

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Литовских Никита Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование особенностей измерения высокого напряжения на
разрядной установке**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20303

Научный руководитель:

д. ф-м. н., А.А. Черемисин

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

ст. преп., П.В. Калинин

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация

Целью работы являлось измерение импульсного тока на разрядной установке, а именно на разрядной ячейке, бесконтактным методом и анализ полученных данных. Разрядная установка предназначена для создания и изучения плазмоида, аналога шаровой молнии, воссозданного в лабораторных условиях. Разрядная ячейка представляет собой емкость с водой, в которую погружены 2 электрода. Для измерения импульсного тока использовался пояс Роговского, собранный во время выполнения курсовой работы. По напряжению, снятого с пояса Роговского, были определены амплитуда и форма тока. Полученные данные предполагается использовать для изучения процессов, происходящих в установке во время разряда, и модернизации установки.

Ключевые слова: импульсный ток, разрядная установка, разрядная ячейка, пояс Роговского, делитель напряжения, шаровая молния, плазмод.

Оглавление

1. Введение	4
2. Описание экспериментальной установки	5
3. Методика измерений	6
4. Методика расчетов	8
5. Анализ экспериментальных данных	12
6. Основные результаты	15
7. Список литературы	16

1. Введение

Шаровая молния - природное явление, выглядящее как светящееся и плавающее в воздухе образование. Единой физической теории возникновения и протекания этого явления к настоящему времени не представлено. Существует множество гипотез, объясняющих явление, но ни одна из них не получила абсолютного признания в академической среде. В лабораторных условиях похожие, но кратковременные явления удалось получить несколькими разными способами. Широко распространено мнение, что шаровая молния — явление электрического происхождения естественной природы, то есть представляет собой особого вида молнию существующую продолжительное время и имеющую форму шара, способного перемещаться по непредсказуемой, иногда удивительной для очевидцев траектории.

Существуют сотни гипотез о природе шаровой молнии и несколько видов их классификаций. Вот некоторые из этих гипотез [1]:

1. Гипотеза С. И. Степанова (1993) о шаровой молнии как аэрозольном облаке, в котором идут химические реакции с образованием заряженных частиц, которые создают собственное электрическое поле [4].
2. В гипотезе Б.Л. Бирбраира (2001) шаровая молния представляет собой бублик со сверхпроводящей поверхностью, по которой текут токи [5].
3. Гипотеза Г. Д. Шабанова (1988), где шаровая молния представляет собой аналог мыльного пузыря с нескомпенсированным отрицательным электрическим зарядом [6].

Целью данной работы являлось измерение импульсного тока, протекающего в разрядной ячейке во время разряда, с помощью пояса Роговского и сравнение с результатом, полученным при измерении исследуемого тока с помощью делителя напряжения. Пояс Роговского – это прибор, предназначенный для

измерения импульсного тока тогда, когда нельзя подключить измерительный прибор напрямую к участку цепи.

2. Описание экспериментальной установки

Рассмотрим экспериментальную установку подробнее. На рисунке, представленном ниже, изображена разрядная установка, предназначенная для воссоздания плазмоида в лабораторных условиях.

