,466 ГГц	4,165 ГГц	4,454 ГГц
Вид колебаний (Расчётная частота)	$H_{111}$ (2,457 ГГц)	$E_{011}$ (2,919 ГГц)	$H_{211}$ (3,489 ГГц)	$H_{011}/E_{111}$ (4,208 ГГц)	$H_{212}$ (4,454 ГГц)

## Моделирование распределения СВЧ поля в резонаторе

Была составлена высокоточная трёхмерная модель резонатора в системе автоматизированного проектирования Autodesk Inventor, по измерениям, произведённым непосредственно на резонаторе. В геометрии была учтена так же эллиптичность резонатора – отношение длины большой (b) и малой (a) полуоси резонатора, составляющая:

$$k = \frac{b}{a} = \frac{32,17 \text{ мм}}{31,83 \text{ мм}} \sim 1,011 \quad (4)$$

После чего модель была экспортирована в программный пакет COMSOL Multiphysics, в основу работы которого положен метод конечных элементов. Используемая мелкость использованной сетки разбиения на конечные элементы для расчёта задачи, представлена на Рис.10.

В расчётной модели не были учтены тепловые потери на стенках резонатора, источник был представлен в виде коаксиального порта с волновым сопротивлением 50 Ом и мощностью в 5кВт. Частота возбуждения составляла 2,45 ГГц.

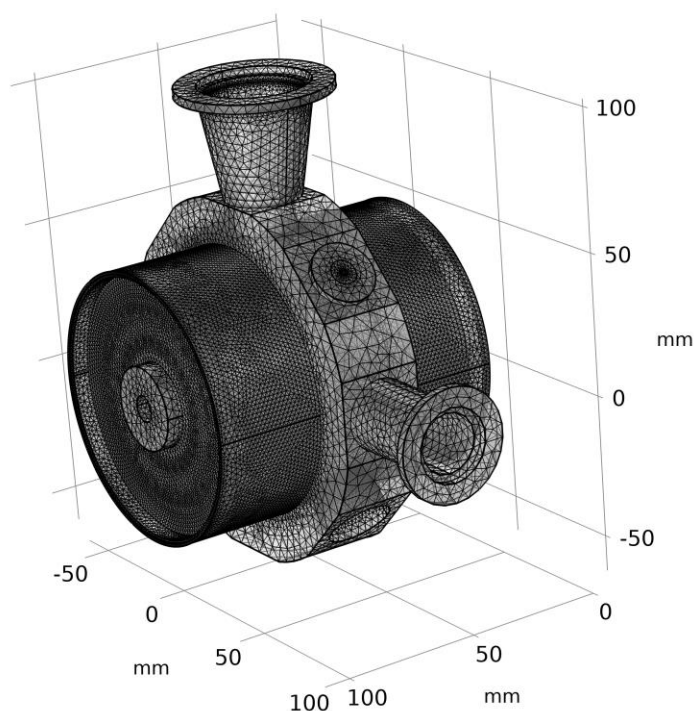
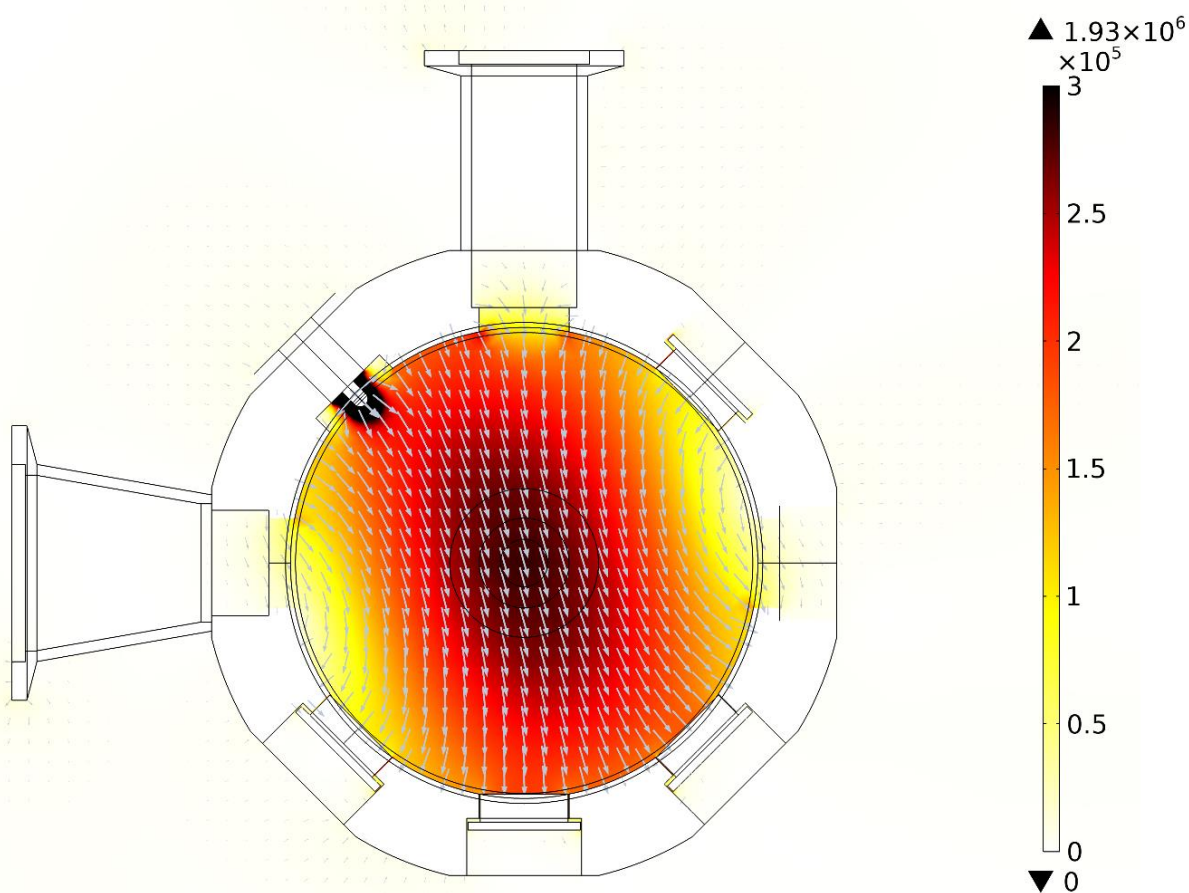


Рисунок 10

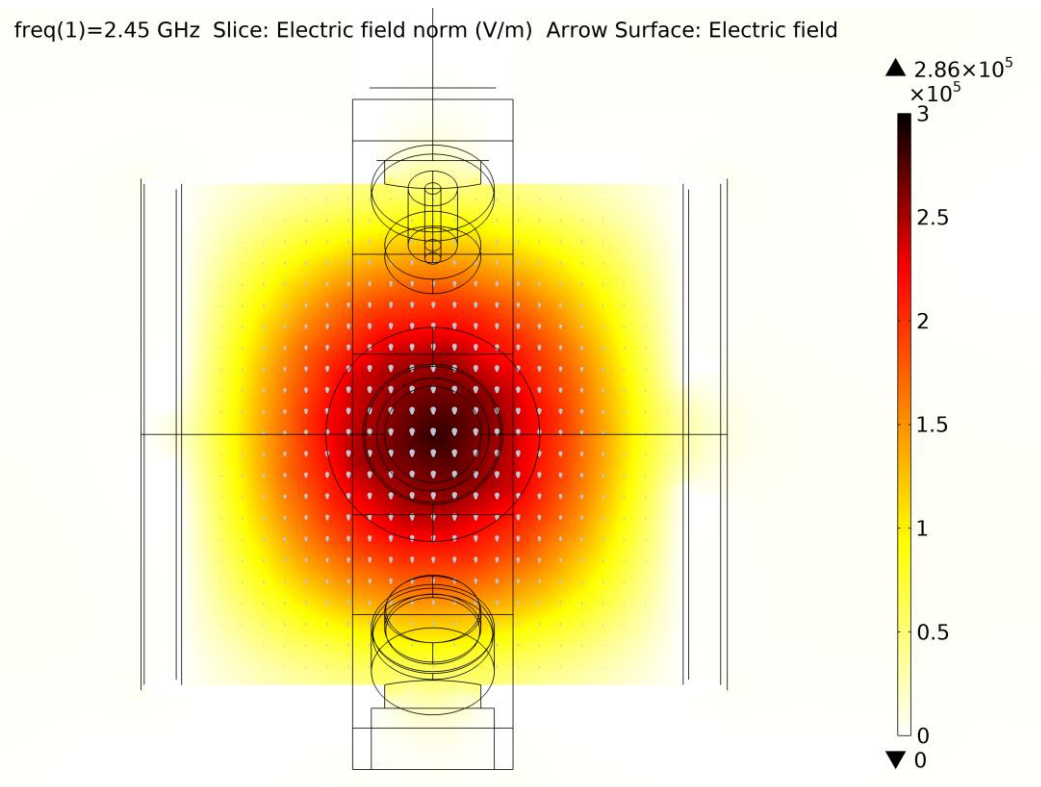
По результатам расчёта максимальная напряжённость поля в центре резонатора, при заданной геометрии составляет 2,8 кВ/см. Модой колебаний в данном случае является  $H_{111}$ , однако заметен её поворот, относительно вектора напряжённости возбуждающего поля. Вероятно, по причине малой эллиптичности резонатора. Кроме того, можно наблюдать, как поле частично проникает вглубь портов.

Визуализации напряжённости и направления электрического поля в различных ортогональных проекциях представлены на Рис.11-13.

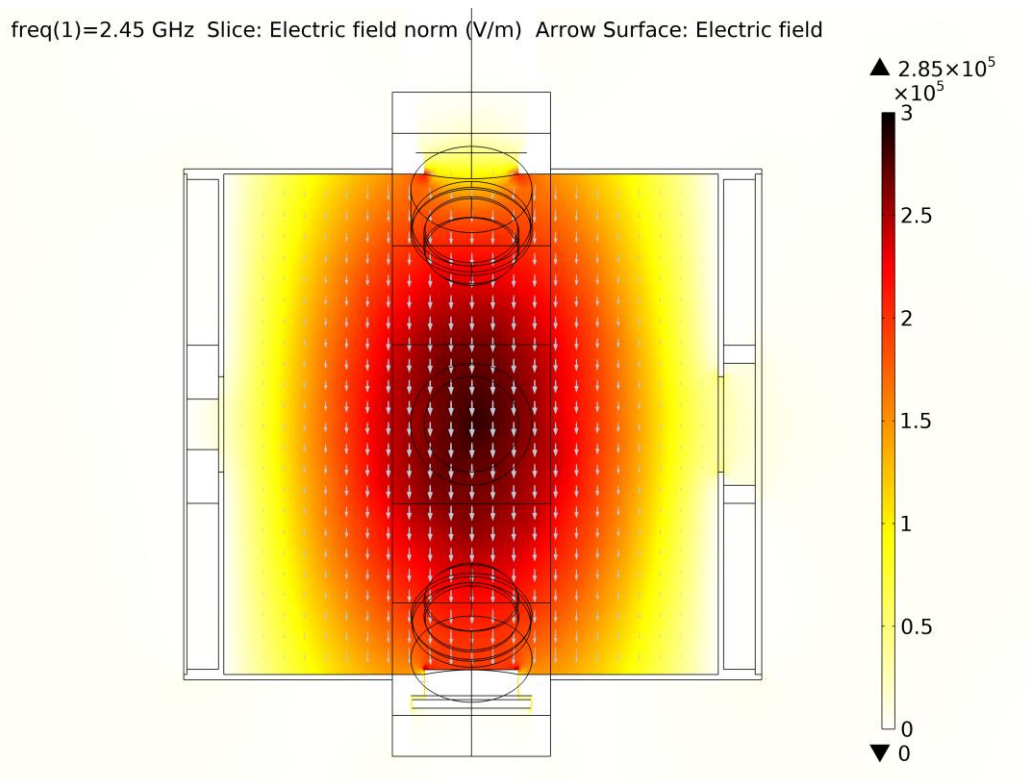
freq(1)=2.45 GHz Arrow Surface: Electric field Slice: Electric field norm (V/m)



*Рисунок 11 Распределение поля в медианной плоскости резонатора*



*Рисунок 12 Распределение поля со стороны порта газонапуска*



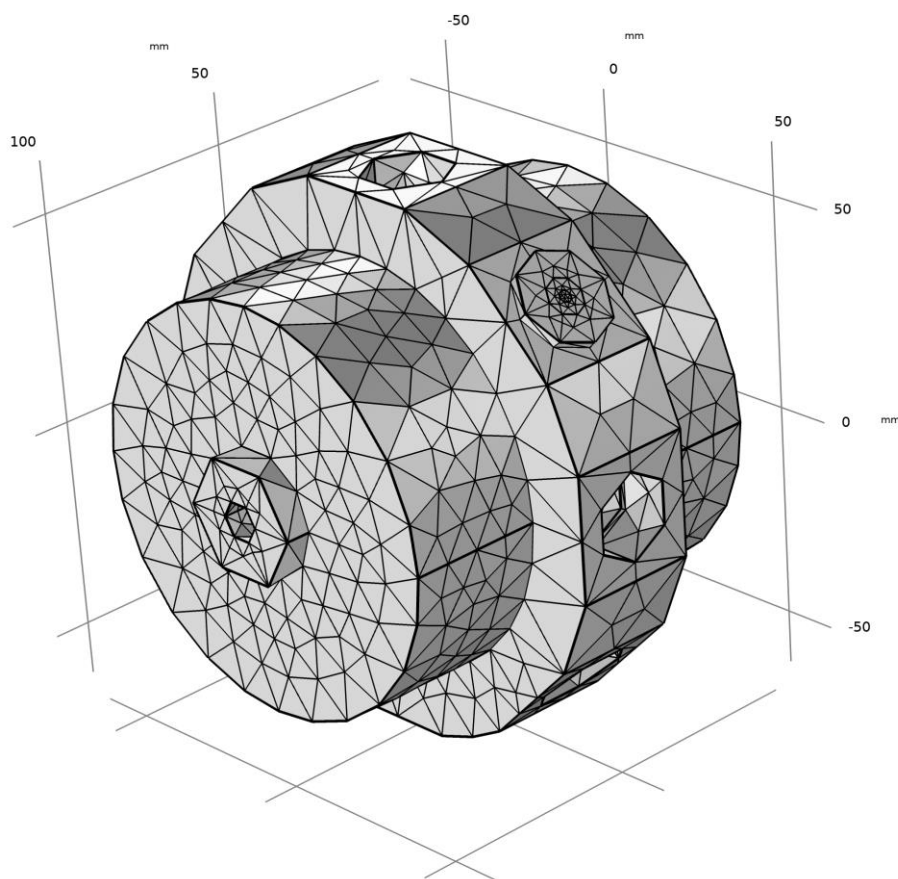
*Рисунок 13 Распределение поля со стороны порта подключения к вакуумной системе*



Исследование двух резонансных максимумов, наблюдаемых в окрестности частоты 2,45 ГГц.

Для того, чтобы выяснить природу возникновения двух резонансных максимумов, вместо одного расчётного. Было принято решение произвести моделирование электрического поля для 120 точек, в окрестности резонансной частоты.

