



Московский государственный университет

им. М. В. Ломоносова

Факультет фундаментальной физико-химической инженерии

Институт проблем химической физики РАН

Лаборатория Электромагнитных процессов в ударно-сжатых средах

## Импульсное магнитное поле в соленоиде

Курсовая работа

студента 201 группы

В. Б. Лямина

Научные руководители:

к.ф.-м. н Н.С. Шилкин

Член-корреспондент РАН В. Б. Минцев

Черноголовка 2015

## Оглавление

|   |    |
|---|----|
| Введение  | 3  |
| Литературный обзор  | 4  |
| • Пояс Роговского   | 4  |
| • RLC- контур   | 4  |
| Экспериментальная часть                                   | 6  |
| • Описание соленоидов                                     | 6  |
| • Определение геометрического фактора множителя соленоида | 7  |
| • Определение постоянной пояса Роговского                 | 9  |
| • Расчет индуктивного датчика                             | 11 |
| • Методика проведения эксперимента                        | 12 |
| Обработка результатов                                     | 13 |
| • Определение константы индуктивного датчика              | 14 |
| Генерация импульсного магнитного поля в соленоидах        | 16 |
| • Первый соленоид   | 16 |
| • Второй соленоид   | 19 |
| • Третий соленоид   | 21 |
| Сравнительная характеристика соленоидов                   | 23 |
| Результаты  | 24 |

## **Введение**

Генерация импульсных магнитных полей в лабораторных условиях часто осуществляется при разряде батареи конденсаторов через многовитковые или одновитковые соленоиды. Магнитные поля при этом используются в проводимых физических исследованиях. Генерация сильных полей обычно сопровождается разрушением соленоида. Поэтому разряд батареи через соленоид также позволяет исследовать влияние механических и термических воздействий на процессы разрушения конденсированных тел.

Цель работы состояла в генерации импульсного магнитного поля в однослойном многовитковом соленоиде при разряде батареи конденсаторов.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Определить постоянную пояса Роговского для измерения электрического тока, протекающего в RLC цепи.
2. Изготовить и прокалибровать индуктивный датчик для измерения импульсного магнитного поля.
3. Измерить временные зависимости электрического тока и магнитной индукции в соленоиде при разряде батареи конденсаторов, заряженной до различных напряжений.
4. Исследовать влияние армирования соленоида на максимальную величину магнитного поля генерируемого в соленоиде. Обосновать механизмы разрушения соленоидов.

## ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

### Пояс Роговского

Пояс Роговского или катушка Роговского - это измерительная катушка индуктивно связанная с контуром, по которому протекает измеряемый ток. Пояс назван в честь немецкого физика Вальтера Роговского. Обычно пояс выполняется в виде длинного замкнутого тора охватывающем провод с измеряемым током. В нагруженном поясе Роговского электродвижущая сила пропорциональна изменению тока  $I(t)$  в объекте измерения:

$$E(t) = M \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

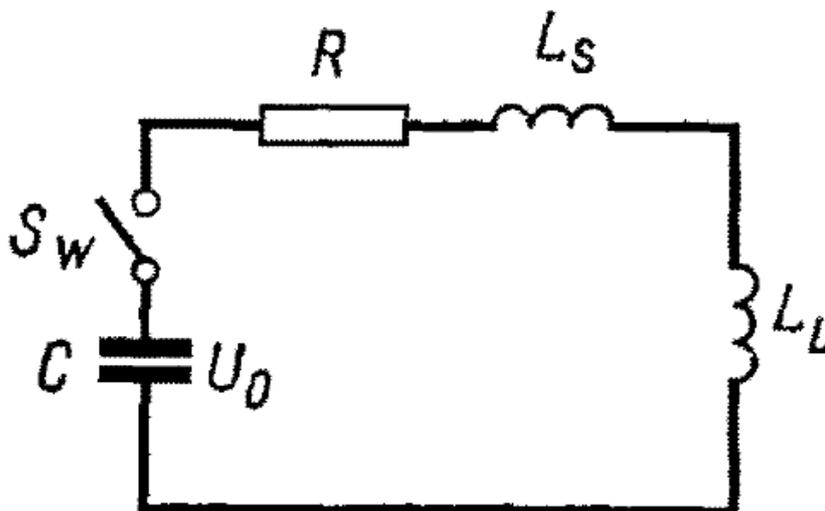
где  $M$ — взаимная индуктивность пояса с контуром измеряемого тока.

### RLC- контур

Дифференциальное уравнение для электрического тока  $I$ , протекающего по цепи, показанной на рисунке 1, записывается следующим образом:

$$\frac{L * d^2 I}{dt^2} + \frac{R * dI}{dt} + \frac{1}{C} * I = 0 \quad (2)$$

где  $L = L_L + L_S$  (3)



$C$  – батарея конденсаторов, заряженная до напряжения  $U_0$ ,  $S_w$  – электрический ключ, замыкающийся в нулевой момент времени,  $R$  – сопротивление,  $L_s$  – паразитная индуктивность цепи,  $L_L$  – индуктивность соленоида

Рисунок 1 – Схема последовательного RLC-контура

В зависимости от соотношения значений  $R, L$  и  $C$  возможны три режима разряда батареи. В первом случае, когда  $R < 2\sqrt{L/C}$  реализуется периодический режим с затуханием (затухание меньше критического), а решение уравнения (2) имеет вид:

$$I = \frac{U_0}{\omega * L} \exp\left(-\frac{R}{2L} * t\right) \sin(\omega * t) \quad (4)$$

Здесь  $\omega$  — угловая частота  $\omega = \sqrt{\left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}\right)}$  (5)

При  $R > 2\sqrt{L/C}$  происходит аperiodический разряд батареи (затухание больше критического) и решение (2) принимает вид:

$$I = \frac{U_0}{\omega L} \exp\left(\frac{-R}{2L} t\right) \frac{e^{\omega t} - e^{-\omega t}}{2} \quad (6)$$

При  $R = 2\sqrt{L/C}$  реализуется критический режим, который также называют граничным режимом. Решение уравнения (2) описывается выражением:

$$I = \frac{U_0}{L} t * \exp\left(-\frac{R}{2L} t\right) \quad (7)$$

Продифференцировав выражение (4) по времени и приняв  $t=0$ , получим:

$$\left. \frac{dI}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U_0}{L} \quad (8)$$

Данное соотношение (8), потребуется для определения постоянной пояса Роговского.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Описание соленоидов

Для генерации магнитных полей использовались однослойные соленоиды намотанные на трубке из ПВХ диаметром 25 мм.

**Первый соленоид** намотан медным проводом ПСДК сечением 5x1 мм на ребро. Армирование соленоида не проводилось. Плотность намотки составила 75 витков/м, индуктивность соленоида 12,5 микрогенри.



Рисунок 1. Фотография первого соленоида

**Второй соленоид** изготовлен сходным образом. Плотность намотки 75 витков/м, индуктивность соленоида 13,8 мкГн. Соленоид был армирован 10 слоями стеклотенты с использованием эпоксидного компаунда.