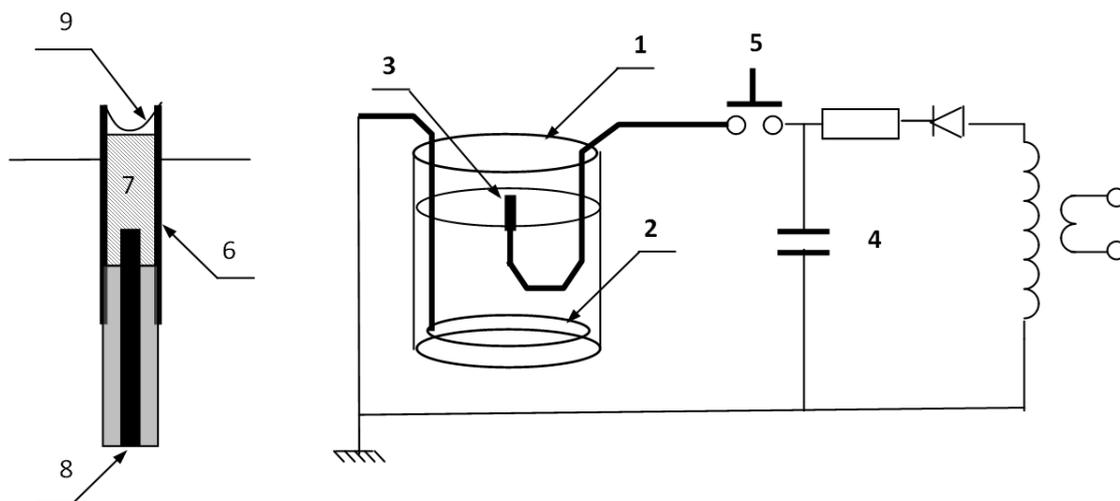


Рис.1 Установка для получения плазмоида. 1–полиэтиленовая емкость. 2–кольцевой электрод. 3–центральный электрод. 4–конденсаторная батарея емкостью 1,2мF. 5–разрядник. 6–кварцевая трубка. 7–угольный или металлический электрод. 8–медная штанга. 9–капля воды или вещества вводимого в разряд.

В представленной установке плазмоид может образовываться как с центрального электрода, так и с медной штанги, замыкающей - размыкающей электрическую цепь. Вода здесь играет, в основном, скромную роль переменного сопротивления которое облегчает инициирование барьерного разряда рождающего шаровую молнию [1]. Процесс образования плазмоида выглядит следующим образом. Конденсаторную батарею заряжают до определенного значения напряжения (в моем случае батарею заряжали до 5 кВ), затем, с помощью разрядника, происходит разряд батареи и через провод, ведущий к центральному электроду, начинает течь импульсный ток. Идея эксперимента состояла в необходимости получения мощной кратковременной эмиссии заряда в воздух, когда электрод противоположной полярности скрыт диэлектриком.

3. Методика измерений

В экспериментальной практике существует необходимость измерения характеристик импульсных токов. В некоторых случаях прямое включение измерительных приборов в электрическую цепь невозможно. Например, в высоковольтных цепях, при быстрых разрядах в газе или если ток образован пучком заряженных частиц в ускорителе. Тогда для измерения параметров импульсного тока нужен какой-то бесконтактный способ. Один из таких способов основан на том, что при движении зарядов в окружающем пространстве возникает переменное электромагнитное поле. Регистрируя вторичные эффекты от наведенного поля, можно получить измеряемые данные о параметрах импульса.

Для получения информации о величине и форме импульсного тока по наведенному магнитному полю применяется пояс Роговского. В нашем случае он представляет собой длинный замкнутый соленоид с равномерной намоткой витков.

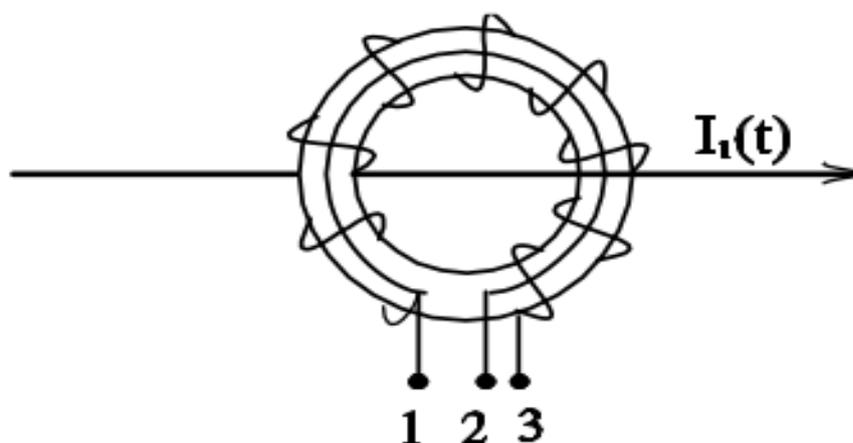


Рис.2. Схема пояса Роговского, 1 и 3 - обмотка соленоида, 1 и 2 - обратный виток (в использованном мною поясе обратный виток отсутствовал.)

Пояс представляет собой импульсный трансформатор, где первичной обмоткой является провод с исследуемым током, а вторичной - сам пояс. Известно, что трансформатор передает хорошо форму сигнала, когда по

первичной обмотке течет синусоидальный ток. В случае произвольного сигнала все гораздо сложнее, так как информация о величине и форме сигнала в первичной обмотке может быть полностью утеряна. Форма и величина выходного сигнала с пояса Роговского зависят от временных параметров исследуемого импульсного тока, конструкции пояса и характеристики нагрузки. При удачно подобранных параметрах пояса и нагрузки можно получить довольно простую зависимость снимаемого сигнала от импульсного тока, то есть восстановить сигнал $I_1(t)$ [3].