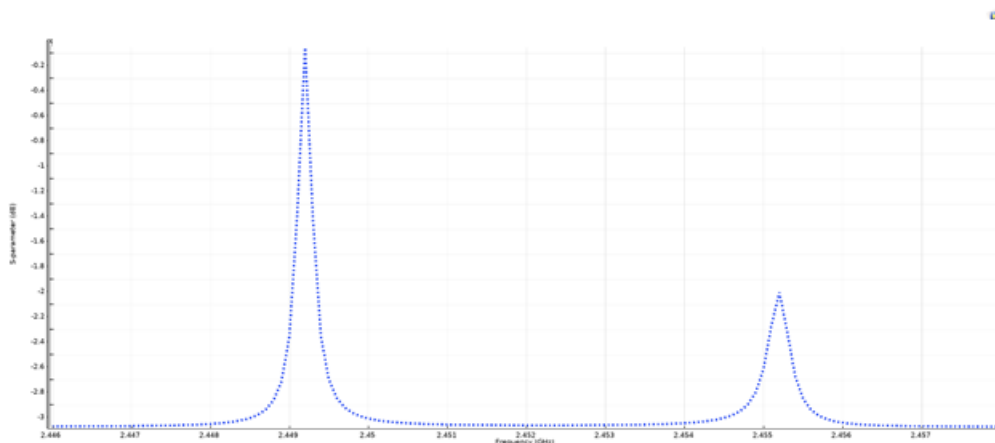
Для ускорения расчёта, все элементы геометрии не оказывающее влияние на распределение поля были удалены из модели, а сетка модели была максимально упрощена (Рис. 14)



*Рисунок 14*

Несмотря на то, что данная мелкость разбиения несёт численные ошибки, как по значениям резонансных частот, так и по распределению поля. Происходящие физические процессы остаются прежними.

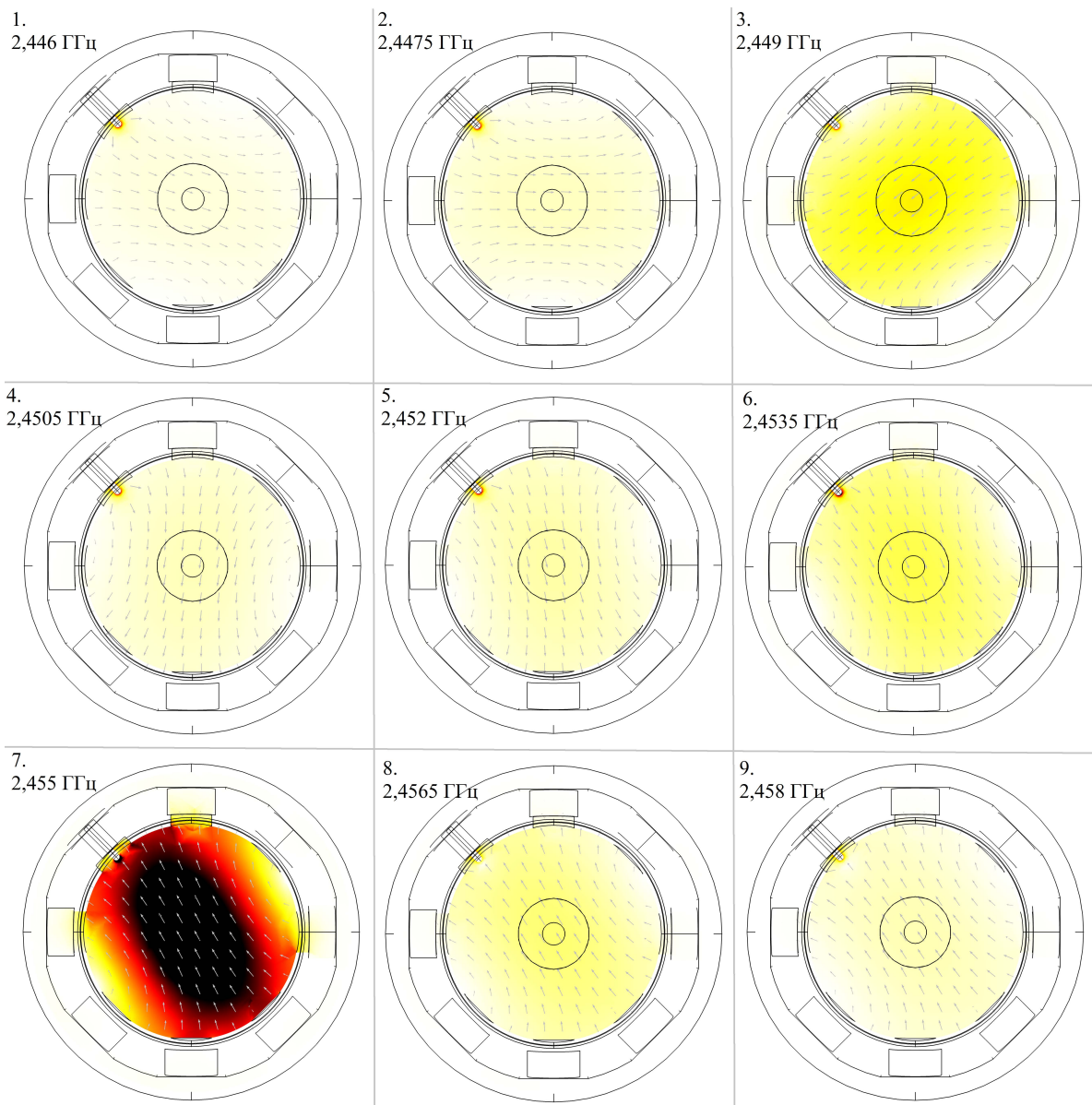
По результатам вычислений был построен график амплитудно-частотной характеристики. (Рис.15)



*Рисунок 15*

В расчётном графике так же наблюдаются два резонансных пика, как и в экспериментальном исследовании. Однако ширина резонансных линий коэффициента передачи значительно меньше, это легко объяснить, если посмотреть на частотную визуализацию поля:

На картинках (Рис.16) отчётливо наблюдается вращение моды  $H_{111}$ , относительно оси резонатора. Поскольку штыревая антенна, при помощи которой снималась АЧХ резонатора, располагалась напротив СВЧ фидера, то проекция вектора электрического поля на антенну непрерывно менялась. Этим можно объяснить отличие в ширине резонансных пиков. А появление двух резонансных пиков, вместо одного, вероятно происходит из-за малой эллипсности резонатора.



*Рисунок 16*

## Система измерения поля стационарных катушек

Для описания физических процессов, происходящих в СВЧ-резонаторе, необходимо знать топологию магнитного поля внутри резонатора, которая сложно поддаётся расчёту по причине большого количества неизвестных параметров внутренней структуры электромагнита. И данная задача по нахождению топологии поля решалась экспериментально – путём непосредственного измерения индукции магнитного поля.

В первом приближении, удобно считать топологию создаваемого поля осесимметричной, а систему координат использовать цилиндрическую, ось которой будет совпадать с осью симметрии. (Рис. 17) Таким образом, достаточно измерить значения поля в половине осевого сечения.

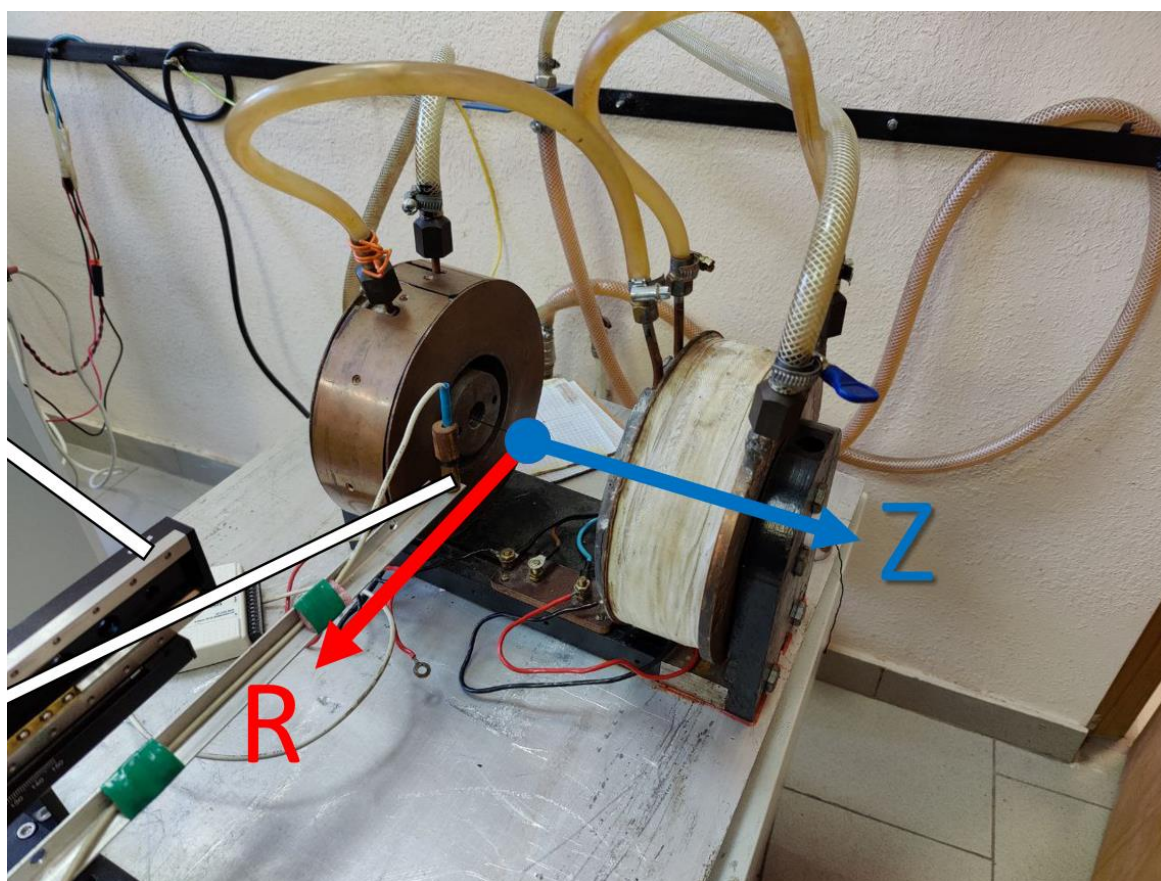
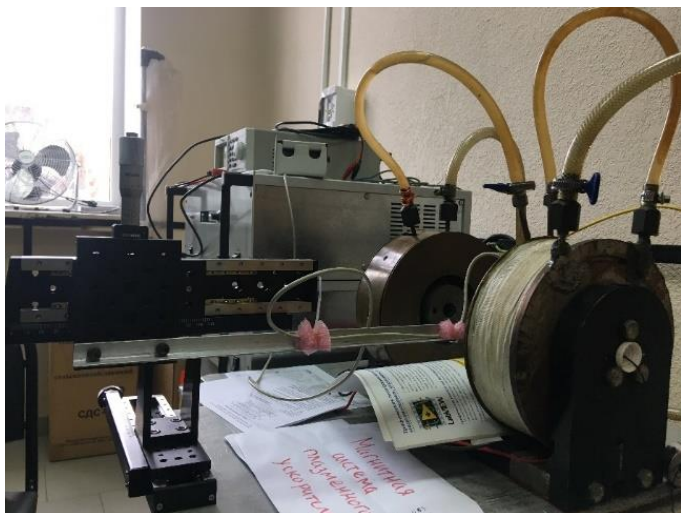
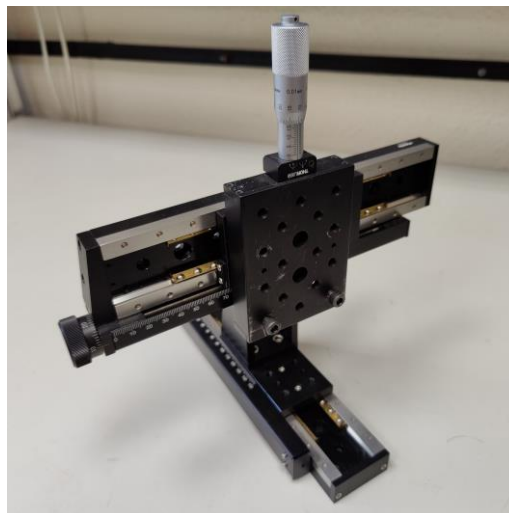


Рисунок 17

Для точного позиционирования датчика магнитного поля, была использована жёстко закреплённая система, собранная из прецизионных линейных трансляторов (Рис. 18-19). Позволяющая осуществлять перемещение по трём декартовым осям с шагом 10 мкм, однако после юстировки положения датчика вдоль оси, проходящей через центры магнитов, перемещение осуществлялось по двум координатным осям: вдоль оси Z и вдоль оси R, проложенные из центра симметрии магнитной системы.



*Рисунок 18*

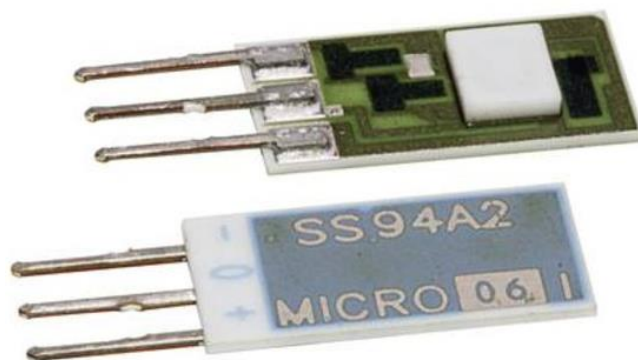


*Рисунок 19*

Измерения магнитного поля проводились с шагом 5 мм, откладываемые из начала координат, как отдельно для правого и левого соленоида, так и при включении двух соленоидов. Причём токи в катушках подбирались таким образом, чтобы давали равную индукцию в центре магнитной системы, а суммарная индукция при включении двух катушек составляла 875 гаусс – условие ЭЦР, на частоте 2,45 ГГц, на которую настроен резонатор, устройство которого будет рассмотрено в отдельной главе.

Для измерения магнитного поля использовался датчик холла Honeywell SS94A2D (Рис.20), питаемого от лабораторного GW INSTRON PSP-603. Рабочий диапазон которого составляет  $\pm 2500$  Гс, при чувствительности 1 мВ/Гс и относительной погрешности не более 1,5% от показания, время отклика 3 мкс. Для каждого случая, измерения поля проводились в проекциях двух компонент

– радиальной компоненты, направленной вдоль оси R и азимутальной компоненты, направленной вдоль оси Z. Юстировка перпендикулярного положения датчика по направлению к осям осуществлялась поворотом датчика таким образом, чтобы при измерении Z компоненты в центре, наблюдалось условие максимума показаний, а при измерении R компоненты в центре, наблюдалось условие минимума показаний.



*Рисунок 20*

Соленоиды электромагнита запитывались от двух независимых источников постоянного тока “ОптоСистемы” PS 701С, значение тока выставлялось и отслеживалось при помощи мультиметра АРРА 301, отклонения заданного значения тока не превышали 6мА на протяжении проводимых измерений. И составляло 0,5272А и 0,6042А, для левой и правой катушки соответственно.

Несмотря на то, что кабель, используемый для работы с датчиком, экранированный – он был подвержен импульсным наводкам, со стороны используемых источников тока. Для получения, средневзвешенного значений, а также стандартного отклонения показаний датчика Холла, решено было использовать, в качестве АЦП, многофункциональное устройство ввода-вывода USB6009 (Рис. 21), в связке со средой графического программирования LabVIEW.



Рисунок 21 USB6009

Имеющая следующие характеристики:  $\pm 10\text{В}/14$  бит,  $48$  кВыб/с, среднеквадратичное значение шума не более  $5\text{мВ}$ .

При помощи программы написанной в LabVIEW, данные поступающие с АЦП обрабатывались, на основе которых строилась осциллограмма, а также выводилось средневзвешенное значение показаний датчика Холла и стандартное отклонение по  $5000$  тысячам выборок, обновляемые каждую секунду. Графический код и интерфейс программы изображён на рисунках 22 и 23 соответственно.