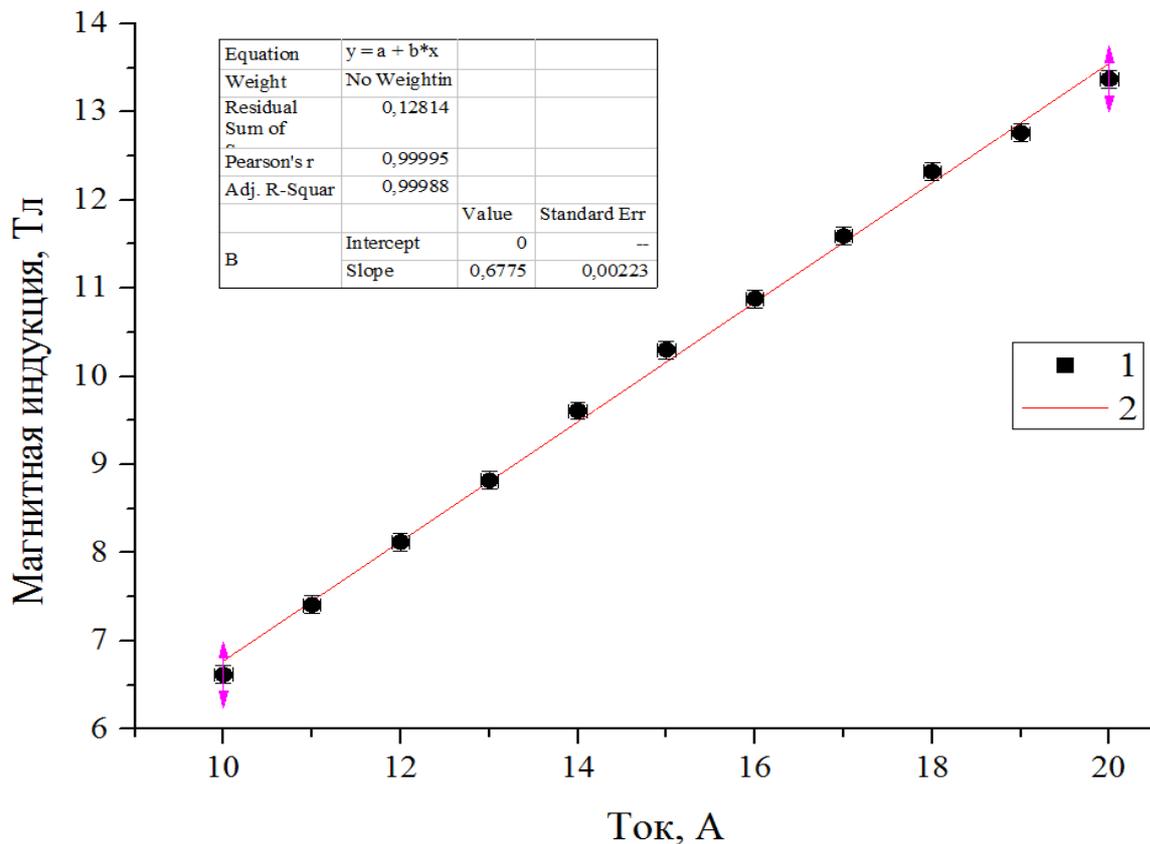
**Третий соленоид** изготовлен из стального отожженного провода, изолированный одним слоем скотч-ленты толщиной 50 мкм, индуктивность соленоида 27,3 мкГн. Соленоид армирован 10 слоями стеклотенты с использованием эпоксидного компаунда.

|                     | Катушка 1 | Катушка 2 | Катушка 3 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| Индуктивность, мкГн | 12,5      | 13,8      | 27,3      |
| Сопротивление, Ом   | 0,015     | 0,016     | 0,198     |
| Осевая длина, мм    | 40        | 40        | 80        |
| Диаметр, мм         | 25,4      | 25,4      | 25,4      |

### **Определение геометрического фактора множителя соленоида**

Геометрический фактор соленоида определяется как отношение магнитной индукции в центре соленоида к протекающему через него электрическому току  $K=B/I$ . Геометрический фактор в первую очередь зависит от конструкции соленоида, а также от магнитных свойств вещества внутри соленоида. Геометрический фактор бесконечного однослойного соленоида с равномерной намоткой определяется выражением  $K=\mu_0*n$ , где  $\mu_0=4\pi*10^7$  магнитная постоянная, а  $n$  – количество витков на единице длины соленоида. Геометрический фактор соленоида изменяется при деформации соленоида, а также, например, при межвитковом пробое. При малых токах, протекающих через соленоид, деформации соленоида отсутствуют, а геометрический фактор сохраняет свое постоянное значение. Угловой коэффициент кривой в координатах В-І дает значения геометрического множителя.

Для определения начального геометрического фактора выполнялось измерение зависимости магнитной индукции в центре соленоида от протекающего электрического тока. Постоянный ток в цепи создавался источником питания Актаком АТН1113 с индикацией тока. Измерение магнитного тока осуществлялось портативным датчиком Холла. Полученные экспериментальные данные для одной из катушек приведены на Рисунке 3. Полученные точки аппроксимировались линейной зависимостью, проходящей через начало координат.



1 — Магнитная индукция в центре соленоида

2 — Линейная аппроксимация (1) с фиксированным нулем

Рисунок 3. Зависимость магнитной индукции в центре соленоида от электрического тока, протекающего в нем

Данные по геометрическому множителю исследованных катушек представлены в Таблице 1:

| Катушка №                  | 1                    | 2                    | 3                    |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Геометрический фактор, Т/А | $6,2 \times 10^{-4}$ | $6,8 \times 10^{-4}$ | $5,1 \times 10^{-4}$ |

## Определение постоянной пояса Роговского

Постоянная пояса Роговского определялась при разряде последовательной RLC цепи. Для этого измерялись следующие параметры: начальное напряжение на батарее конденсаторов  $U_0$ , полная индуктивность цепи  $L$  и напряжение на выходе пояса Роговского в начале разряда. Далее использовался тот факт, что при разряде RLC цепи в периодическом режиме с затуханием в нулевой момент времени выполняется следующее выражение(8):

$$\left. \frac{dI}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U_0}{L}$$

Начальное напряжение батареи контролировалось киловольтметром. Индуктивность цепи определяется индуктивностью соленоида, которая измерялась с помощью цифрового измерителя R,L и C E7-8. Временная зависимость  $U_c(t)$  напряжения на выходе пояса Роговского записывалась на цифровой осциллограф WaveJet 324.

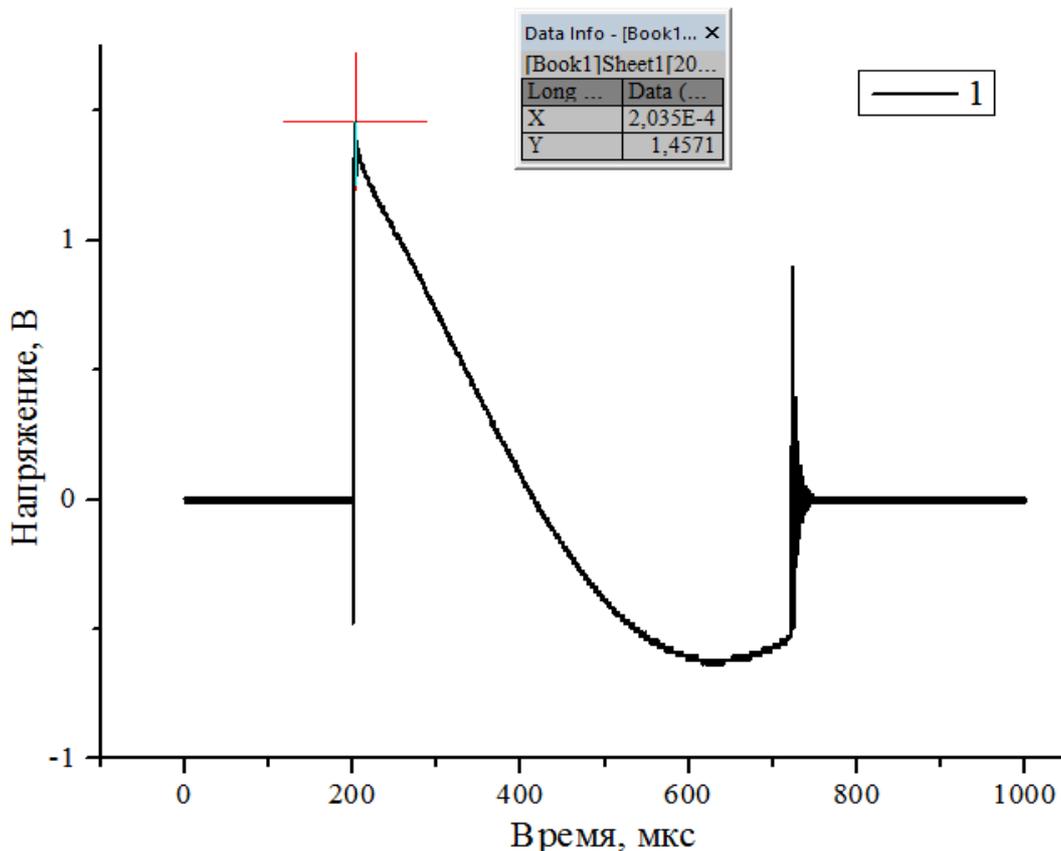
Принимая во внимание, что в нулевой момент времени выполняется выражение (8),

получаем формулу для определения постоянной пояса  $K_c = \frac{U_0}{L * U_c}$  . (9),

где

$U_0$  – напряжение на батарее конденсаторов в нулевой момент времени,

$U_c$  – напряжение на поясе Роговского в нулевой момент времени (см. Рисунок 5).