Принцип работы пояса Роговского заключается в следующем. Вокруг тока $I(t)$ возникает переменное магнитное поле, которое создает э. д. с. индукции $E(t)$ в соленоиде с коэффициент взаимной индукции M [2].

$$\varepsilon(t) = -M \frac{dI_1(t)}{dt}$$

Наводимую э. д. с. $\varepsilon(t)$ уже можно измерить прибором напрямую. Например, если подключить к поясу осциллограф, то на экране будет наблюдаться производная тока. Для получения информации об исследуемом токе $I_1(t)$ требуется найти метод восстановления $I_1(t)$ по измеряемой величине $\varepsilon(t)$ или, другими словами, проинтегрировать $\frac{dI_1}{dt}$. Для этой цели существует два способа подключения пояса к измерительной цепи. В одном из них пояс работает в режиме интегрирования тока на собственной индуктивности, в другом — в режиме интегрирования тока на внешней емкости. Для восстановления параметров импульсного тока при разряде я использовал интегрирование тока на внешней емкости. Кроме того, величина напряжения на выходе пояса $U_{\text{вых}} = \frac{R_n * I_1}{N}$ или интегрирующей цепочки $U_c(t) = \frac{1}{C} \int I_2(t) dt$ не зависит от положения проводника с током или пучка частиц внутри пояса. Достаточно, чтобы пояс охватывал измеряемый ток. Это утверждение справедливо для сравнительно медленного изменения импульса тока во времени. Если импульс достаточно короткий и ось пояса не совпадает с проводником, с

током, то вследствие конечной скорости распространения электромагнитной волны разные участки пояса будут взаимодействовать с ней в разные моменты времени. Это приведет к искажению формы сигнала. Вследствие конечного времени распространения сигнала вдоль пояса значение э. д. с. индукции связано со значением $\frac{dI_1}{dt}$ не только в данный момент времени, но и в некотором промежутке, равном времени распространения сигнала вдоль пояса. Если длительность измеряемого импульса сравнима с временем распространения, то будут наблюдаться искажения формы импульса [3].

Пояс с соединенными концами представляет из себя «виток» провода в плоскости тора. Если присутствует постороннее переменное магнитное поле, пронизывающее эту плоскость, то на концах пояса появится дополнительная неконтролируемая э. д. с. Кроме того, импульсный ток, проходящий по соленоиду, наводит в нем дополнительную э. д. с. самоиндукции. Учесть эти дополнительные неконтролируемые эффекты довольно трудно. Зато существует способ их исключить. Для этого достаточно от одного конца соленоида пропустить внутри соленоида обратный виток к другому концу и снимать сигнал с них. Этот обратный виток вызывает такую же по величине, но обратную по знаку э. д. с., как паразитную и самоиндукции. Таким образом, неконтролируемые эффекты автоматически компенсируются [3].

4. Методика расчетов

Рассмотрим интегрирование тока на внешней емкости подробнее.

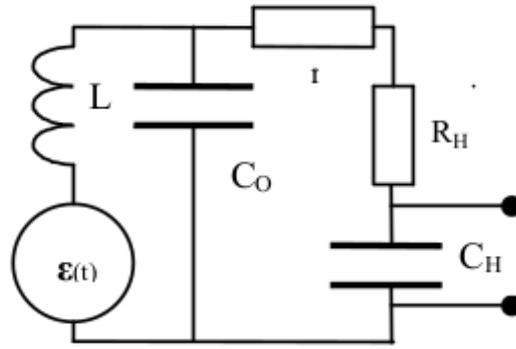


Рис. 3. Схема измерения тока с интегрированием на внешней емкости. Здесь L – индуктивность пояса, C_0 – его собственная емкость, r – активное сопротивление пояса, $R_{\text{н}}$ – активное внешнее нагрузочное сопротивление, $C_{\text{н}}$ – внешняя нагрузочная емкость.

Для восстановления формы исходного тока $I_1(t)$ измеряемый сигнал снимается с емкости $C_{\text{н}}$. Рассмотрим подробнее работу пояса в данной схеме. Индуктивность пояса вместе с элементами интегрирующей цепочки представляет собой колебательный контур с затуханием, последовательно с которым включена внешняя э. д. с. $\varepsilon(t)$. Собственной емкостью пояса C_0 пренебрегаем. Тогда, по закону Кирхгофа,

$$\varepsilon(t) = L \frac{dI_2}{dt} + (R_{\text{н}} + r)I_2(t) = -M \frac{dI_1}{dt}$$

Для замкнутой цепи

$$\varepsilon(t) = L \frac{dI_2}{dt} + (R_{\text{н}} + r)I_2(t) + \frac{1}{C_{\text{н}}} \int I_2(t) dt = -M \frac{dI_1}{dt} \quad (1)$$

где $I_2(t)$ – ток в цепи пояса, $I_1(t)$ – исследуемый ток.