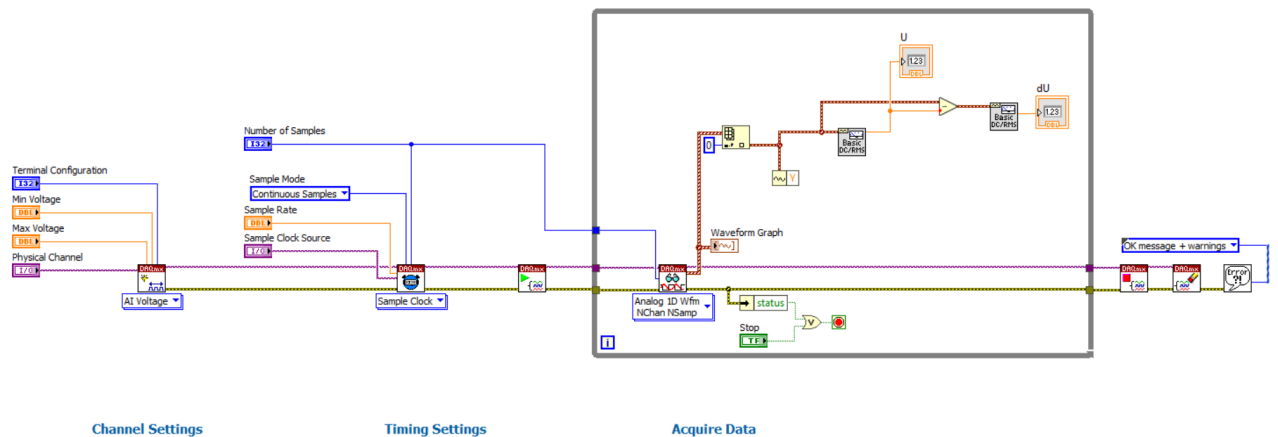
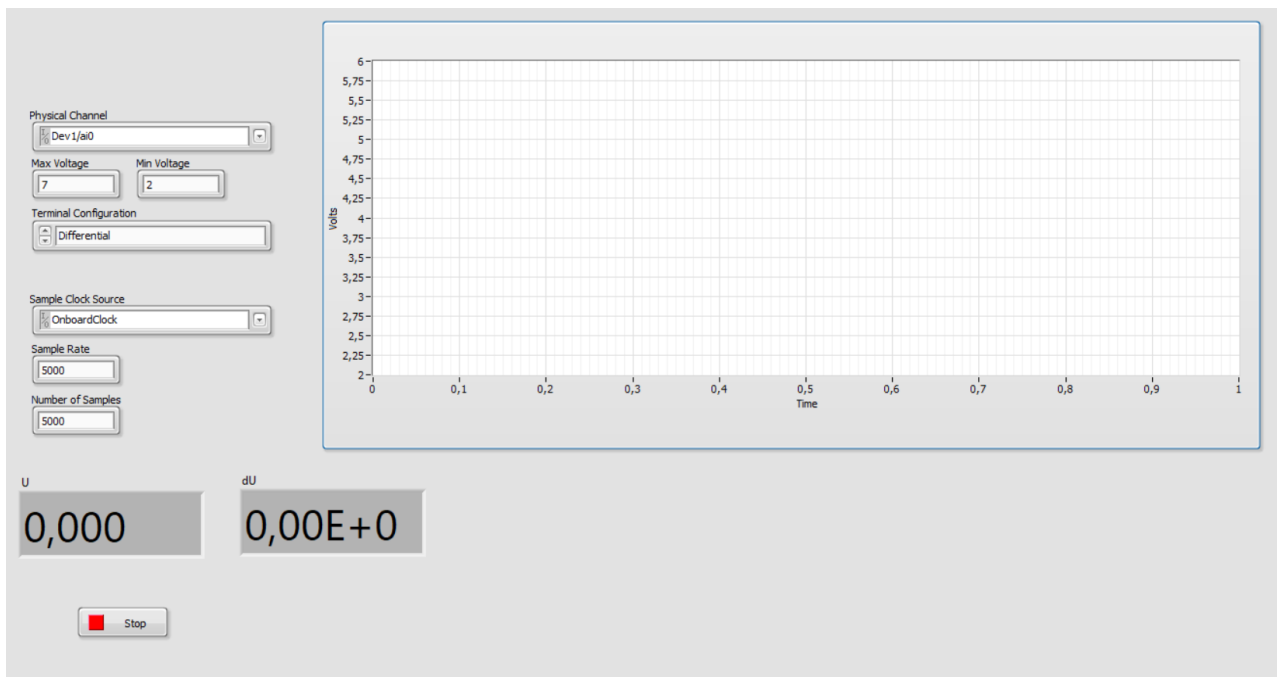


Рисунок 22



*Рисунок 23*

В ходе измерений, типичное значение стандартного отклонения составляло порядка 13 гаусс.



## Результат измерения стационарного поля

Результатом измерения каждой из компонент поля, являлась матрица значений размером [11x23]. В общей сложности, было измерено более полутора тысяч точек.

На основе полученных данных, в пакете программы MATLAB, были построены различные трёхмерные визуализации топологии магнитного поля. Компоненты поля Z и R, двух включённых катушек, представлены на рисунках 24 и 25 соответственно.

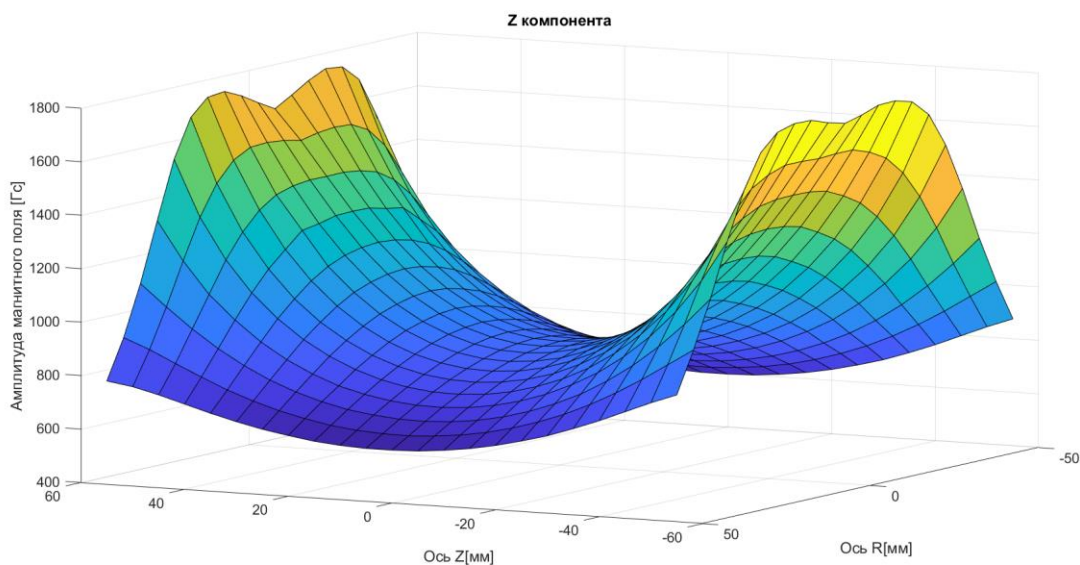


Рисунок 24

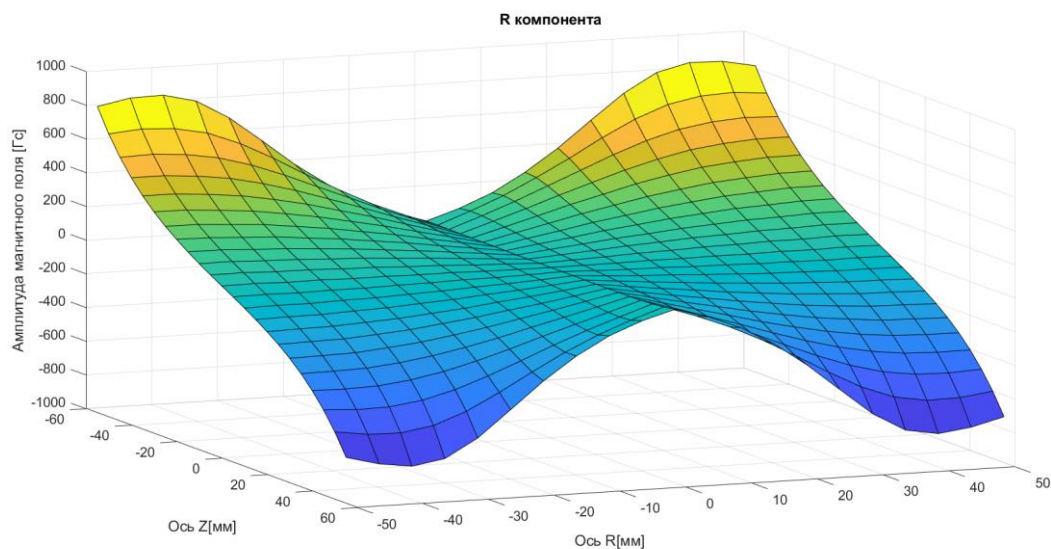


Рисунок 25

На рисунке 26 представлена визуализация изолиний магнитной индукции, в центре которой точка с индукцией 875 Гс. Данная визуализация особенно важна, поскольку представляет пространственные области, вдоль которых будет выполняться условие ЭЦР, при изменении величины протекающего тока, определяя начальную локализацию заряженных частиц. Так же на данном рисунке изображено поле направлений вектора магнитной индукции.

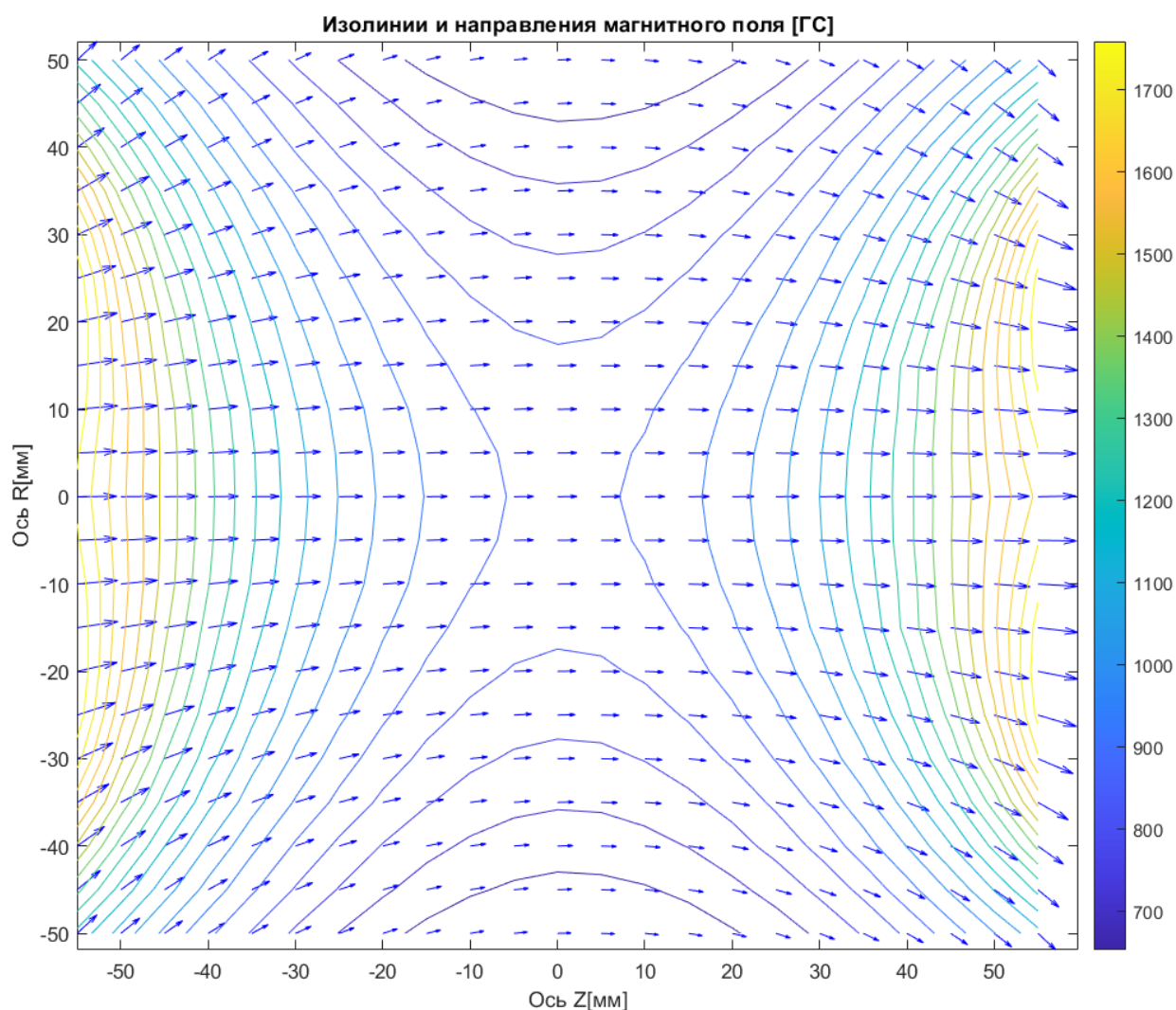


Рисунок 26

Однако, конфигурация поля двух включённых катушек одновременно, не позволяет добиться вариативности и гибкости при моделировании физических процессов в системе. Для этих целей, так же были измерены топологии поля по отдельности.

## Генератор импульсного тока

Для создания импульсного магнитного поля, был создан генератор импульсного тока (Рис.27-28).



Рисунок 27

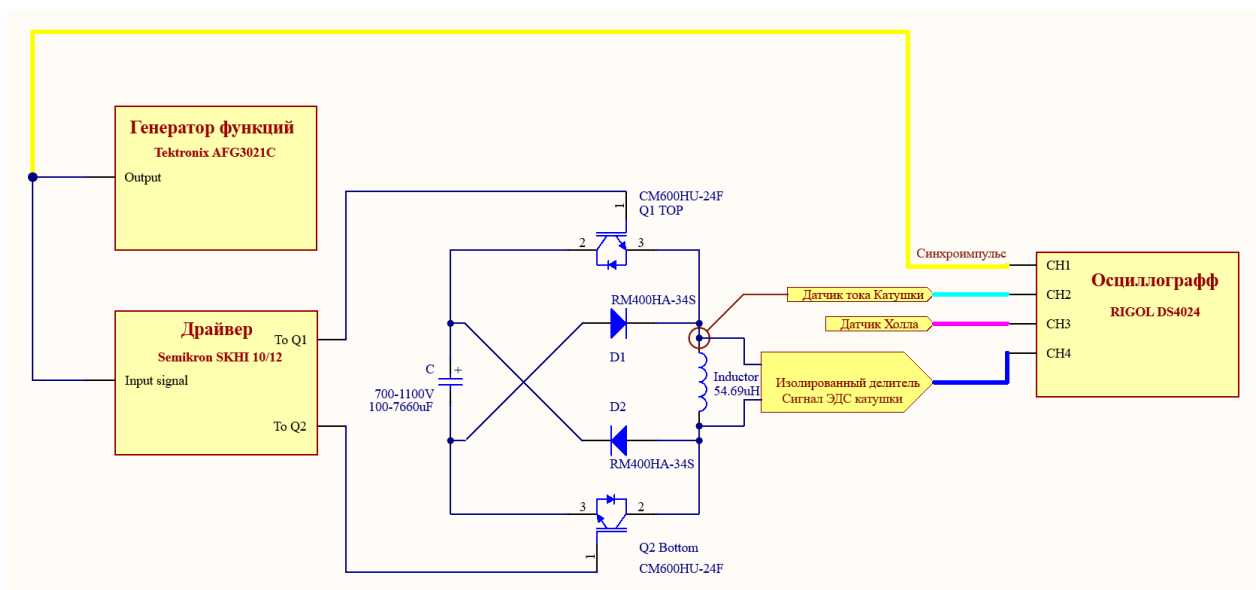


Рисунок 28

Он представляет из себя батарею конденсаторов различных номиналов, включенных параллельно, коммутация которых, осуществляется на последовательно включённые импульсные катушки, при помощи силовых IGBT транзисторов CM600HU-24F, рассчитанные на напряжение 1200В и на средний ток до 600А, при 25°C. Однако импульсные значения тока могут быть существенно выше, и ограничены тепловым пробоем перехода.