1 — Данные с пояса Роговского

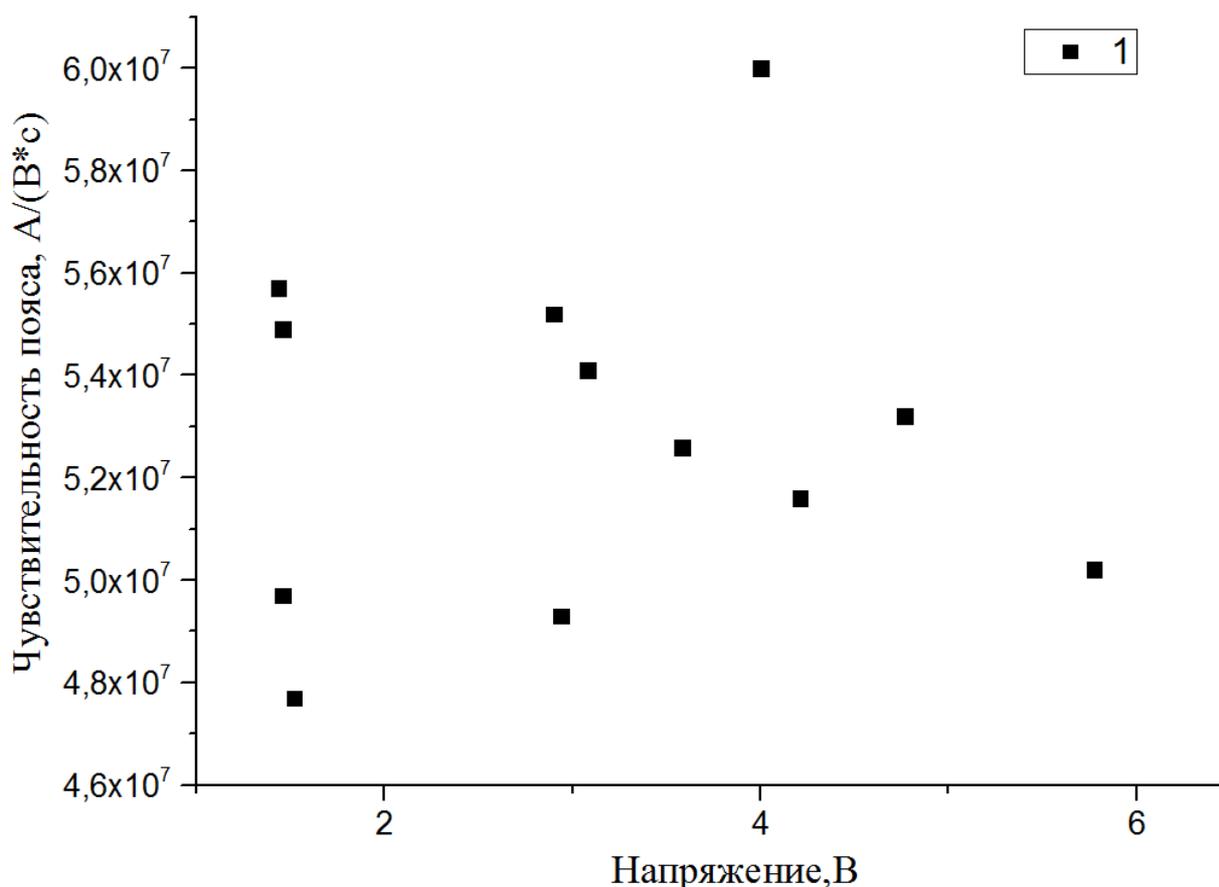
Рисунок 5. Нахождение напряжения на поясе Роговского в начальный момент времени

Массив данных с значениями постоянной пояса Роговского приведен в Таблице 2.

Таблица 2.

|                                     |       |       |      |      |       |      |      |       |       |       |      |       |       |
|-------------------------------------|-------|-------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| Напряжение на датчике при $t=0$ , В | 1,457 | 1,435 | 2,9  | 4,00 | 1,459 | 1,52 | 1,52 | 2,937 | 3,081 | 3,581 | 4,21 | 4,765 | 5,773 |
| $K_c \cdot 10^7$ А/(В*с)            | 5,49  | 5,57  | 5,52 | 6,00 | 4,97  | 4,77 | 4,77 | 4,93  | 5,41  | 5,26  | 5,16 | 5,32  | 5,02  |

Статистическая обработка полученных данных проводилась с помощью программного продукта Origin. В результате было получено следующее значение постоянной пояса  $K_c = 5,3 \times 10^7$  А/(В с) со среднеквадратичной погрешностью  $0,4 \times 10^7$  А/(В с).



1-Чувствительность пояса Роговского

Рисунок 6. Данные по чувствительности пояса Роговского при различных напряжениях на датчике

## Расчет индуктивного датчика

Конструкция индуктивного датчика выбиралась таким образом, чтобы обеспечить в эксперименте на его выходе сигналы с амплитудой не более 10 вольт.

Для оценки ЭДС, генерируемой в измерительной катушке, помещенной в изменяющемся магнитном поле  $B(t)$  использовалось соотношение:

$$-E = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{S * N * dB}{dt} \quad (10),$$

Где  $\Phi$  – магнитный поток, пронизывающий катушку,  $S$  – площадь одного витка катушки,  $N$  – количество витков в катушке.

Максимальная производная магнитного поля внутри соленоида реализуется в нулевой момент времени, когда через него начинает течь электрический ток. Магнитное поле в центре соленоида линейно зависит от протекающего через него тока с коэффициентом пропорциональности  $K$ . Предполагая, что в эксперименте будет реализовываться периодический разряд с затуханием, для описания зависимости электрического тока от времени воспользуемся выражением (4).

Взяв продифференцированное соотношение для магнитного поля и подставив его в начальные условия для производной тока получим:

$$\frac{dB}{dt}_{t=0} = K \frac{U_0}{L} \quad (11)$$

Подставляем в формулу (10) получаем соотношение:

$$-E_{t=0} = S * N * K \frac{U_0}{L} \quad (12)$$

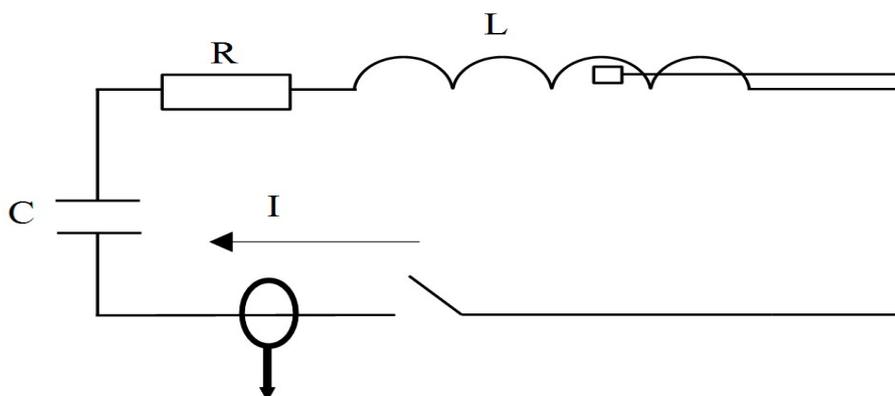
Откуда выражаем количество витков в катушке  $N$ :

$$N = \frac{E * L}{S * K * U_0} \quad (13)$$

Подставляем известные значения:  $E=1$ ,  $L$ - соленоида, например первого  $=12,5 * 10^{-6}$ , Площадь  $S$  находится как площадь круга радиусом 1,5 мм это сечение провода на из которого изготавливается датчик  $S= 7,1 * 10^{-6}$ ,  $K= 6,2 * 10^{-4}$   $U_0=2$  кВ. Тогда:  $N=1,44$  то есть примерно 1,5 витка необходимо намотать на датчике, для измерений производной магнитного поля в требуемом диапазоне  $[-10,10]$  В.