Подберем параметры интегрирующей цепочки так, чтобы при протекании тока $I_2(t)$ с характерным временем $\tau_{\text{н}}$ по цепи пояса основное падение напряжения падало на активном сопротивлении $R_{\text{н}} + r$ пояса. Это соответствует требованию малости величины индуктивного импеданса пояса $\omega L \ll R_{\text{н}} + r$ и емкостного сопротивления $(\omega C_{\text{н}})^{-1} \ll R_{\text{н}} + r$ на характерных частотах исследуемого импульса тока (при $\omega \approx \tau_{\text{н}}^{-1}$). Одновременно это также требование малости $\tau_{\text{н}}$ по сравнению с

временем τ интегрирования $R_H C_H$ цепочки [5]. При таких условиях уравнение (1) преобразуется в

$$\varepsilon(t) = (R_H + r)I_2(t) = -M \frac{dI_1}{dt}$$

Из этого уравнения находим зависимость $I_1(t)$ от $I_2(t)$

$$I_1(t) = -\frac{R_H + r}{M} \int I_2(t) dt$$

Рассмотрим напряжение U_H на емкости C_H с выхода интегрирующей цепочки, смысл использования которой и состоял в том, чтобы проинтегрировать $\varepsilon(t)$ и получить в явном виде $I_1(t)$

$$U_C(t) = \frac{1}{C} \int I_2(t) dt$$

Из двух последних выражений получаем итоговую зависимость $I_1(t)$ от $U_C(t)$

$$I_1(t) = -\frac{(R_H + r)C}{L} N * U_C(t) \quad (2)$$

Условия работы пояса в этом режиме можно оценить неравенством

$$\frac{L}{R_H + r} \ll \tau_H \ll (R_H + r)C_H \quad (3)$$

Параметры пояса и интегрирующей цепочки определялись таким образом, чтобы выполнялось неравенство (3). Было известно, что длительность разряда установки составляет примерно 1 мс, то есть $\tau_H \approx 1$ мс. Тогда в качестве нагрузочного сопротивления выгодно взять резистор с большим сопротивлением (таким сопротивлением стал резистор в 82 кОм). Также имелось три конденсатора, соединенные параллельно, каждый емкостью в 3 мкФ, которые стали нагрузочной емкостью $C_H \approx 9$ мкФ. Тогда $(R_H + r)C_H = 0,82$ с (r пренебрегаем, так как $r \ll R_H$), что много больше τ_H . Для выполнения неравенства было принято, что $\frac{L}{R_H + r} = 0,1$ мкс. Отсюда $L = 0,008$ Гн. Количество витков вычислялось по формуле

$$N = \sqrt{\frac{2\pi L}{\mu_0 \mu b \ln\left(\frac{R+a}{a}\right)}}$$

где L – индуктивность пояса, N – количество витков, b – ширина пояса, μ – магнитная проницаемость кольца, μ_0 – магнитная постоянная, $R+a$ – внешний радиус, a – внутренний радиус. Тогда количество витков $N=120$. Параметры кольца следующие: $R+a = 12$ см, $a = 9$ см, $b = 1$ см, $\mu \approx 1000$ (кольцо ферритовое). Таким образом были определены параметры пояса и интегрирующей цепочки. Собранный пояс представлен на фотографии ниже.