Сигнал на открытие ключей формируется с генератора функций Tektronix AFG3021C, позволяющий варьировать, как длительность импульса открытия транзисторов, так и периодичность их повторения. За управление непосредственно силовыми ключами отвечает специализированный драйвер Semikron SKHI 10/12, управляемый от генератора функций. При управлении ключами в данной топологии схемы, важно увеличить длительность подаваемого сигнала на нижний транзистор Q2, равное сумме характерных времён задержки выключения и времени спада транзисторов, в данном случае составляет порядка 1,1 мкс. Так как в случае, если закрытие нижнего ключа Q2 произойдёт раньше, то к нему будет приложено двойное напряжение питания – напряжение с конденсаторной батареи, суммарно с ЭДС индукции катушек импульсного поля. Добавление данной задержки призвано значительно повысить надёжность данной топологии.

Разряд батареи конденсаторов на катушку в первом приближении происходит по гармоническому закону, с периодом равным  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ . В приближении, поскольку не учитываются различные нелинейные потери, главным образом потери на создаваемые вихревыми токами Фуко, влияние которых описывается в следующей главе.

Однако смену полярности на конденсаторной батарее допускать нельзя, по этой причине длительность открытия транзисторов ограничивается четвертью периода. (Рис.29)

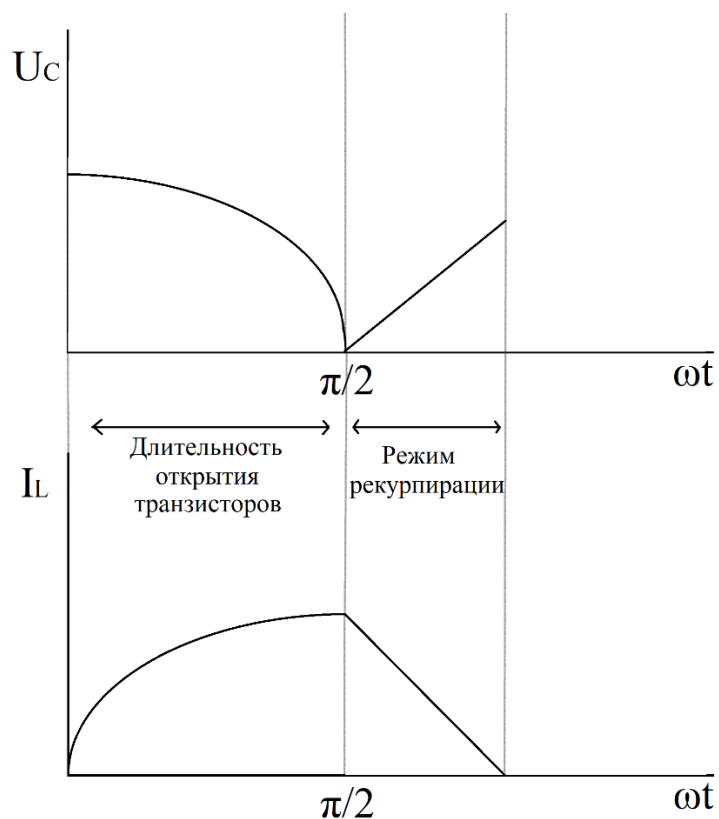
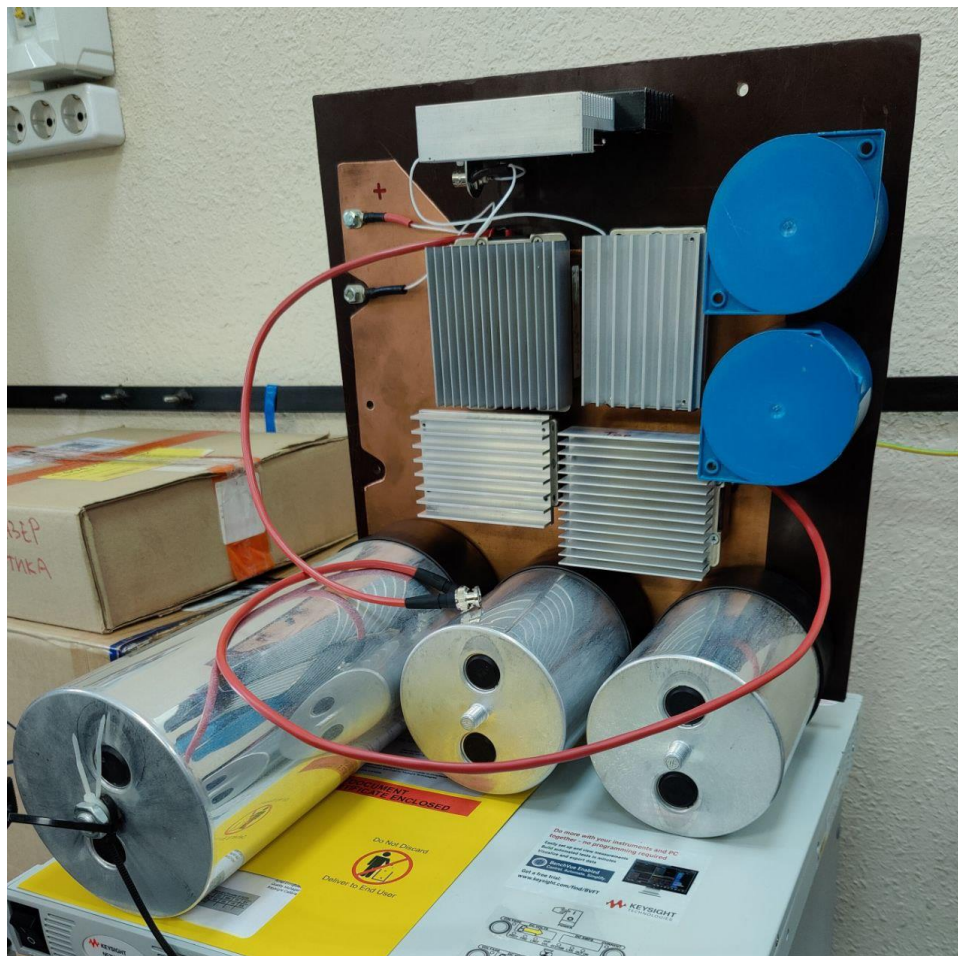


Рисунок 29

После закрытия транзисторов, ЭДС катушки меняет направление и ток катушки течёт через диоды D1 и D2 обратно в конденсаторную батарею, тем самым обеспечивая рекуперацию. Причём в режиме рекуперации наблюдается квазилинейный спад тока, в то время, как ток разрядки конденсаторов – по квазисинусоидальный. Если подавать импульсы сравнительно небольшой длительности, то функция тока катушек описывает квазитреугольную форму.

Батарея конденсаторов состоит из следующего набора ёмкостей (Рис.30):



*Рисунок 30*

1 шт. ELECTRONICON E50.S34-525NT0 5200мкФ, 700В, 0.68мОм, 70нГн

1 шт. ELECTRONICON E50.R16-804NT0 800мкф, 1100В, 0.61мОм, 40нГн

1 шт. ELECTRONICON E50.R16-155NT0 1460мкФ, 700В, 0.54мОм, 40нГн

2шт. VISHAY GLI 1100-100I 100мкФ, 1100В, 1мОм, 30 нГн.

Что позволяет в широких пределах варьировать, как длительность импульсов тока от 15 мкс до 1мс, так и амплитуду тока импульсов до 9кА, и как следствие – различные скорости нарастания поля. Последний параметр особенно важен, поскольку он один из параметров определяющий темп набора энергии электронами, и время, в течении которого частица удерживается в магнитной ловушке.

Скорость роста магнитного поля ( $\alpha$ ) должна удовлетворять критерию [7], необходимому для захвата частицы в режим гиромагнитного авторезонанса:

$$\alpha \leq 1.19g^{\frac{4}{3}} \quad (5)$$

Где:

$$g = \frac{eE}{m_0c\omega} \quad (6)$$

$$\alpha = \left( \frac{B_{max}}{B_0} - 1 \right) (\omega t)^{-1} \quad (7)$$

Соответственно:

$e$  – заряд электрона

$E$  – Напряжённость электрического поля

$m_0$  – масса покоя электрона

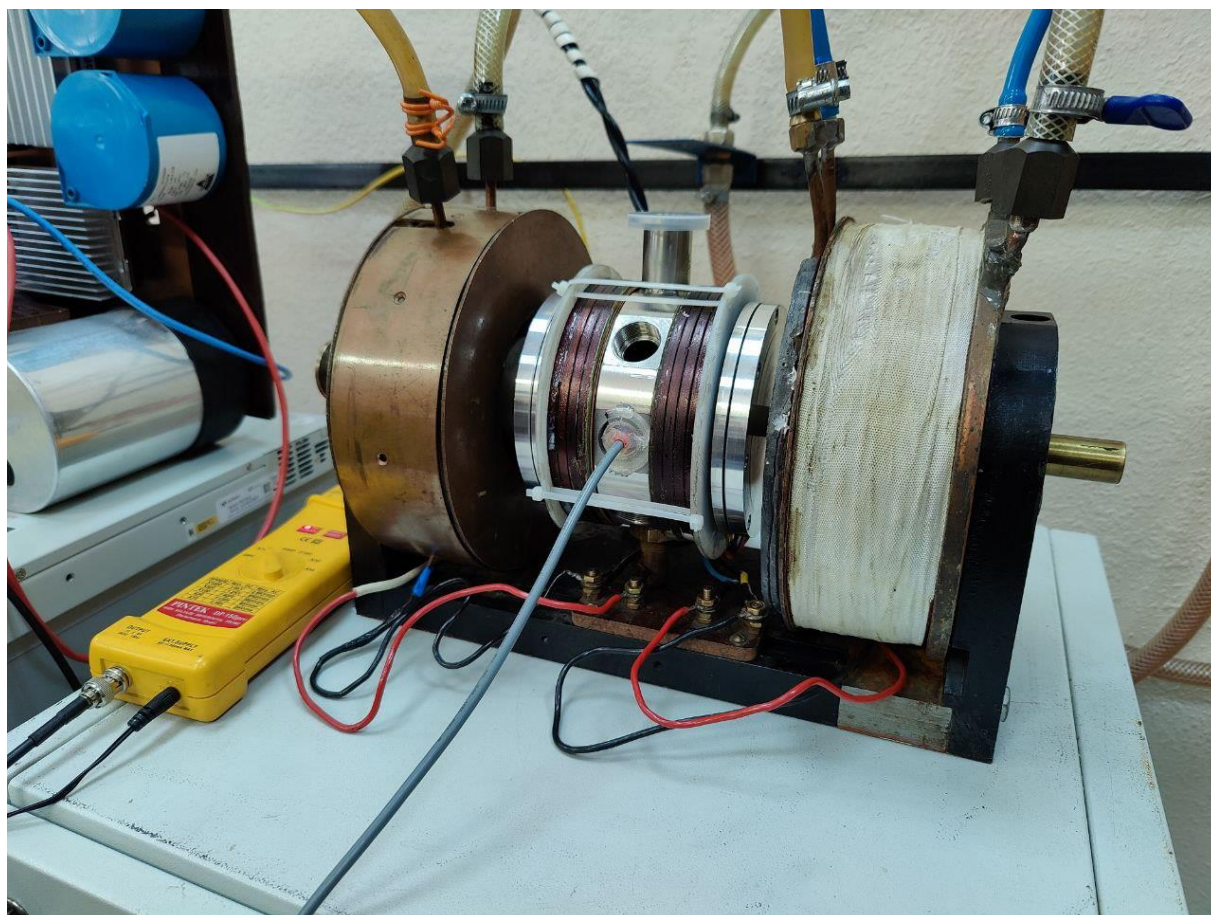
$c$  – скорость света

$\omega$  – циклическая частота СВЧ волны

$t$  - время

## Поле импульсных катушек

Для поддержания резонансных условий электронного циклотронного резонанса путём плавного нарастания магнитного поля (метод гиромагнитного авторезонанса), используются две последовательно и сонаправленно включённые импульсные катушки (Рис. 31).



*Рисунок 31*

Расстояние между ближайшими торцами катушек составляет 34 мм. Каждая катушка представляет из себя, четыре спиральных намотки, включённые параллельно. Спиральная намотка состоит из 12 витков, выполненная проводом прямоугольного сечения 5мм\*1,12мм (Рис.32).





*Рисунок 32*

Геометрия данных катушек полностью известна, и её возможно использовать для моделирования топологии создаваемого магнитного поля. Моделирование осуществляется в программном пакете COMSOL Multiphysics. Несмотря на то, что геометрия катушек кажется простой, из-за малых зазоров между витками катушек, данный метод требует построение сетки конечных элементов меньшему, или равному характерному размеру объекта. По этой причине, кажущаяся простота геометрии, требует значительных вычислительных мощностей.

Поэтому, для упрощения расчётов используется метод гомогенизации катушек – всё сечение катушки, представляется единым проводником с током, равным суммарному току сечения всех витков катушки.

В результате расчёта для стационарного тока в 1кА получена следующая картина (рис.32), в центре симметрии величина индукции поля составляет 2200 Гаусс. Введём понятие эффективности генерации магнитного поля, равную отношению величины создаваемого поля в центре что в пересчёте на ампер тока эффективность генерации магнитного поля составляет 1,9 Гс/А. А расчётная индуктивность катушек – 54,6891 мкГн.