## Методика проведения эксперимента

Для генерации магнитного тока исследуемые соленоиды включались в последовательную RLC цепь, изображенную на Рисунке 7.



C – высоковольтная батарея конденсаторов, L – исследуемый соленоид, R – сопротивление цепи

Рисунок 7. Последовательная RLC цепь с индуктивным датчиком и поясом Роговского

В цепи находится конденсатор емкостью в 1200мкФ, игнитронный разрядник ИРТ-6, пояс Роговского и индуктивный датчик, помещенный внутрь соленоида. Цифровой осциллограф марки Wavejet 324 использовался для записи электрических сигналов.

Первый канал осциллографа использовался для записи сигнала с интегратора, подключенного к поясу Роговского через сопротивление в 50 Ом, постоянная интегратора  $\tau=6880$  мкс.

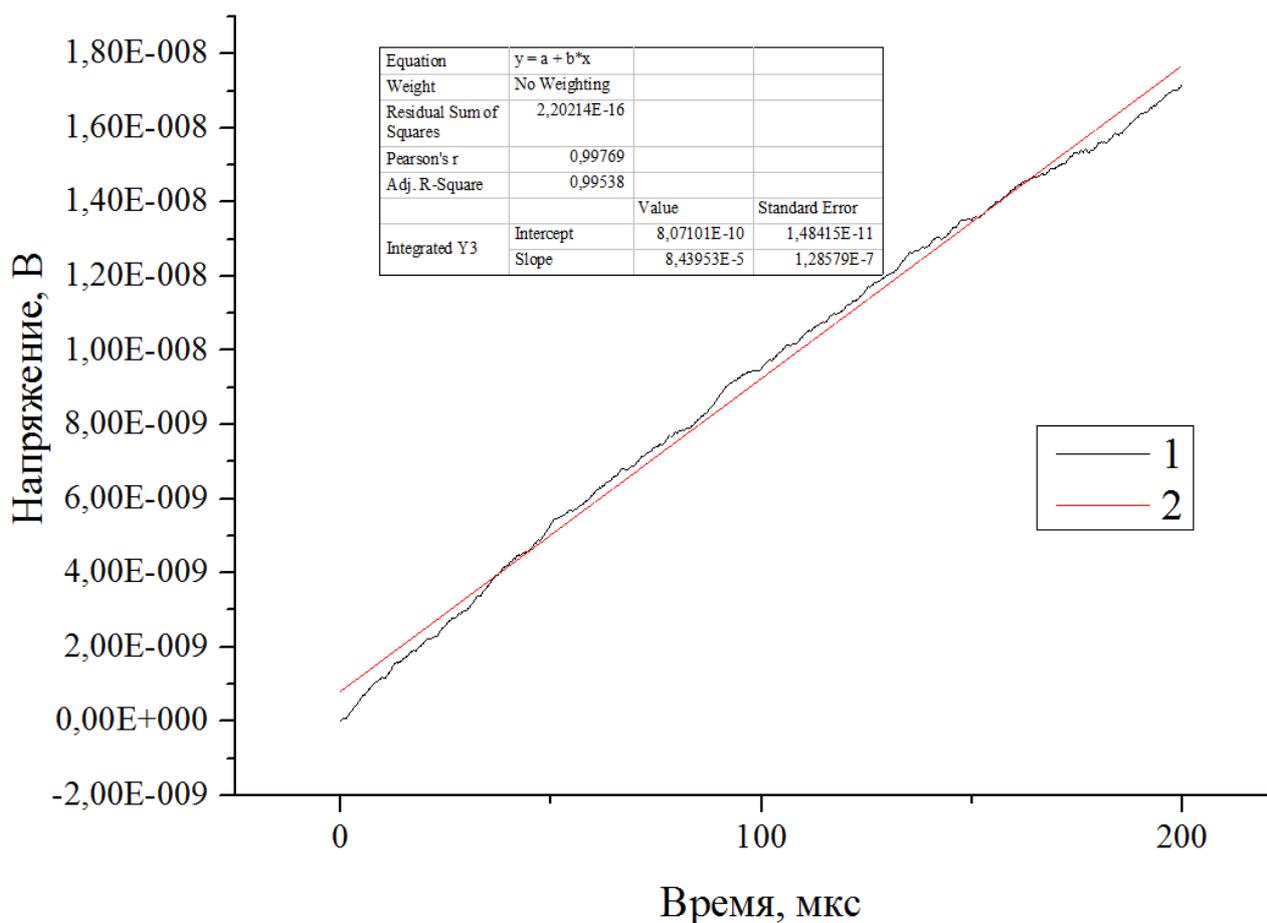
Второй канал подключался к поясу Роговского напрямую через волновое сопротивление 50 ом.

Третий канал подключен к индуктивному датчику через интегратор с постоянной  $\tau=4192$  мкс. Четвертый канал подключен к индуктивному датчику напрямую.

Данные записывались на осциллографе в файлы, которые затем обрабатывались на компьютере.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Изначально на графиках корректировалось смещение нулевой линии. Для этого брались показания, которые идут до начала разряда конденсатора, и нормировалось их положение относительно нуля. Для этого все точки от нуля и до точки начала разряда конденсатора интегрировались, полученная зависимость аппроксимировалась линейной функцией (Рисунок 8). Найденный угловой коэффициент наклона аппроксимированной кривой вычитался из значений на всем графике, тем самым центрируя график относительно нулевой линии.



1 — Данные с индуктивного датчика

2 — Аппроксимированная прямая

Рисунок 8. Пример аппроксимации проинтегрированной части осциллограммы, взятой до начала измерений

## Определение константы индуктивного датчика

Для определения константы воспользуемся соотношением  $B=K*I$ , где  $B$  – магнитная индукция в центре соленоида,  $K$  – геометрический фактор соленоида,  $I$  – электрический ток, протекающий через соленоид. Продифференцируем это выражение и получим, что,

$$\frac{dB}{dt} = K \frac{dI}{dt} \quad (13)$$

С осциллографа данные преобразуются следующим образом:  $\frac{dB}{dt} = U * K_{dat}$ , где

$K_{dat}$  – постоянная датчика, а  $U$  – напряжение на выходе датчика.

Учитывая, что  $\frac{dI}{dt} = U_c * K_c$ , где  $K_c$  – постоянная пояса Роговского, а  $U_c$  – напряжение на выходе пояса Роговского, получим выражение для определения константы индуктивного датчика:

$$K_{dat} = \frac{K}{U_{dat}} * U_c * K_c \quad (14)$$

Для калибровки индуктивного датчика использовался разряд батареи конденсаторов через соленоид. Начальное напряжение не превышало 1000 В. Были получены следующие значения константы датчика:

Для первой катушки

| № | Kdat  |
|---|-------|
| 1 | 22900 |
| 2 | 23000 |

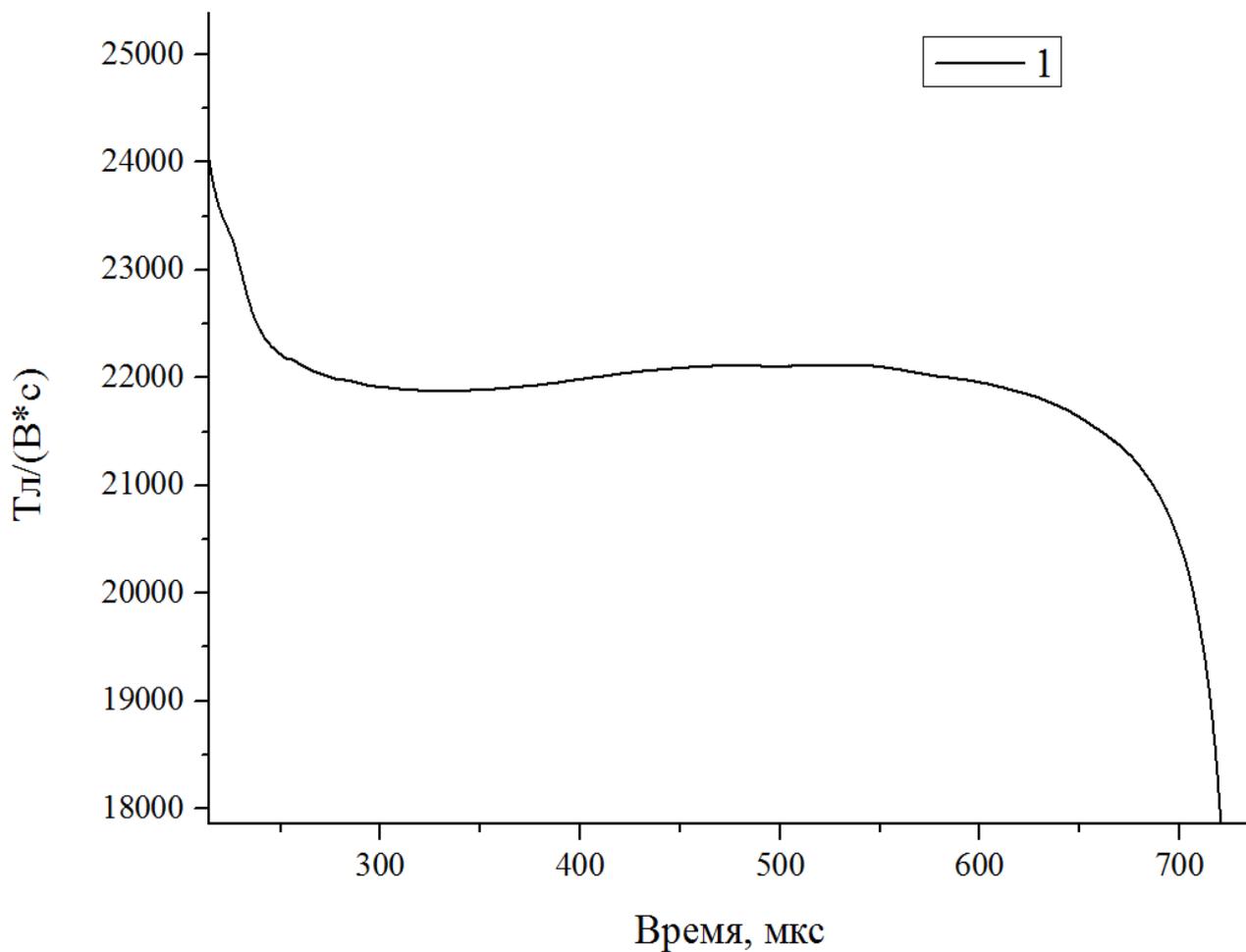
Для второй катушки

| № | Kdat  |
|---|-------|
| 1 | 21800 |
| 2 | 22300 |
| 3 | 22000 |

Для третьей катушки

| № | Kdat  |
|---|-------|
| 1 | 22200 |
| 2 | 20000 |
| 3 | 20000 |

Среднее значение  $K_{dat} = 2,2 * 10^4$  [Т/В\*сек]



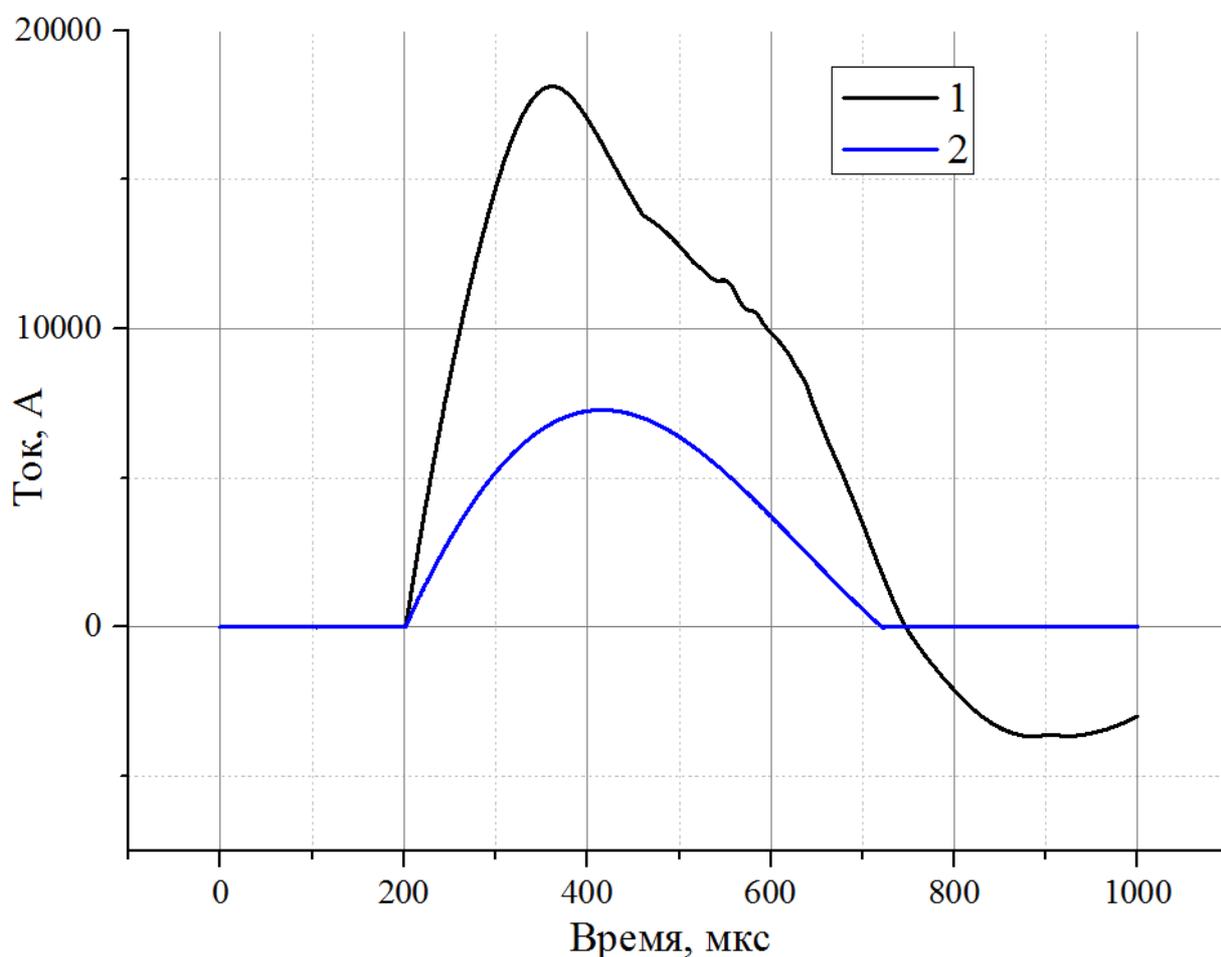
1 — Постоянная индуктивного датчика полученная по формуле (14)

Риснок 9. Массив данных для определения константы индуктивного датчика, полученный в типичном эксперименте.

# ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СОЛЕНОИДАХ

## Первый соленоид

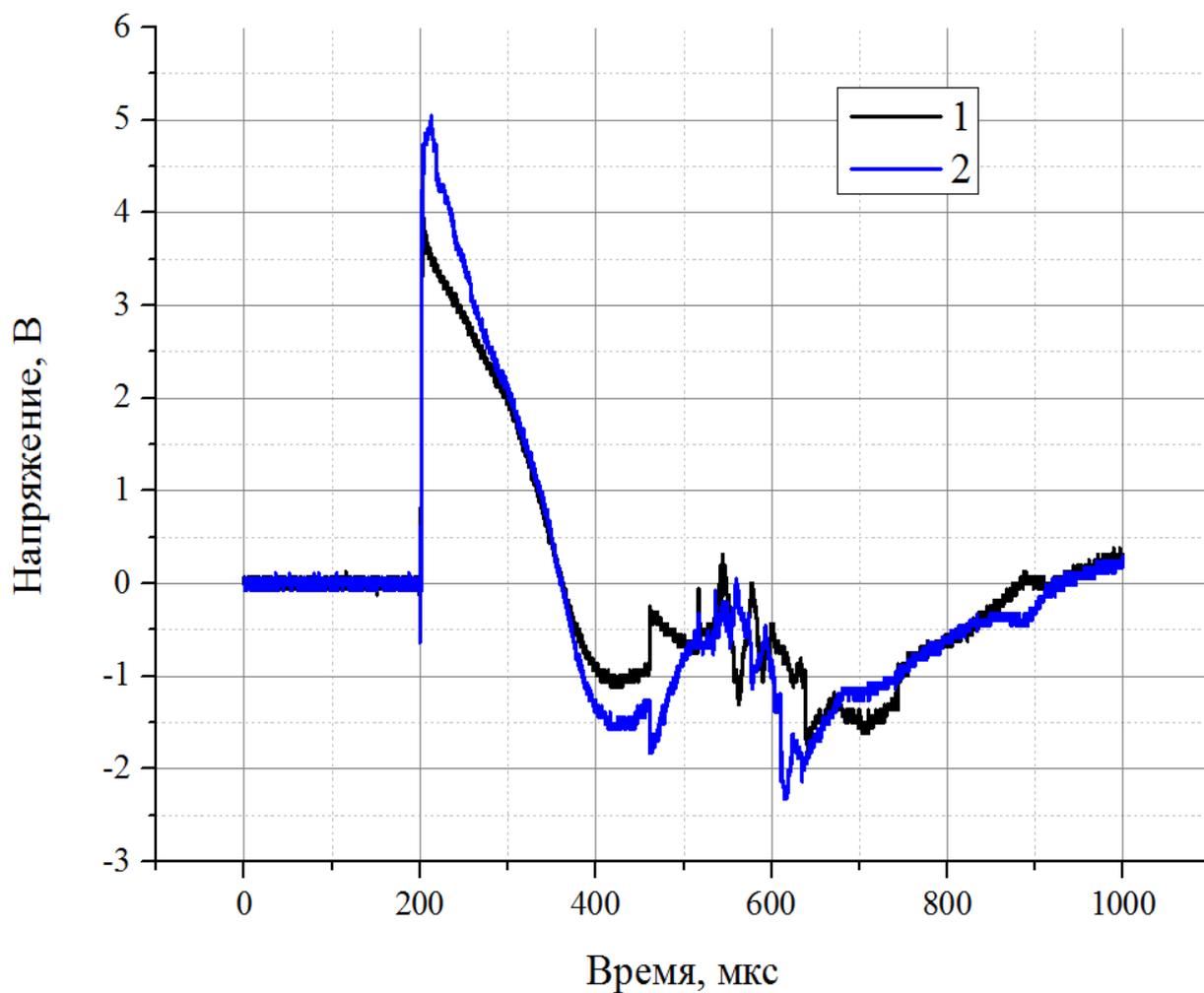
Чтобы понять каким образом произошло разрушение соленоида необходимо рассмотреть графики зависимости тока и его производной по времени, чтобы понять какие изменения происходили внутри катушки. На графике производной в районе 0,0003 секунд наблюдается увеличение наклона, что соответствует сдвигу витков в радиальном направлении, как следствие из-за данного движения нарушается изоляция витков и последующие скачки на графике после 400 мкс вызваны перемыканием витков. В таких местах возникают пробой и затем разрушение в радиальном направлении. Из графика тока можно видеть, что соленоид разрушился раньше, чем ток достиг своего максимума.



1 — Сила тока при зарядном напряжении конденсатора  $U_0=3$  кВ

2 — Сила тока при зарядном напряжении конденсатора  $U_0=1$  кВ

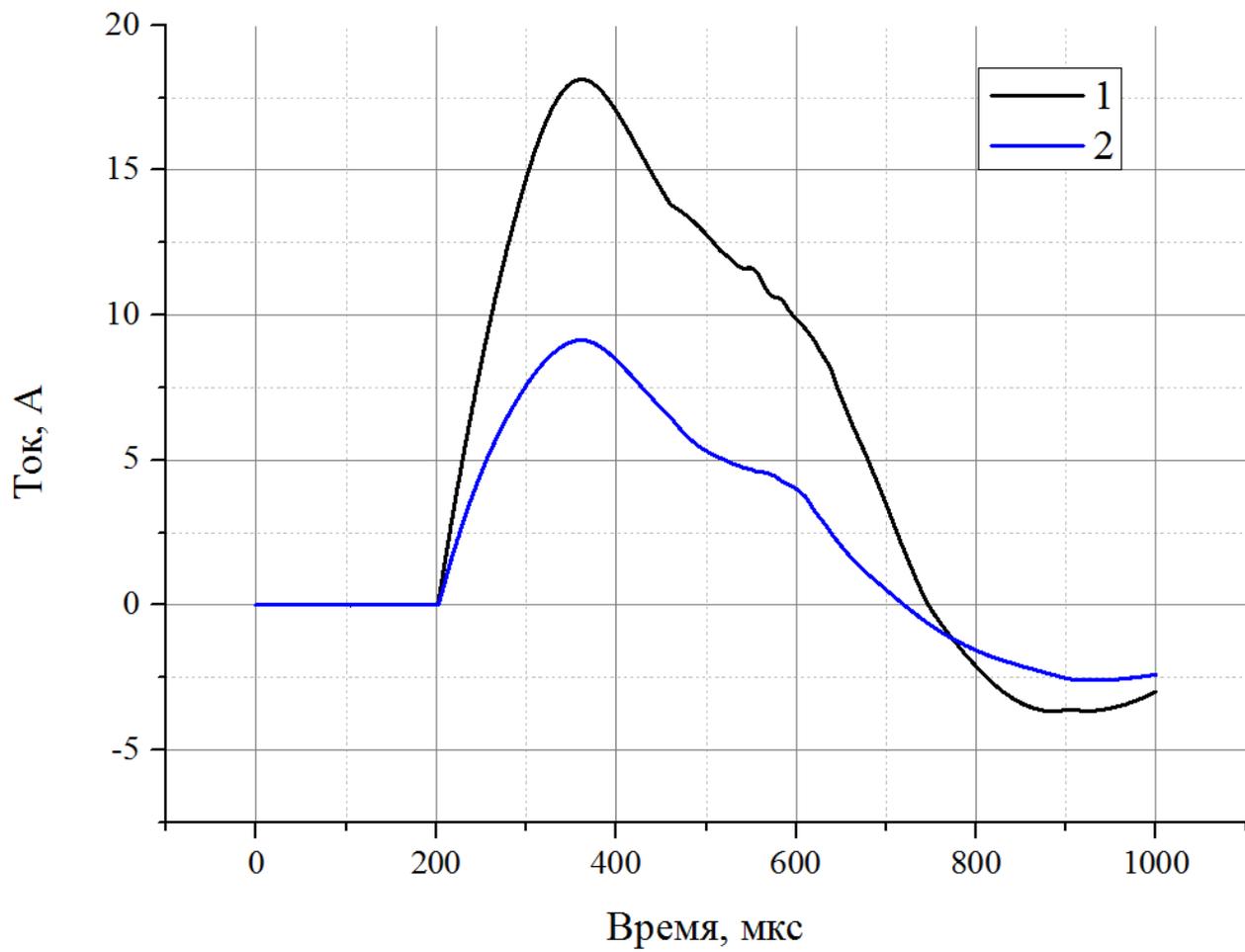
Рисунок 10. Сравнение тока при разрушении первого соленоида ( $U_0=3$  кВ) и при напряжении  $U_0=1$  кВ.