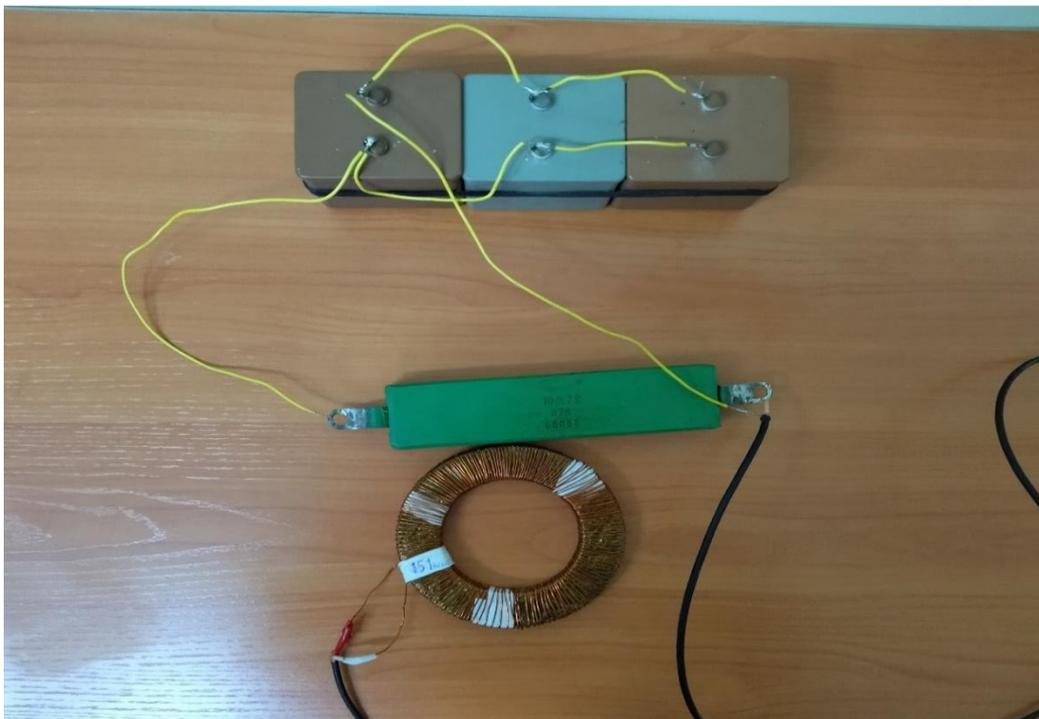


Рис. 4. Пояс Роговского и интегрирующая цепь

При изготовлении пояса намотали 152 витка. В результате $L \approx 0,013$ Гн, но величина $\frac{L}{R_H+r}$ по прежнему много меньше τ_H . Основную погрешность в вычисления вносит магнитная проницаемость кольца μ , так как неизвестна марка материала, из которого изготовлено кольцо. Магнитная проницаемость сильно зависит от состава вещества. Так, например, для феррита в зависимости от марки магнитная проницаемость колеблется от нескольких сотен до нескольких тысяч.

5. Анализ экспериментальных данных

С помощью пояса было сделано несколько измерений: импульсного тока, создаваемого генератором тока и импульсного тока, протекающего в разрядной ячейке. Первое измерение было сделано для проверки работоспособности пояса и проверки его свойств. Измерения представлены ниже в виде осциллограмм.