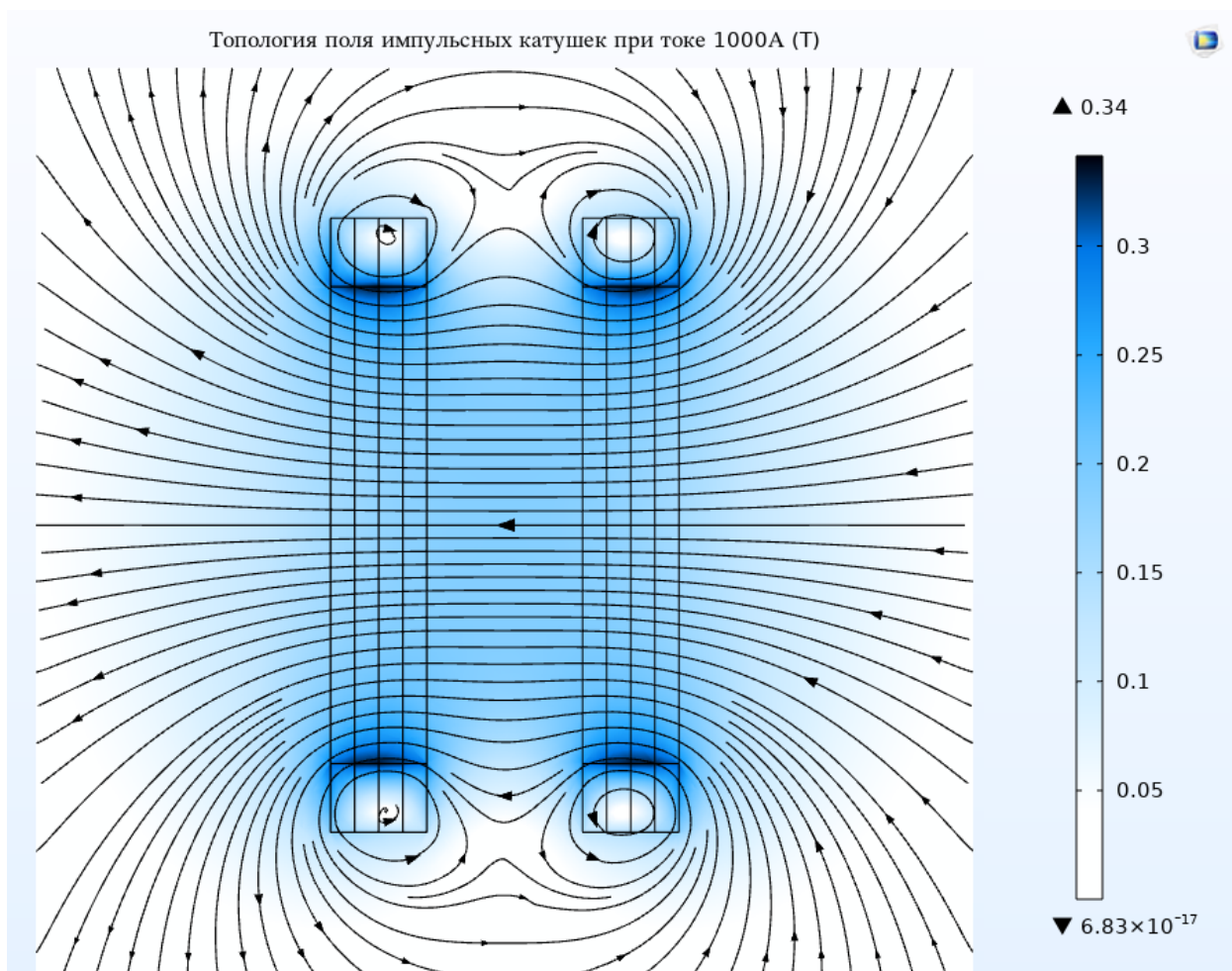
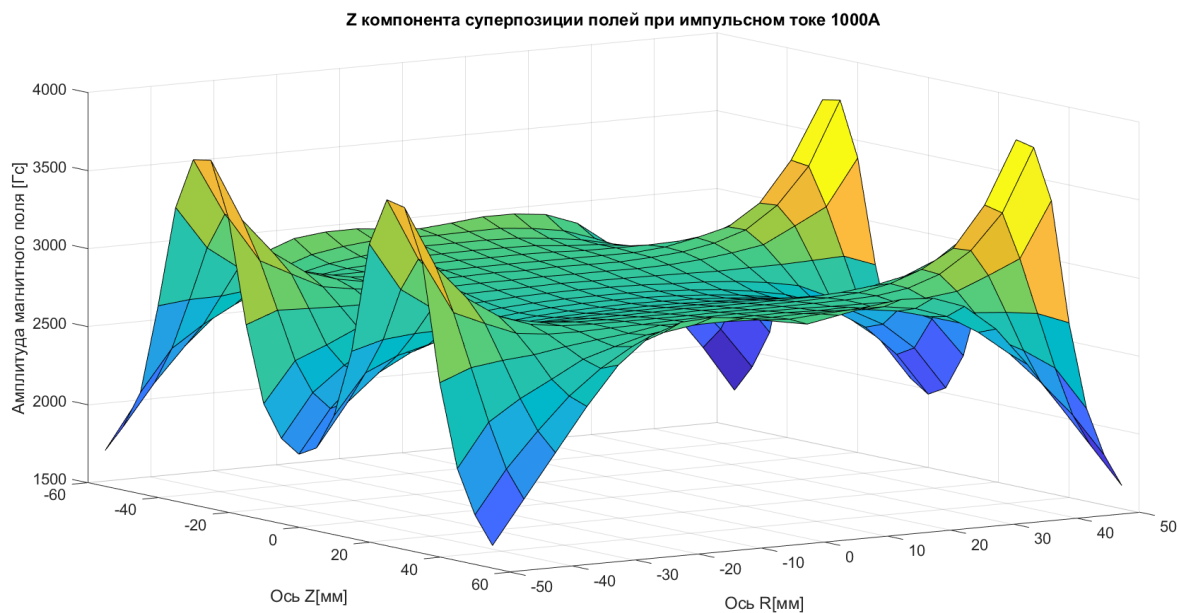
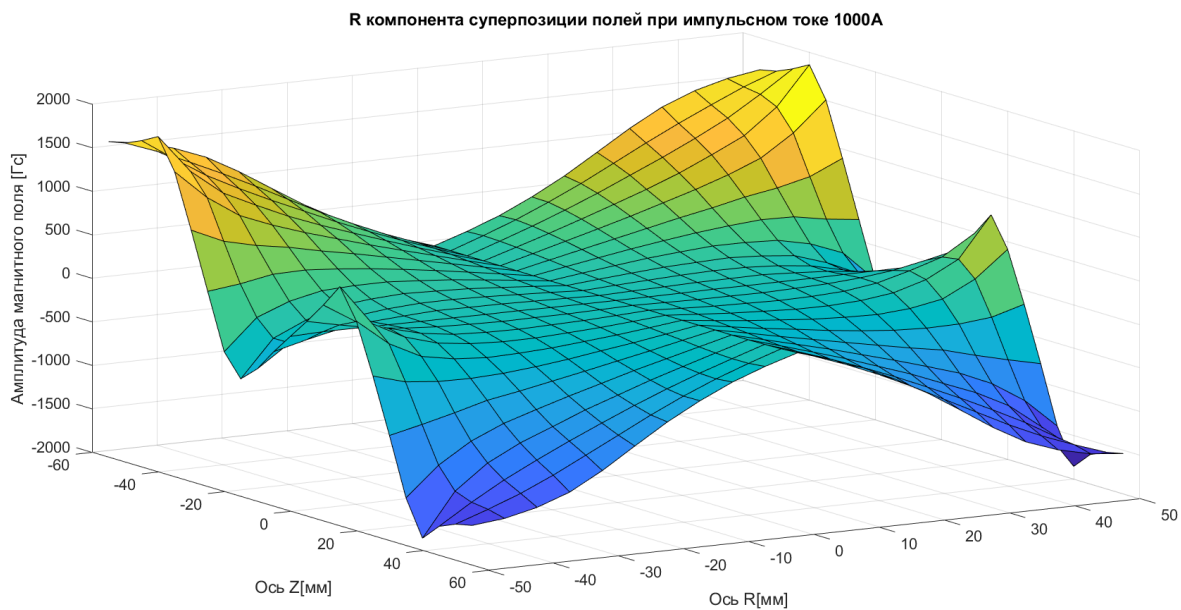


Рисунок 33

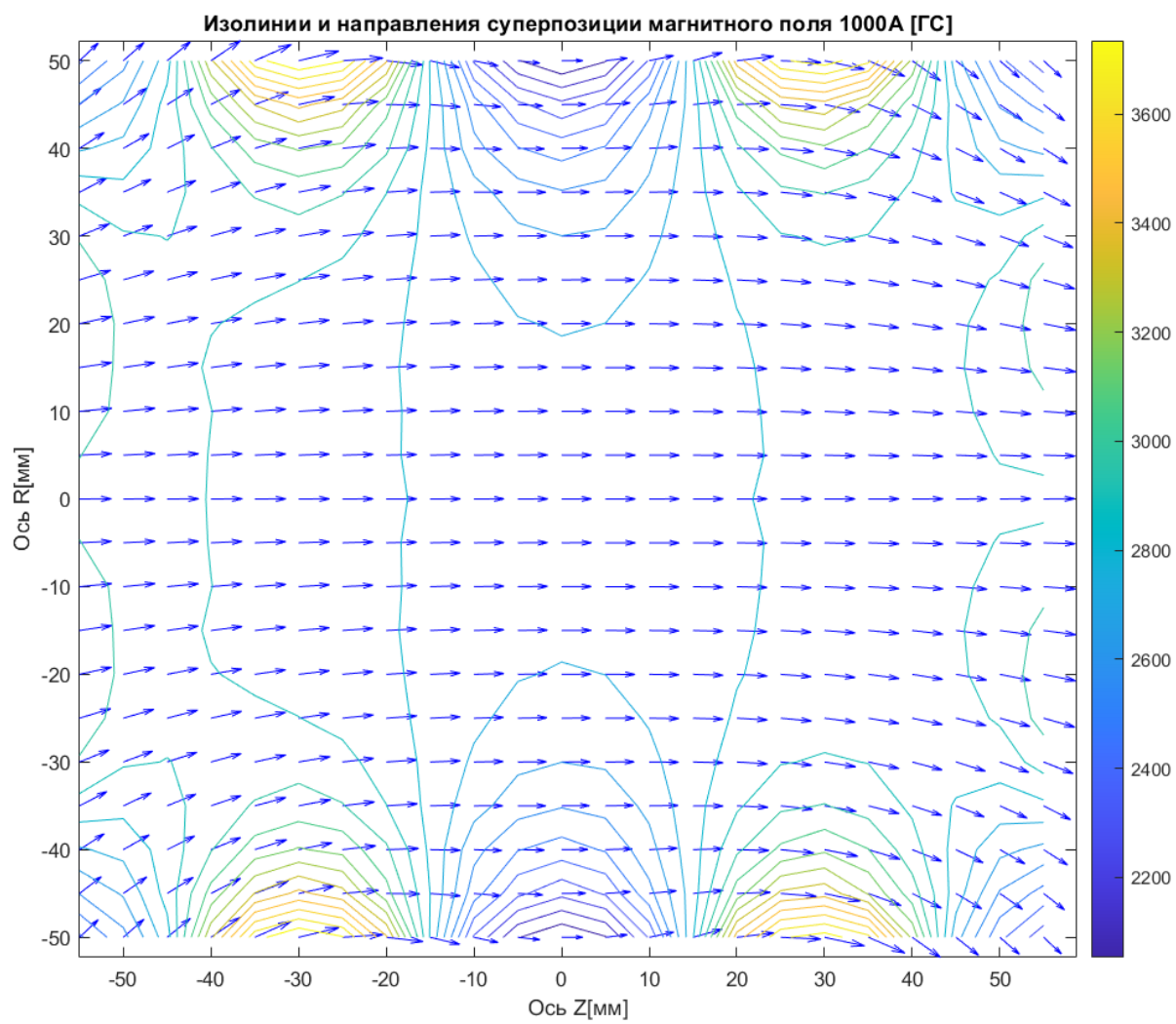
В таком случае суммарная топология стационарного и импульсного поля имеет следующий вид (Рис. 34-36):



*Рисунок 34*



*Рисунок 35*



*Рисунок 36*

## Скинирование магнитного поля

Для проверки расчётных результатов, в центр резонатора был помещён датчик Холла, применяемый ранее для измерения топологии поля импульсных катушек. (рис 37-38).

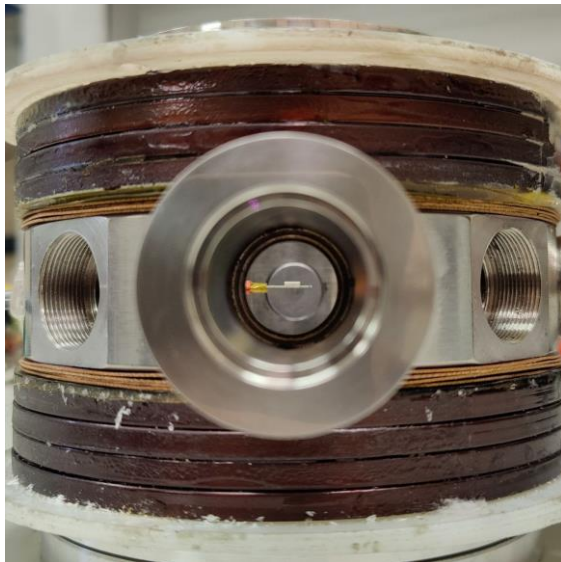


Рисунок 37

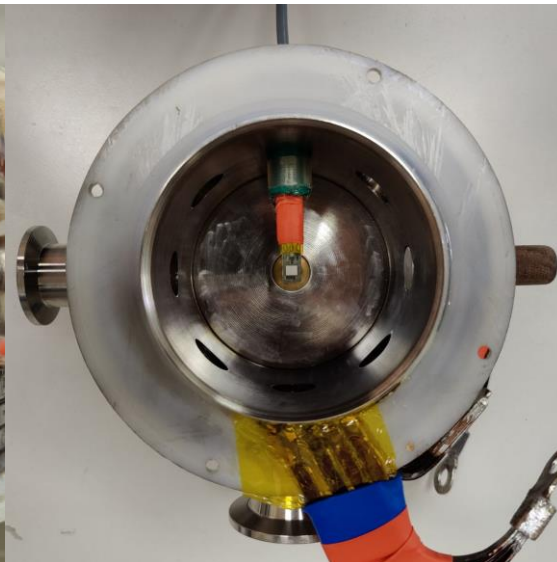


Рисунок 38

При помощи генератора импульсного тока, работа которого описана отдельно в соответствующей главе. На катушки, подавались импульсы тока, каждый импульс является функцией синуса одного периода, но различной длительности, с началом отсчёта из нуля положительного полупериода.

Время нарастания 700 мкс (Рис.39):

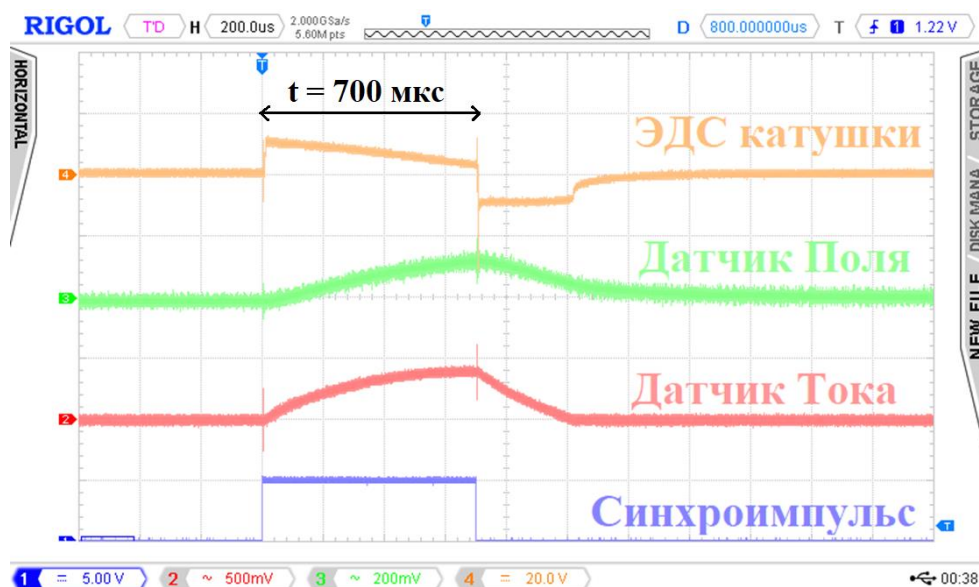


Рисунок 39

Время нарастания 200 мкс (Рис. 40):