1 — Сигнал с пояса Роговского ( производная тока по времени)

2 — Сигнал с индуктивного датчика (производная магнитного поля по времени)

Рисунок 11. Временные зависимости производных при разрушении первого соленоида



1 — Ток протекающий в первом соленоиде

2 — Магнитное поле в первом соленоиде

Рисунок 12. Временные зависимости силы тока и магнитного поля от времени.

## Второй соленоид

Рассмотрим графики производной тока и магнитной индукции для второго соленоида. А также графики самого тока и магнитного поля.

Приблизительно с 300 мкс можно заметить изменение кривизны графиков, связанное с деформацией соленоида, незначительное изменением его геометрии в радиальном направлении. Приблизительно в момент времени 470 мкс происходит переключение витков соленоида, в следствие чего резко увеличивается ток и магнитное поле, разрывающее соленоид в радиальном направлении, что видно по отсутствию магнитного поля после данного скачка, а также отсутствию зависимости магнитного поля от тока на рисунке 13.

Наличие тока после разрушения соленоида связано с переключением витков, по которым течет ток, это видно на изображении разрушенного соленоида на рисунке 14.

На рисунке 15 хорошо видно, что хоть соленоид и был разорван в радиальном направлении, но в аксиальном направлении витки плотно прижаты друг к другу, как раз по ним и течет ток.

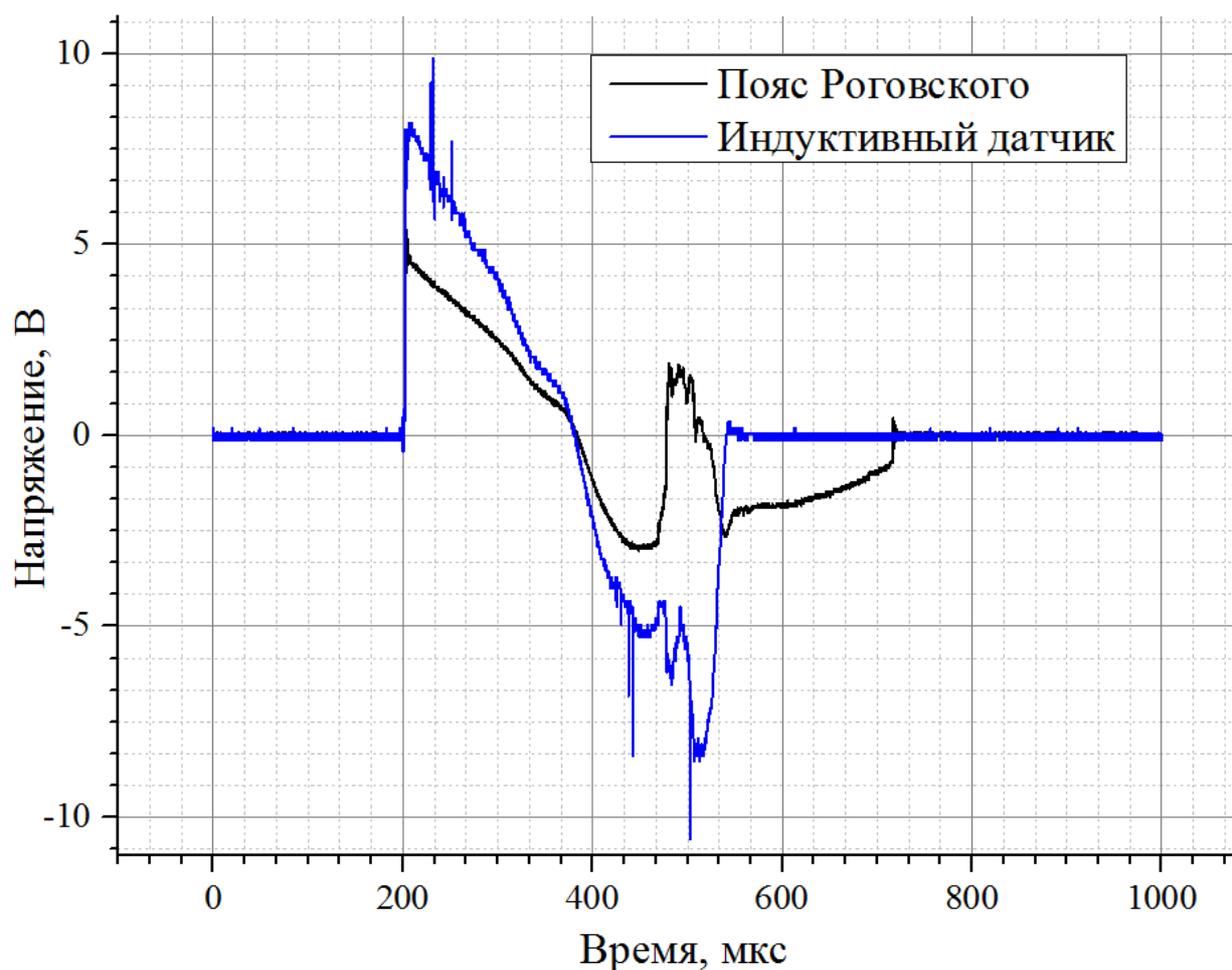


Рисунок 13 Временная зависимость производной тока и производной магнитной индукции при разряде батареи конденсаторов через соленоид 2.

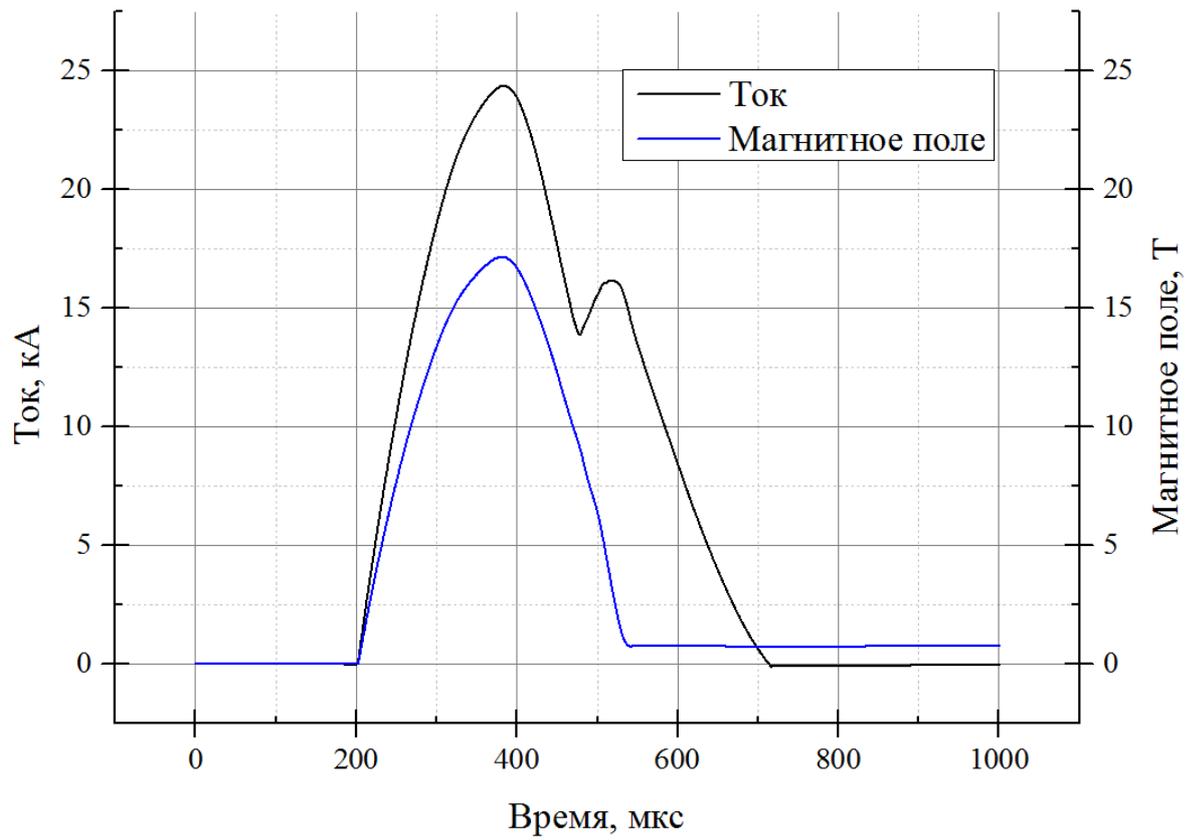


Рисунок 14 Зависимость силы тока и магнитной индукции при разряде батареи конденсаторов через соленоид 2.