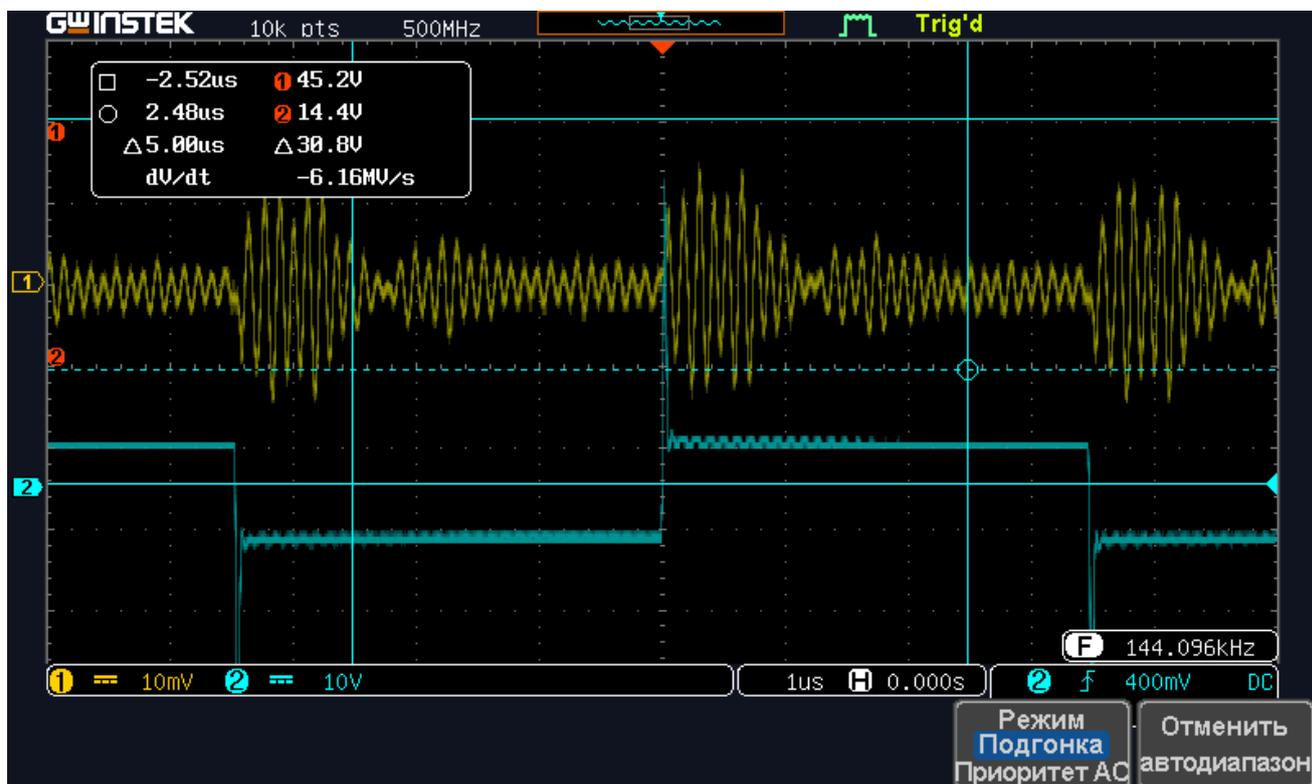


Рис. 5. Зависимость напряжения на поясе от времени, создаваемая прямоугольным сигналом.

Из рисунка под номером 5 видно, что при скачке напряжения в поясе возникает э. д. с. Когда же ток, создаваемый генератором, постоянен, то электромагнитное поле, пронизывающее витки пояса, тоже постоянно и тогда поле не создает в витках тока. В это время ток в поясе, наведенный при скачке напряжения, совершает затухающие колебания. Это объясняется тем, что пояс является колебательным контуром с собственными индуктивностью L , емкостью C_0 и сопротивлением r . Затем при новом скачке снова возникает переменное поле

и процесс повторяется. Таким образом, по осциллограмме, снятой с пояса, можно определить форму импульсного сигнала.

На рисунке 6 представлена зависимость напряжения от времени на поясе Роговского во время разряда. Это напряжение наводится исследуемым импульсным током. На рисунке 7 представлены зависимости напряжения, снятые при двух различных способах прямого подключения делителя к установке. Красным отмечена зависимость напряжения на разрядной ячейке. Синим – на шунте сопротивлением в 4 Ом.