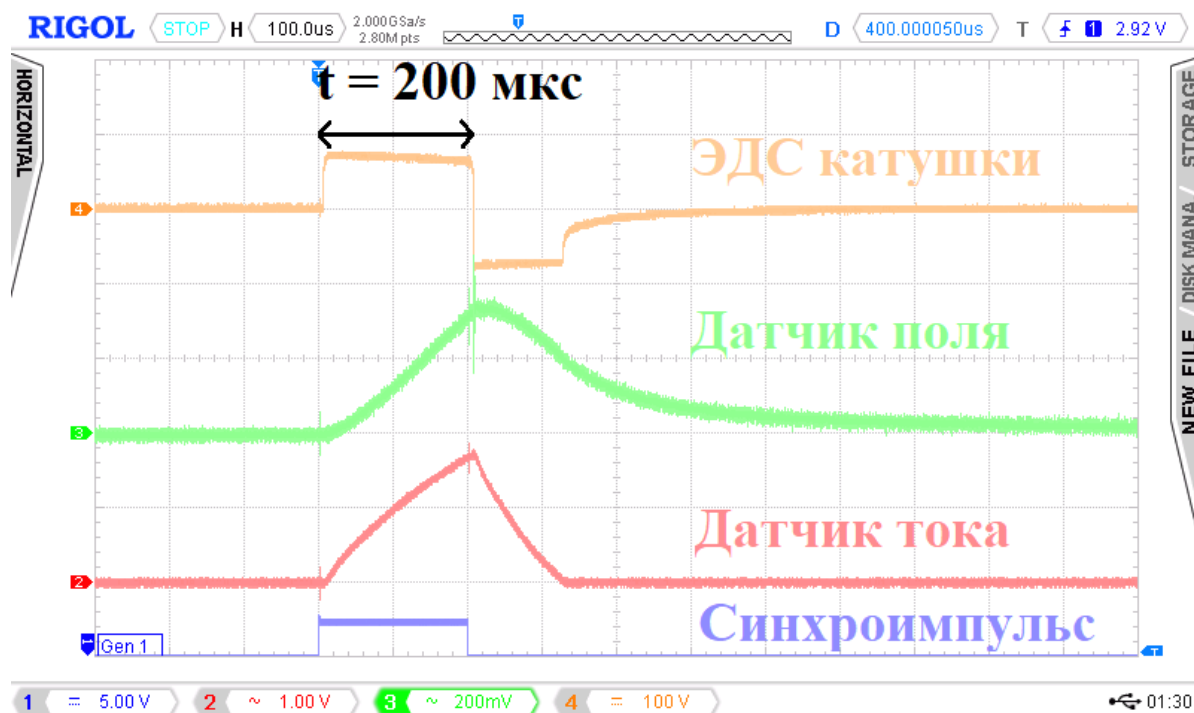


Рисунок 40

Однако на практике, фактическая величина индукции поля в значительно отличалась от расчётного значения в меньшую сторону. Причём эффективность генерации магнитного поля в максимуме поля и тока имела следующую временную зависимость:

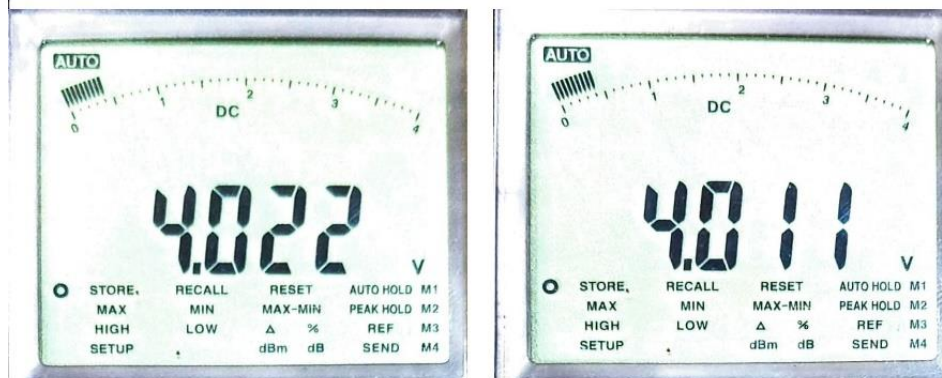
Таблица 4

Эффективность генерации магнитного поля	1,1 [Гс/А]	0,8 [Гс/А]	0,7 [Гс/А]	0,5 [Гс/А]	0,4 [Гс/А]
Длительность нарастания импульсного поля	700 мкс	300мкс	200мкс	100мкс	50мкс

Было выдвинуто предположение, что нарастающее магнитное поле индуцирует в основании и торцевых крышках резонатора токи Фуко, которые ослабляют результирующее магнитное в центре резонатора.

Для проверки этой гипотезы, через катушки был пропущен постоянный ток с лабораторного блока питания MASTECH NY3010, величиной в 5А и 10А (Рис.41).

### Показания датчика Холла



### Ток протекающий через катушки

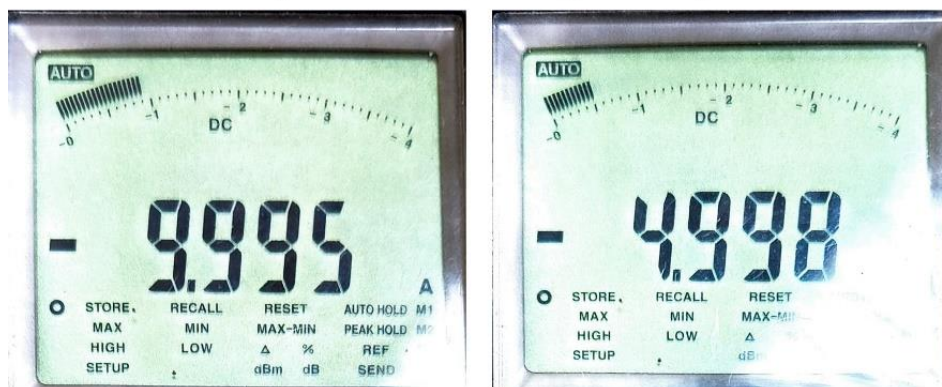
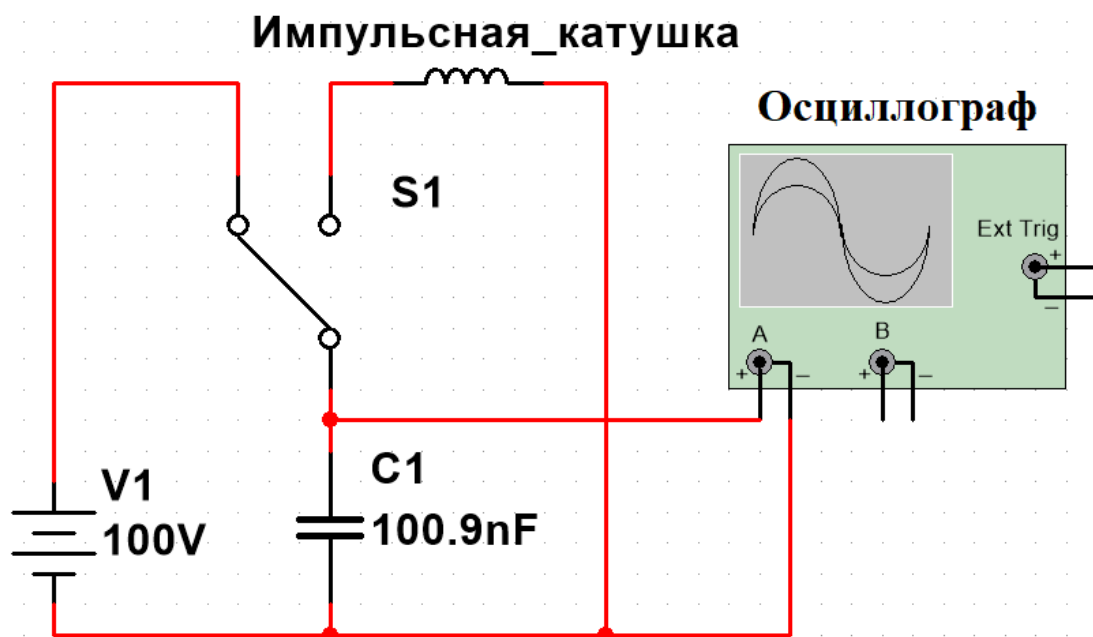


Рисунок 41

При этом показания датчика магнитного поля составляли 11 и 22 Гс соответственно. В пересчёте на эффективность генерации магнитного поля - составляет 2,2 Гс/А, с учётом того, что датчик имеет минимальную ошибку равную 3 Гс, результат соответствует расчётному значению в 1,9 Гс/А.

Таким образом, можно говорить о наличии эффекта скинирования магнитного поля корпусом резонатора. Данный эффект был исследован более подробно при помощи следующей схемы (Рис.42):



*Рисунок 42*

От источника напряжения заряжался конденсатор известной ёмкости, после чего разряжался на импульсные катушки. С конденсатора записывалась осциллограмма.



Опыт с пустыми катушками (Рис. 43-44):

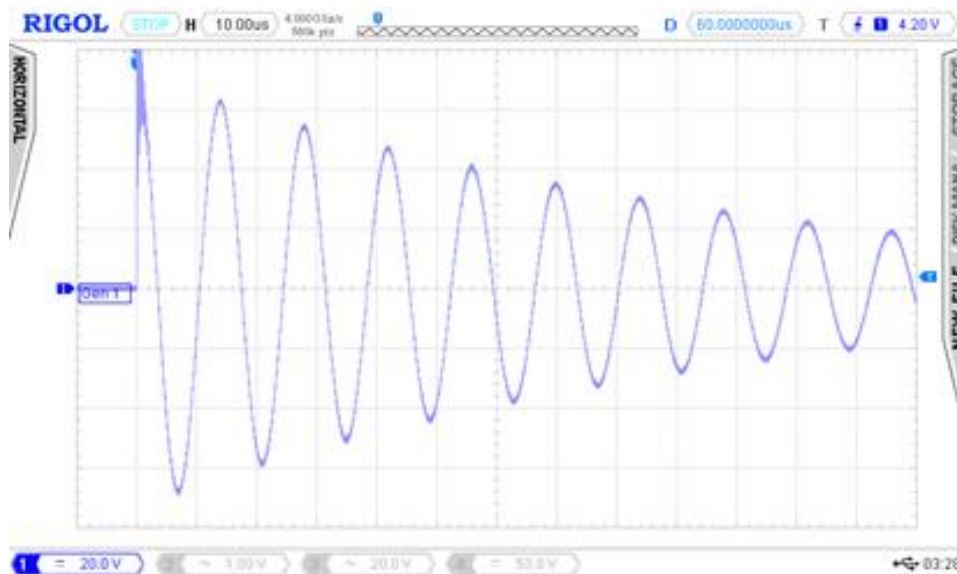


Рисунок 43

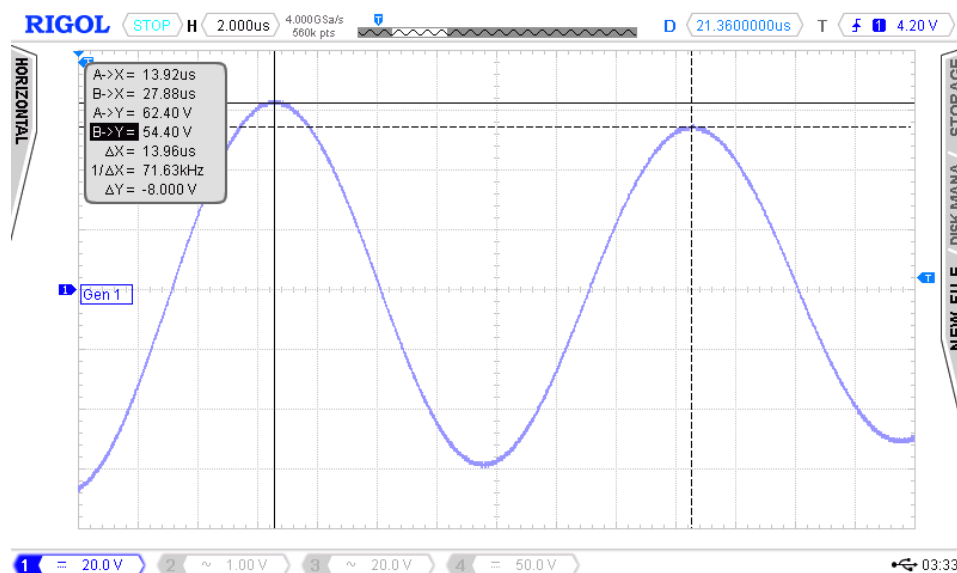


Рисунок 44

Из осциллограммы можно вычислить:

Приведённую индуктивность  $L_{\Pi} = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} = 48,93 \text{ мкГн}$  (8)

Коэффициент затуханий  $\beta = f \cdot \ln \frac{U(t)}{U(t+T)} = 9828$  (9)

Добротность –  $Q = \frac{\pi f}{\beta} = 22,90$  (10)

Опыт с резонатором (Рис. 44-45)::

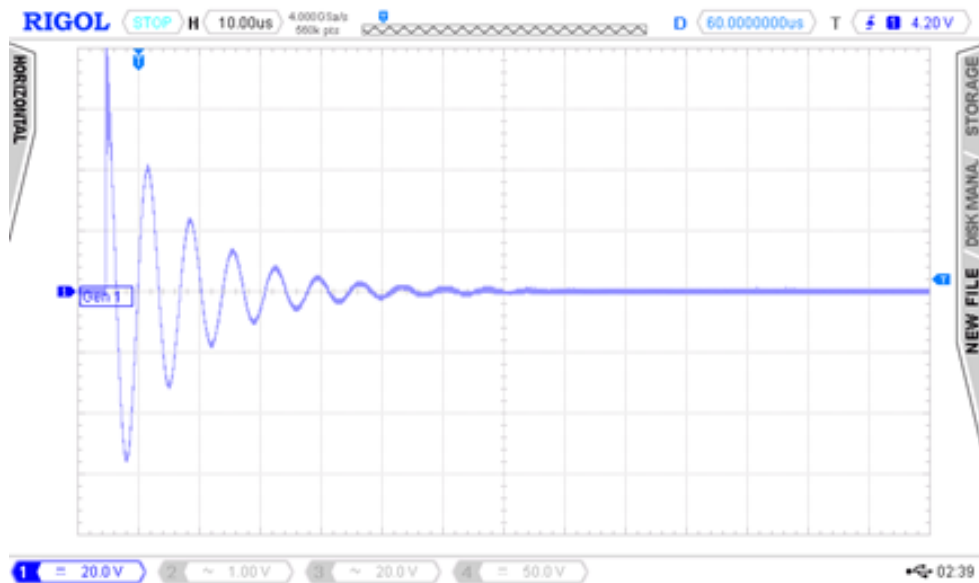


Рисунок 45

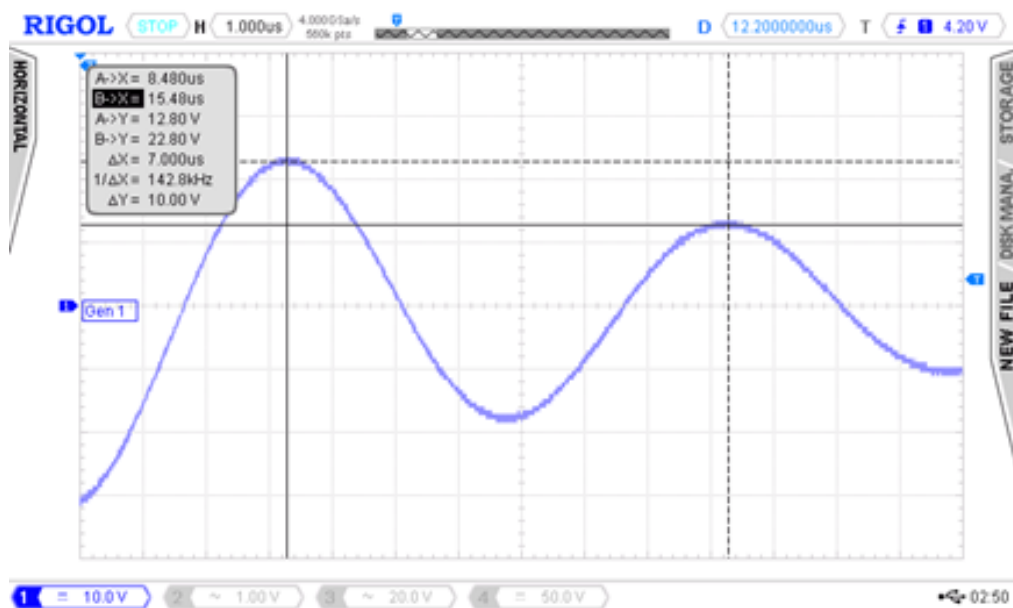


Рисунок 46

Из осциллограммы можно вычислить:

Приведённую индуктивность  $L_{\Pi} = 12,31 \text{ мкГн}$

Коэффициент затуханий  $\beta = 82441$

Добротность  $Q = 5,44$

Опыт без резонатора, с торцевыми крышками (Рис. 47-48):

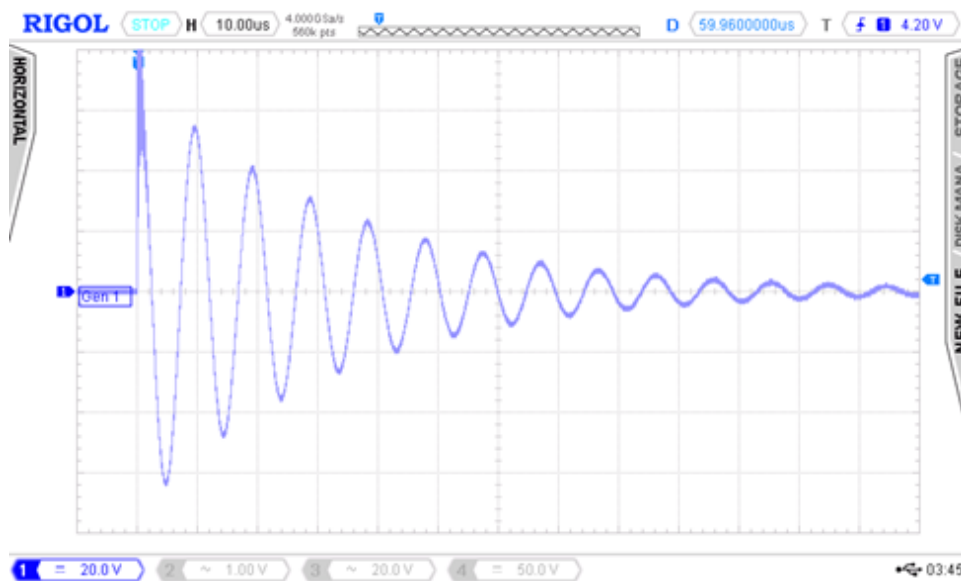


Рисунок 47

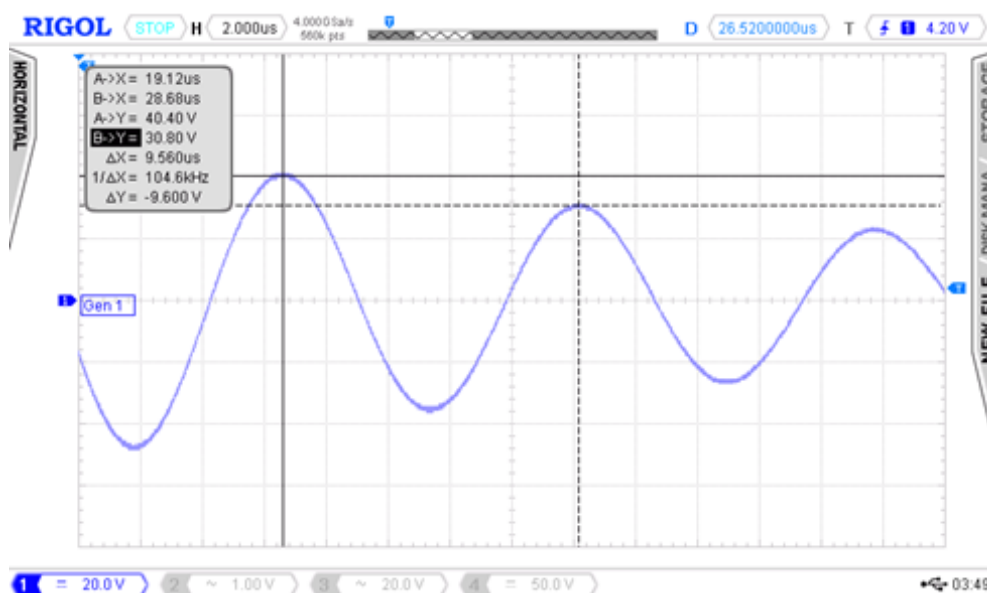


Рисунок 48

Из осциллограммы можно вычислить:

Приведённую индуктивность  $L_{\Pi} = 22,95 \text{ мкГн}$

Коэффициент затуханий  $\beta = 28379$

Добротность  $Q = 11,58$

Из чего можно сделать следующие выводы:

Несмотря на возросший коэффициент затухания, частота собственных колебаний увеличилась, а значит, что ослабление магнитного потока индуцированными токами вносит большой вклад в изменение частоты колебаний.

Решая простейшую систему уравнений, можно сказать, что индуцированные токи в торцевых крышках уменьшают приведённую индуктивность в 1,158 раз больше, чем в ребре жёсткости резонатора. А потери в ребре жёсткости резонатора больше в 1,128 раз, чем в торцевых крышках.

Потери энергии за счёт наведённых токов Фуко в торцевых крышках и в основании резонатора составляют 11,3%

А по задержке между максимумом магнитного поля и тока, можно судить о величине диффузии магнитной индукции внутри тонкостенного полого проводника. Расчёт, которой подробно описан в [16]

Для того, чтобы окончательно убедиться в скинировании магнитного поля был проведён аналогичный опыт, описанный ранее, однако уже без помещённого внутрь резонатора. (Рис. 49-50)

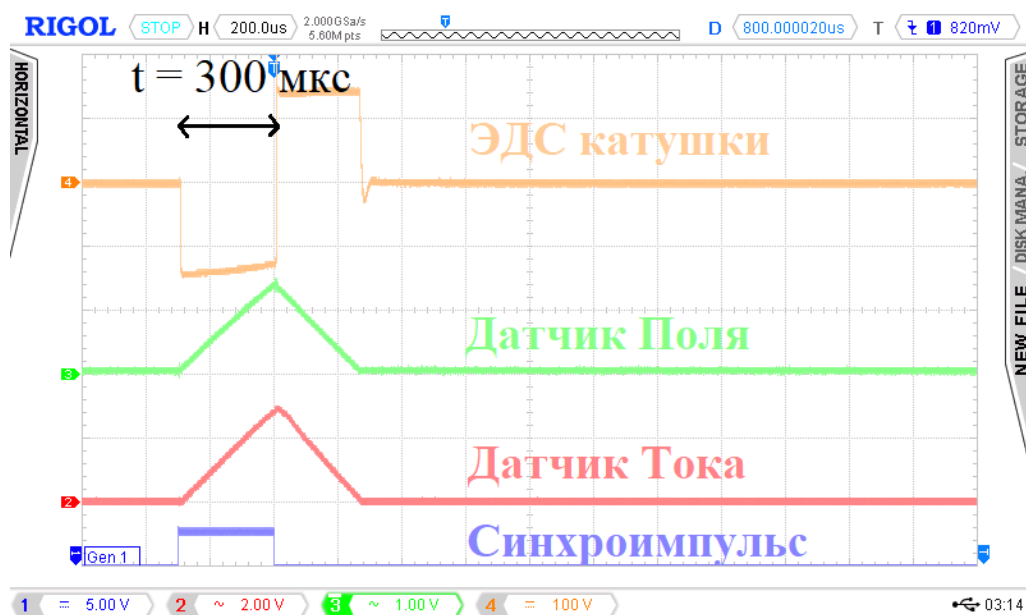


Рисунок 49

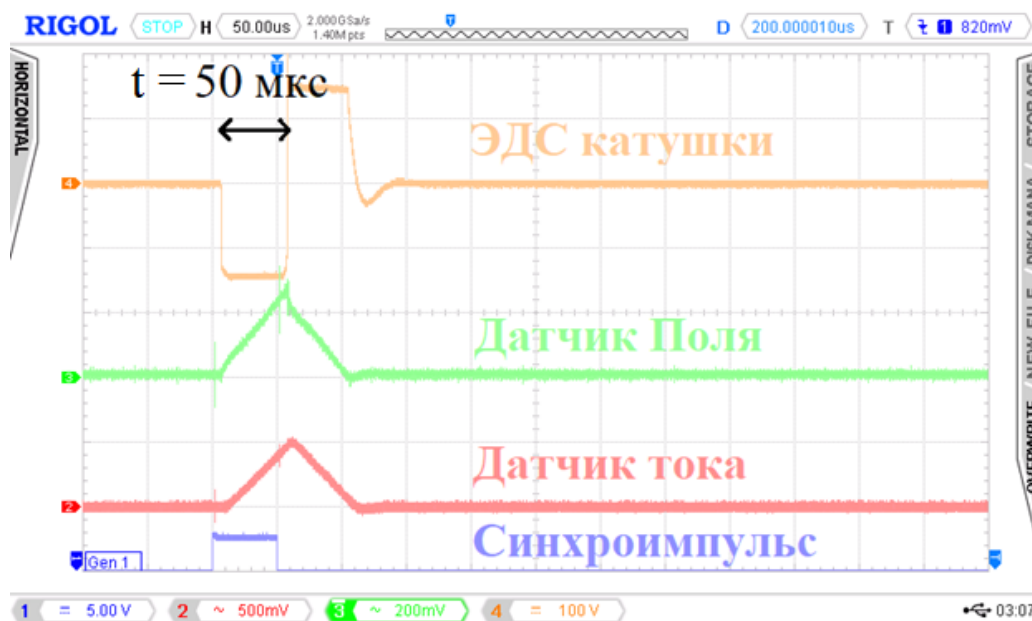


Рисунок 50

В результате таблица 4, была расширена данными эффективности генерации магнитного поля без резонатора (Таблица 5): Подтверждающая существенное ослабление магнитного поля в результате скинирования.

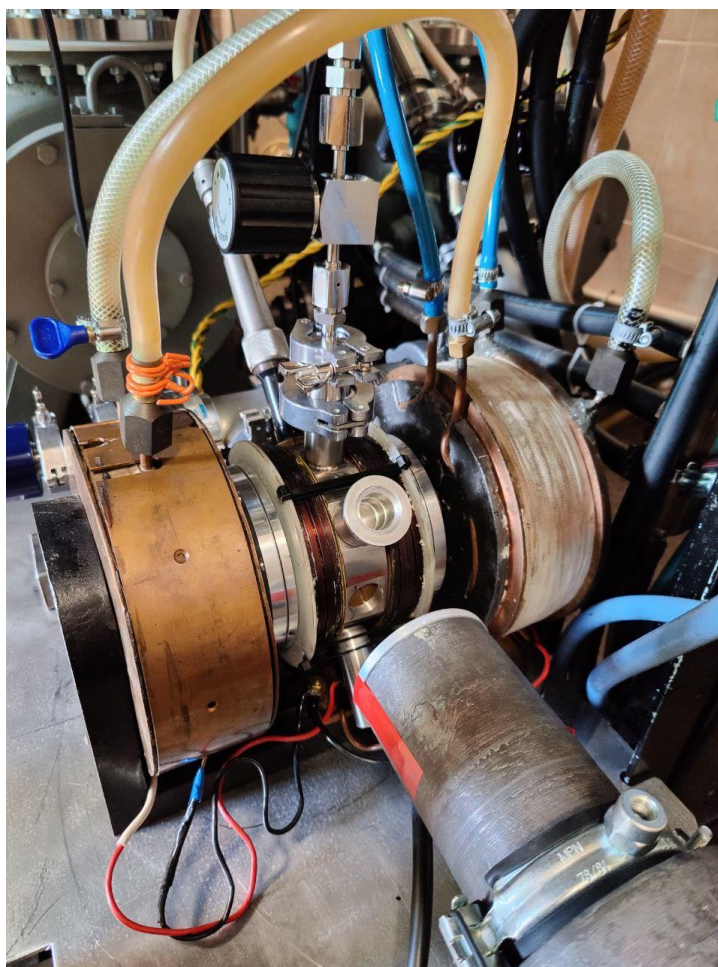
Таблица 5

Эффективность генерации магнитного поля	1,1 [Гс/А]	0,8 [Гс/А]	0,7 [Гс/А]	0,5 [Гс/А]	0,4 [Гс/А]
Эффективность генерации магнитного поля без резонатора	-	1,59 [Гс/А]	1,59 [Гс/А]	0,83 [Гс/А]	1,73 [Гс/А]
Длительность нарастания импульсного поля	700 мкс	300мкс	200мкс	100мкс	50мкс

## Спектр излучения плазменных сгустков

Для определения энергии энергичных электронов плазменных сгустков, использовался анализ тормозного излучения, которое генерируется при взаимодействии сгустков с газовой мишенью и поверхностью стенок камеры резонатора. Для этих целей использовался сцинтилляционный блок детектирования БЛБДЭГ2-23 помещённый в свинцовый коллиматор толщиной стенки 15 мм. А размер цилиндрического сцинтиллятора составляет 40\*40мм. Блок детектирования был помещён в медианной плоскости резонатора и подключён к спектрометрическому устройству. (Рис. 51)

Важно было обеспечить работу детектора в режиме режекции и не перегружать блок детектирования, для этого использовался свинцовый коллиматор, внутрь которого была установлена 15мм алюминиевая пластина.



*Рисунок 51*

Кванты, регистрируемые детектором, в течении первых 900мкс импульса СВЧ соответствуют режиму ЭЦР, в котором хоть и присутствует горячая компонента, но энергия этих квантов, как правило составляет десятки кэВ, а в последующие 200мкс импульса СВЧ, кванты регистрируются в режиме ГА со существенно большей амплитудой и большим потоком, чем наблюдается в режиме ЭЦР (Рис.52). Периодичность повторения импульсов СВЧ составляет 50 мс, а рабочее давление  $1 \cdot 10^{-5}$  Торр, измеряемое при помощи магниторазрядного вакуумметра “Advanced Vacuum Systems”AV3532.