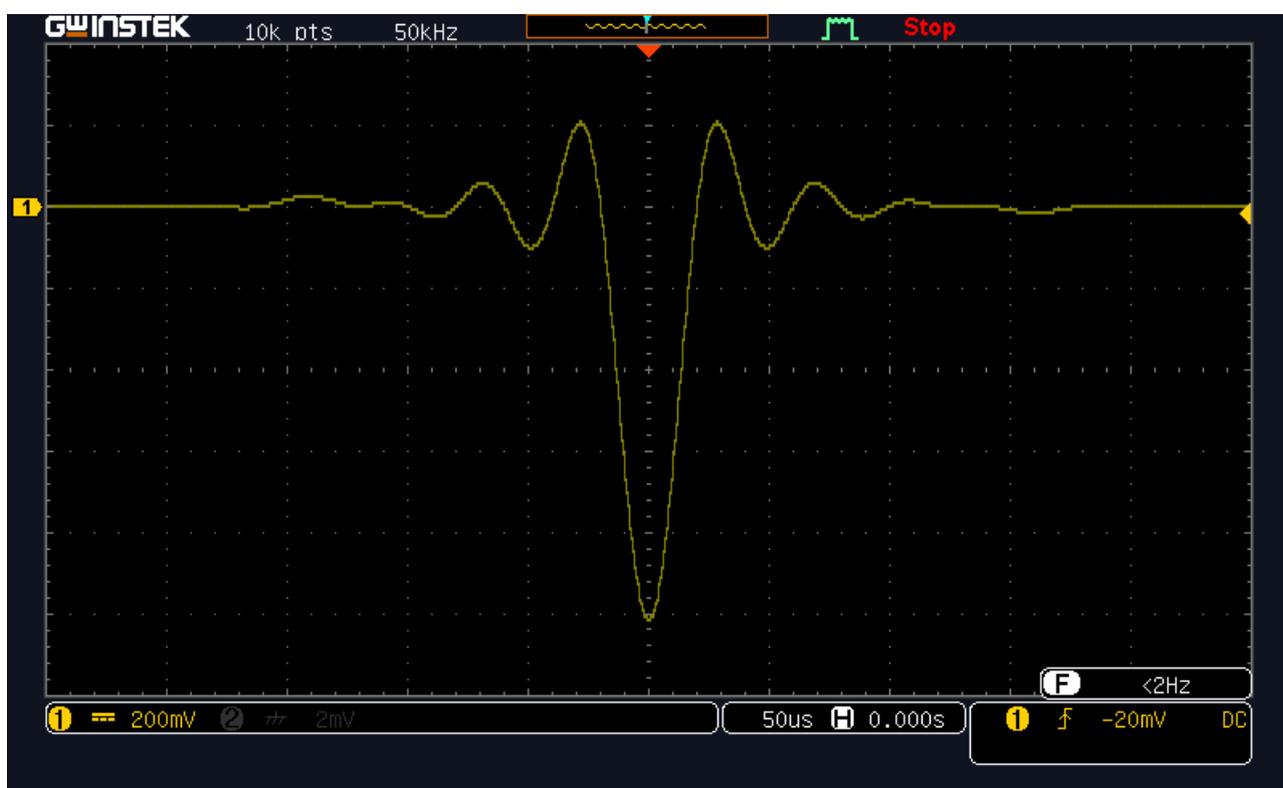


Рис. 6. Зависимость напряжения на поясе от времени во время разряда

Напряжение, Вольт

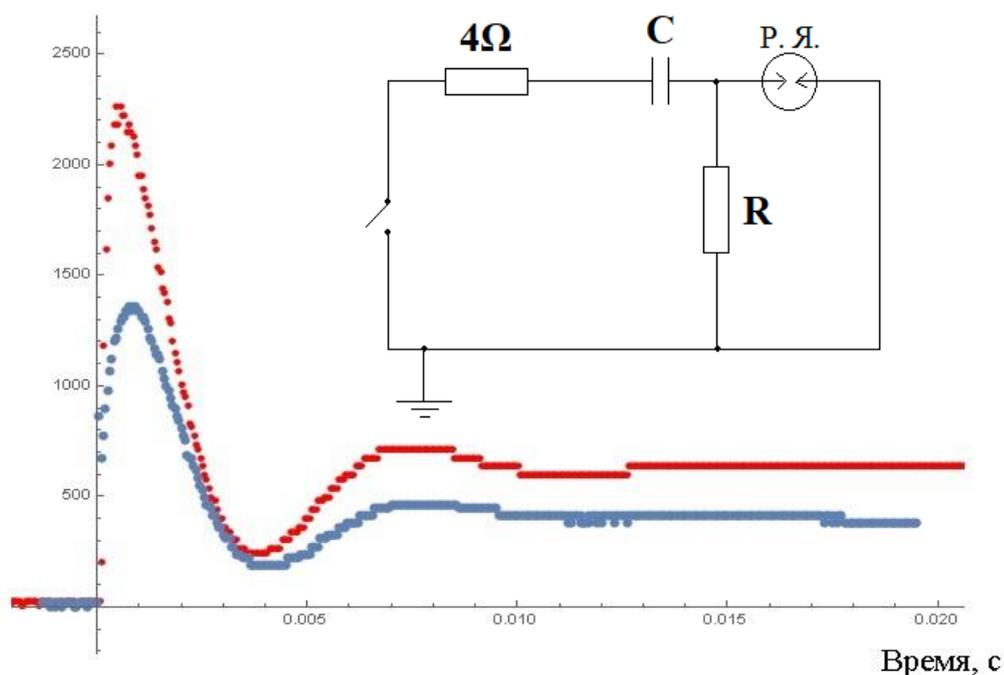


Рис. 7. Зависимость напряжения от времени в цепи во время разряда, полученная с помощью делителя напряжения, подключенного напрямую к установке. Красным показана зависимость при подключении делителя к разрядной ячейке. Синим – при подключении к шунту сопротивлением в 4 Ом.

Глядя на рисунки 6 и 7 можно, увидеть сходство между ними. Различие лишь в том, что на рисунке 7 колебания затухают быстрее. Это можно объяснить тем, что собственное сопротивление делителя больше чем пояса. Действительно, из формулы (3) следует, что зависимость, снимаемая с пояса, должна быть пропорциональна исследуемому току и быть со знаком противоположным $I_1(t)$. Тогда, если до множить каждое значение напряжения на графике 6 на некоторый коэффициент пересчета, то мы получим зависимость импульсного тока от времени, то есть найдем форму сигнала и амплитуду тока. Для используемого пояса Роговского, с учетом знака минус в формуле (3), этот коэффициент равен -928,6. Зависимость $I_1(t)$ представлена на рисунке 8.