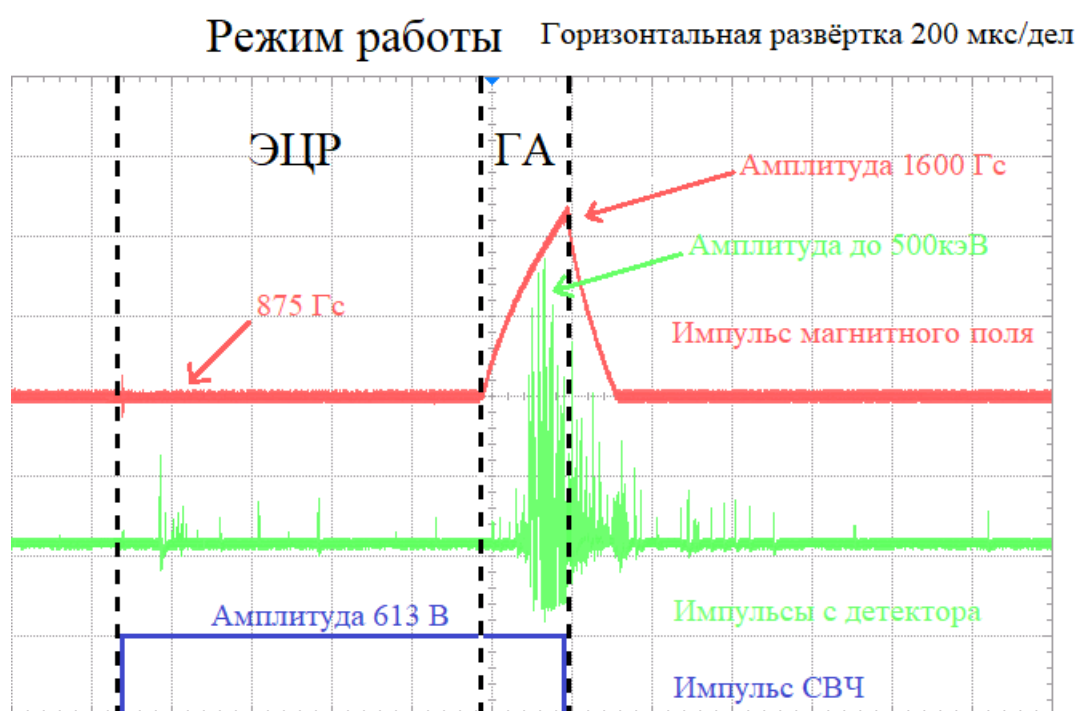
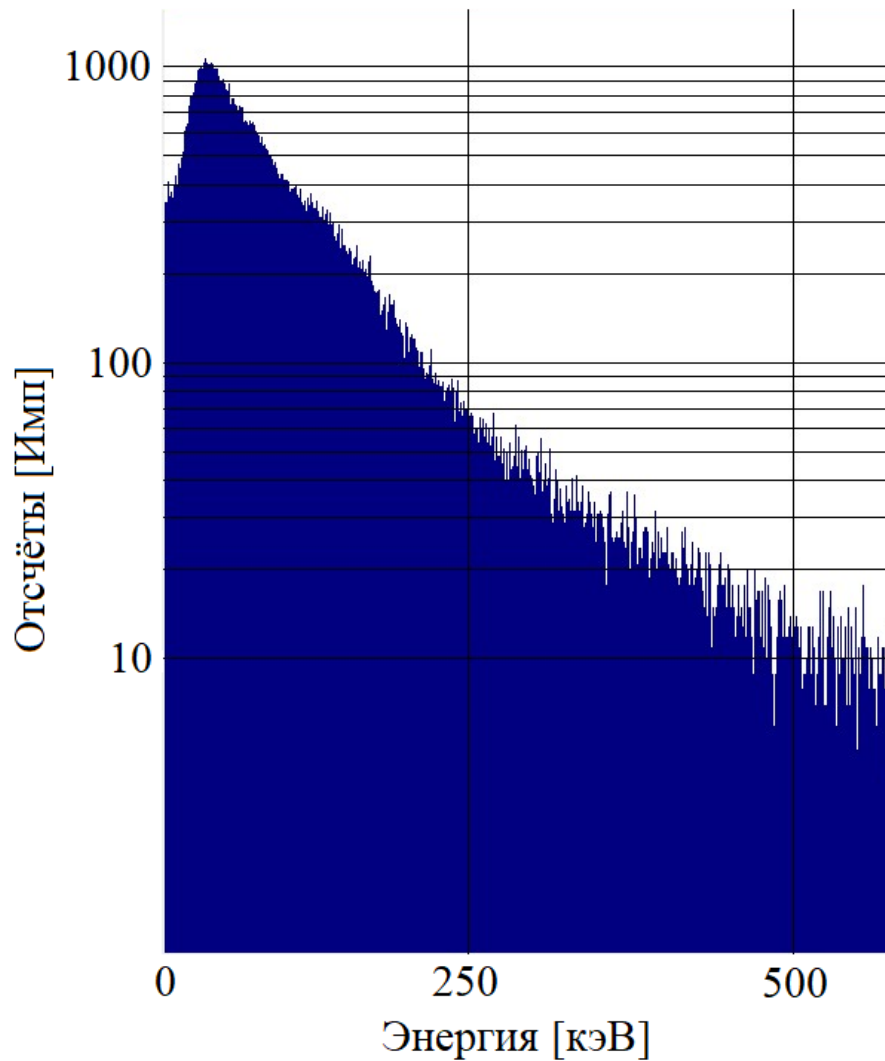


Рисунок 52

Спектр излучения (Рис.53), набранный в течении 112 секунд работы ускорителя в данном импульсно-периодическом режиме, что соответствует 2240 рабочим циклам или же рабочему времени ускорителя ГА+ЭЦР, равному 2,464 секунды. Однако подавляющее большинство импульсов приходится на режим ГА, длительность которого составляет 340 мкс, в таком случае можно сказать, что реальное время набора спектра составляет 761,6 миллисекунды.



*Рисунок 53*

По спектрограмме видно, что предельная энергия излучения находится в масштабе сотен кэВ. Спектрограмма имеет схожее распределение, полученное ранее в работе [17].

Кроме того, можно оценить среднюю активность, детектируемую сцинтиллятором за импульс, считая источник точечным и изотропным, но важно отметить, что не учитывается эффективность регистрации квантов различных энергий самим детектором, а также ослабление потока ребром жёсткости резонатора и алюминиевой пластиной.

$$A = \frac{N}{nt} \cdot \frac{4\pi}{\left(\frac{\pi d^2}{4R^2}\right)} = \frac{163673 \text{ имп}}{2240 \text{ циклов} \cdot 340 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{4\pi}{\left(\frac{\pi(2\text{см})^2}{4(17,5 \text{ см})^2}\right)} = 2,6 \cdot 10^8 \text{ Бк (11)}$$



Где,

$N$  – общее число зарегистрированных квантов

$n$  – общее число циклов

$t$  – длительность импульса магнитного поля

$d$  – диаметр окна сцинтиллятора

$R$  – расстояние от окна сцинтиллятора до центра резонатора

Оценим, согласно расчётам, приведённые в [7] максимальную энергию квантов в режиме ГА:

$$W_{max} = m_0 c^2 \left( \frac{B_{max}}{B_0} - 1 \right) = 511 \text{ кэВ} \cdot \left( \frac{1600}{875} - 1 \right) = 420 \text{ кэВ}$$

А также, удовлетворяют ли параметры системы, критерию захвата:

$$\alpha \leq g_0^{4/3}$$

$$g_0 = \frac{E}{B_0} = \frac{2,8 \cdot 10^5 \text{ В/м}}{0,0875 \text{ Тл}} = 3,2 \cdot 10^6$$

$$\alpha = \left( \frac{B_{max}}{B_0} - 1 \right) (\omega t)^{-1} = \left( \frac{1600}{875} - 1 \right) \cdot (1,539 \cdot 10^{10})^{-1} = 5,38 \cdot 10^{-11}$$

Очевидно, что параметры системы удовлетворяют критерию захвата.

Калибровка детектора (Рис. 54) была произведена по двум изотопам  $Ti44$  - с основными характеристическими энергиями в 68 кэВ, 78 кэВ, 511 кэВ, 1157 кэВ и  $Cs137$  с характеристической энергией 662 кэВ и 32 кэВ, природой последнего является рентгеновская флуоресценция бария 137 (К).

Время набора калибровочного спектра  $Ti44$ , составляло 944 секунды, а  $Cs137$  - составило 904 с.

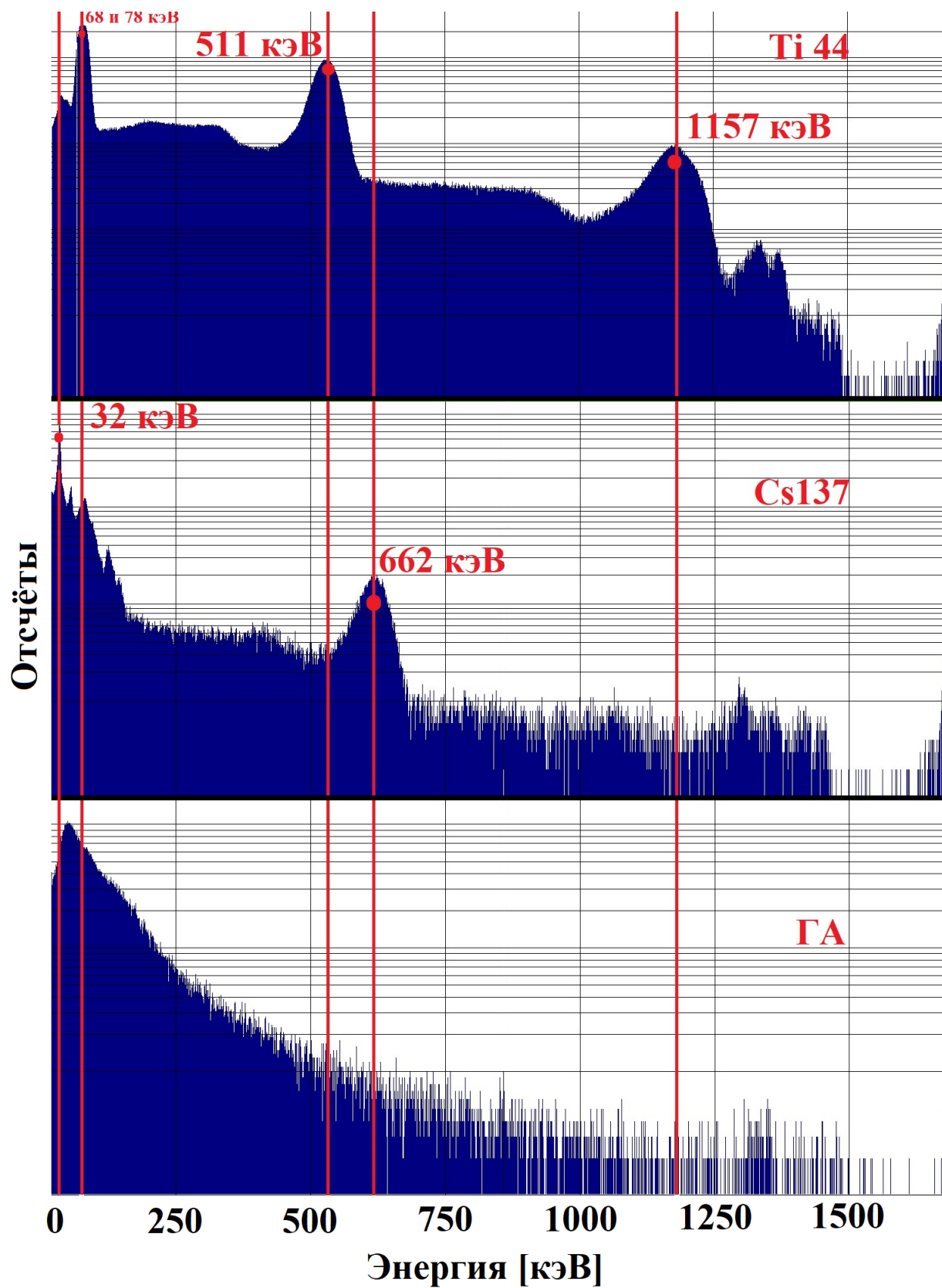
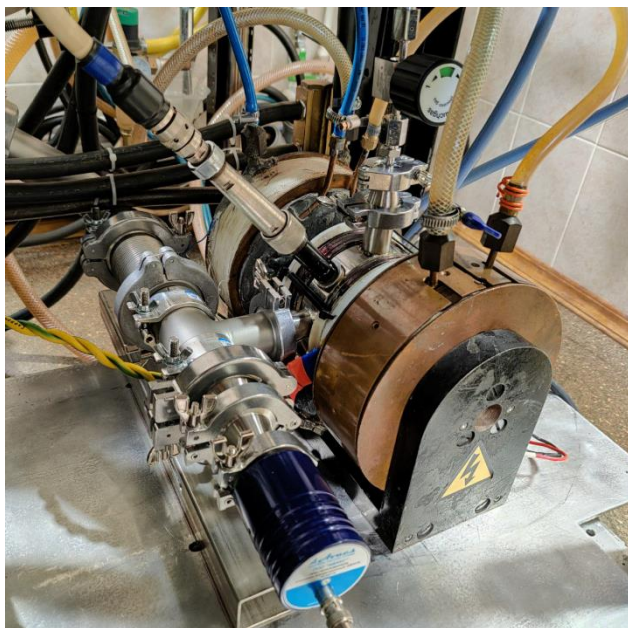


Рисунок 54

## Заключение



*Рисунок 55*

Проведен расчет, изготовление отдельных узлов плазменного ускорителя.

Проведены тщательные измерения пространственного распределения магнитостатического и импульсного магнитных полей.

Проведена полная сборка компактного плазменного ускорителя и его тестовые вакуумные испытания.

Осуществлен первичный запуск ускорителя.

Получены первичные экспериментальные результаты, подтверждающие, что принцип положенный в основу работы установки приводит к генерации плазменных сгустков с энергией квантов масштаба сотни кэВ, что может использоваться в создании компактных источников жёсткого рентгеновского излучения, для коллективного ускорения ионов, источников многозарядных ионов.

Для достижения наилучших результатов, необходимо по возможности исключить из конструкции ускорителя массивные проводящие компоненты. Кроме того, повышенного внимания требует точность исполнения резонатора.

А полученные экспериментальные результаты данной работы будут применены в исследованиях численных методов моделирования динамики поведения плазменных сгустков в рабочих режимах генератора.

Дальнейшие эксперименты будут нацелены на отработку методов диагностики тормозного и характеристического излучения из плазменного объема, рентгенографическим измерениям.

## Библиографический список

- [1.] Jaeger F., Lichtenberg A.J., Lieberman M.A. // Plasma Phys. 1972. V. 14. P. 1073.
- [2.] Тимофеев А.В. // УФН. 1973. Т. 110. Вып. С. 329.
- [3.] Geller R. Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas. UK, Bristol: Taylor & Francis, Inc, 1996. P. 434.
- [4.],B. Wolf // ISBN 0-8493-2502-1 Handbook of Ion Source, p136-146
- [5.] Marchack, L. Buzi, D. B. Farmer, et al. // Plasma processing for advanced microelectronics beyond CMOS Cite as: J. Appl. Phys. 130, 080901 (2021)
- [6.] Roberts C.S., Buchsbaum S.J. // Phys. Rev. A. 1964. V. 135(2). P. 381.
- [7.] Golovanivsky K.S. // Phys. Scripta. 1980. V. 22. P. 126.
- [8.] Andreev V.V., Golovanivsky K.S. // Physics Letters. A. 1984. V. 100. P. 357.
- [9.] Андреев В.В., Голованивский К.С. // Физика плазмы. 1985. Т. 11. Вып. 3. С. 300.
- [10.] Andreev V.V., Umnov A.M. // Physica Scripta. 1991. V. 43. № 5. P. 490.
- [11.] Andreev V.V., Umnov A.M. // Plasma Sources Science and Technology. 1999. V. 8. № 3. P. 479.
- [12.] Макулькин А.В. // Атом. энергия. 2006. Т. 101. № 5. С. 846.
- [13.] Geller R., Melin G., Golovanivsky K. // Proc. of EPAC 90: 2nd European Particle Accelerator Conference: Nice. Editions Frontieres, June 12–16 1990. V. 1. ISBN 2-86332-090-4
- [14.] Ishibashi T., Hattori T., Hayashizaki N. et al. // Proc. of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan. Sendai, 2006. P. 568.
- [15.] Andreev V.V., Umnov A.M., Apracsin A.V. //Rev. Sci. Instrum. 1992. V. 63(4). P. 2907.
- [16.] Кнопфель Г. // МИР. 1972. Сверхсильные импульсные магнитные поля, с 113-118.
- [17] В. В. Андреев, А. А. Новицкий, А. М. Умнов, Д. В. Чупров // Прикладная физика. 2015. Вып. №3. С.37