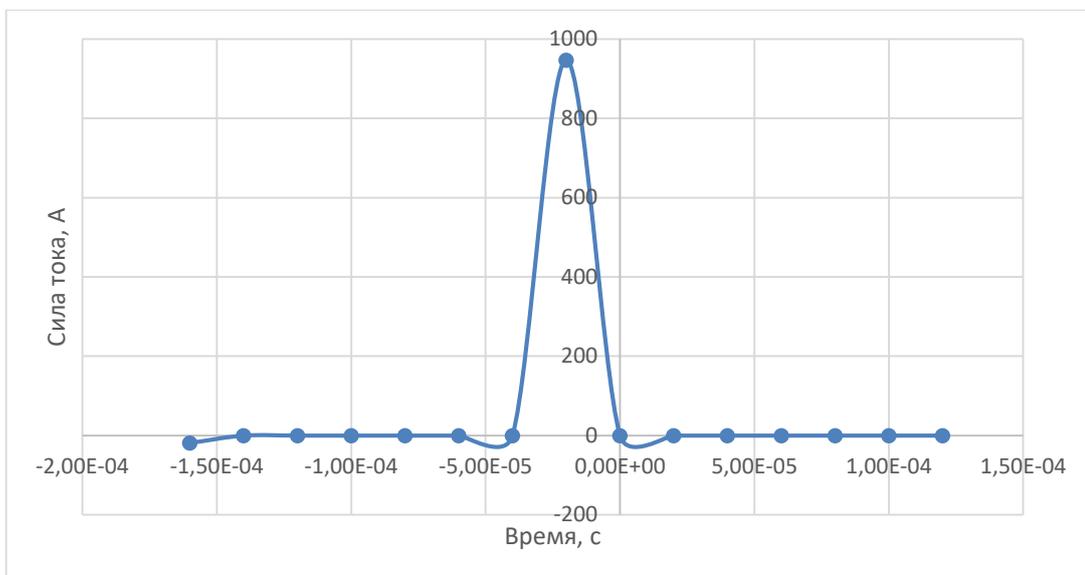


Рис. 8. Зависимость тока от времени на разрядной ячейке при разряде.

Таким образом амплитуда силы тока равна 1 кА. Кроме того, можно наблюдать сходство между графиками 8 и 7, то есть, если домножить каждое значение силы тока на некоторое сопротивление по закону Ома, то мы должны получить зависимость, представленную на рисунке 7. Итак, форма импульсного тока, посчитанная по формуле (3), совпадает с формой $I_1(t)$.

6. Основные результаты

В ходе работы я ознакомился с бесконтактным методом измерения тока с помощью пояса Роговского. В качестве исследуемого тока был выбран ток, протекающий в разрядной установке. Для измерения тока был собран пояс Роговского, работающий в режиме интегрирования тока на внешней емкости. Параметры пояса и интегрирующей цепи были подобраны так, чтобы зависимость импульсного тока от напряжения выглядела наиболее просто. С помощью собранного пояса была получена зависимость напряжения на поясе от времени во время разряда и, соответственно, исследуемого тока. Сравнение полученных графиков осциллограммами, снятыми с делителя напряжения, подключенного напрямую к установке, показало, что формы напряжения на

поясе и напряжения на делителе одинаковы. Таким образом, можно сказать, что ток, текущий к центральному электроду, имеет форму, представленную на рисунке 6. Также была определена амплитуда тока, которая оказалась примерно равна 1 кА.

7. Список литературы

1. Шабанов Г. Д., Шаровая молния – форточка в другой мир. НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, 2018
2. Мешков И.Н., Чириков Б.В., Электромагнитное поле. Новосибирск: Наука. Сиб. отд–ние, 1987. Ч. 1.
3. https://elmag.nsu.ru/doku.php?id=lab5:%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F_53
4. С.И. Степанов.: Природа шаровой молнии. Природа, 1995, №6, сс. 107-117.
5. Б.Л. Бирбраир.: Ball lightning as a possible manifestation of high-temperature superconductivity in Nature. arXiv:physics/0102012v1 [physics.class-ph] 6Feb 2001
6. Г.Д. Шабанов.: О возможности создания природной шаровой молнии новым видом импульсного разряда в лабораторных условиях. УФН. Январь 2019.