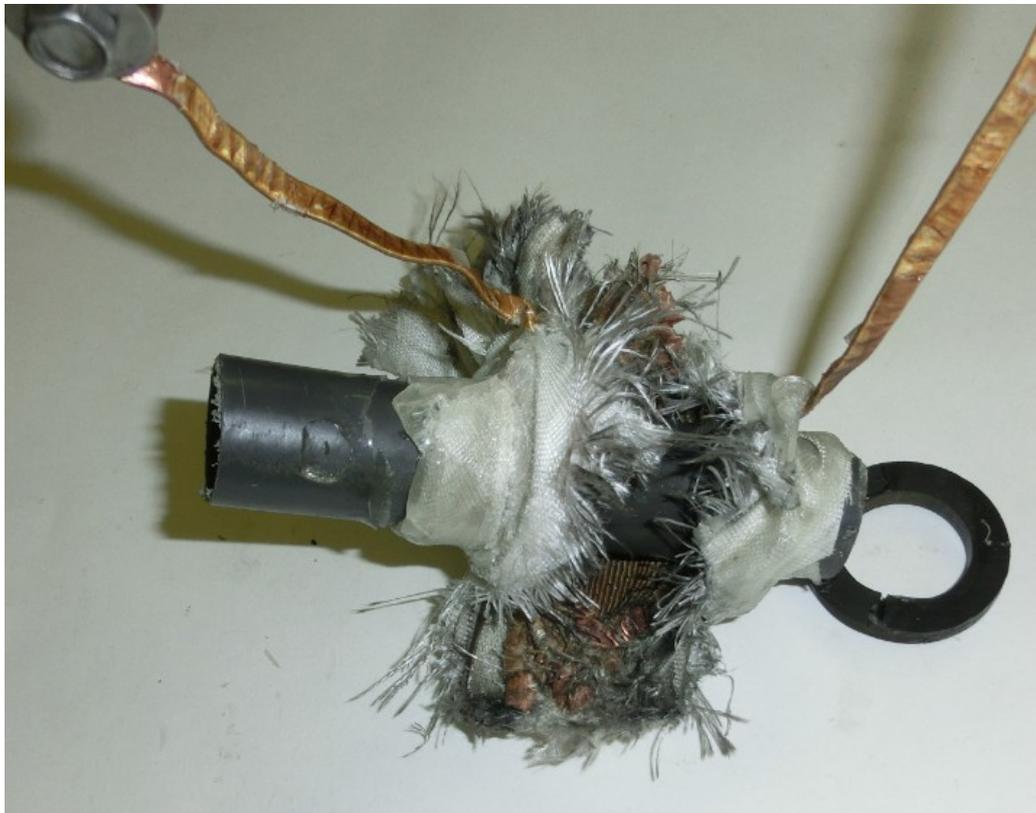


Рисунок 15. Разрушенный второй соленоид

### Третий соленоид

Третий соленоид достаточно сильно отличался от первых двух соленоидов: материалом провода, намотанного на каркас; длиной; индуктивностью и очень сильно отличался сопротивлением.

По производным видно, что на протяжении всего процесса разрядки, происходят деформации соленоида, это видно по резким колебаниям графиков. Так же видно, что поле пропало раньше чем ток перестал течь. Но из графика магнитного поля видно, что поле сохранялось достаточно долго, это как и в случае второго соленоида обусловлено сохранением тока в витках соединенных аксиальными силами, разорвавшими изоляцию.

Если смотреть на графики тока и магнитного поля, можно заметить, что было сгенерировано достаточно малое поле, но большой ток. Из-за этого основная энергия ушла в джоулев нагрев соленоида и как следствие соленоид загорелся, из-за чего скорее всего и произошло разрушение.

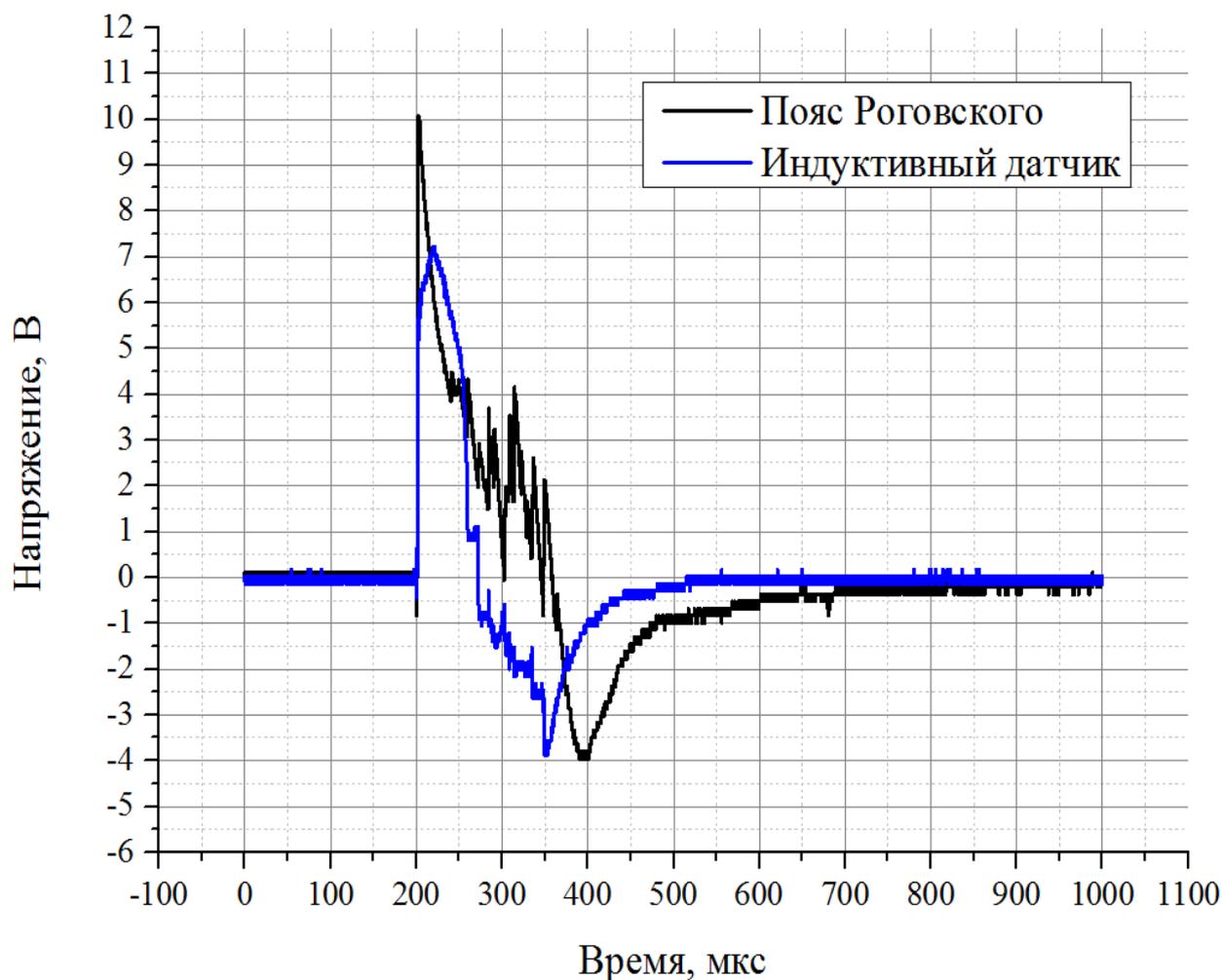


Рисунок 16 Временная зависимость сигнала с пояса Роговского и индуктивного датчика при разряде батареи конденсаторов через соленоид 3.

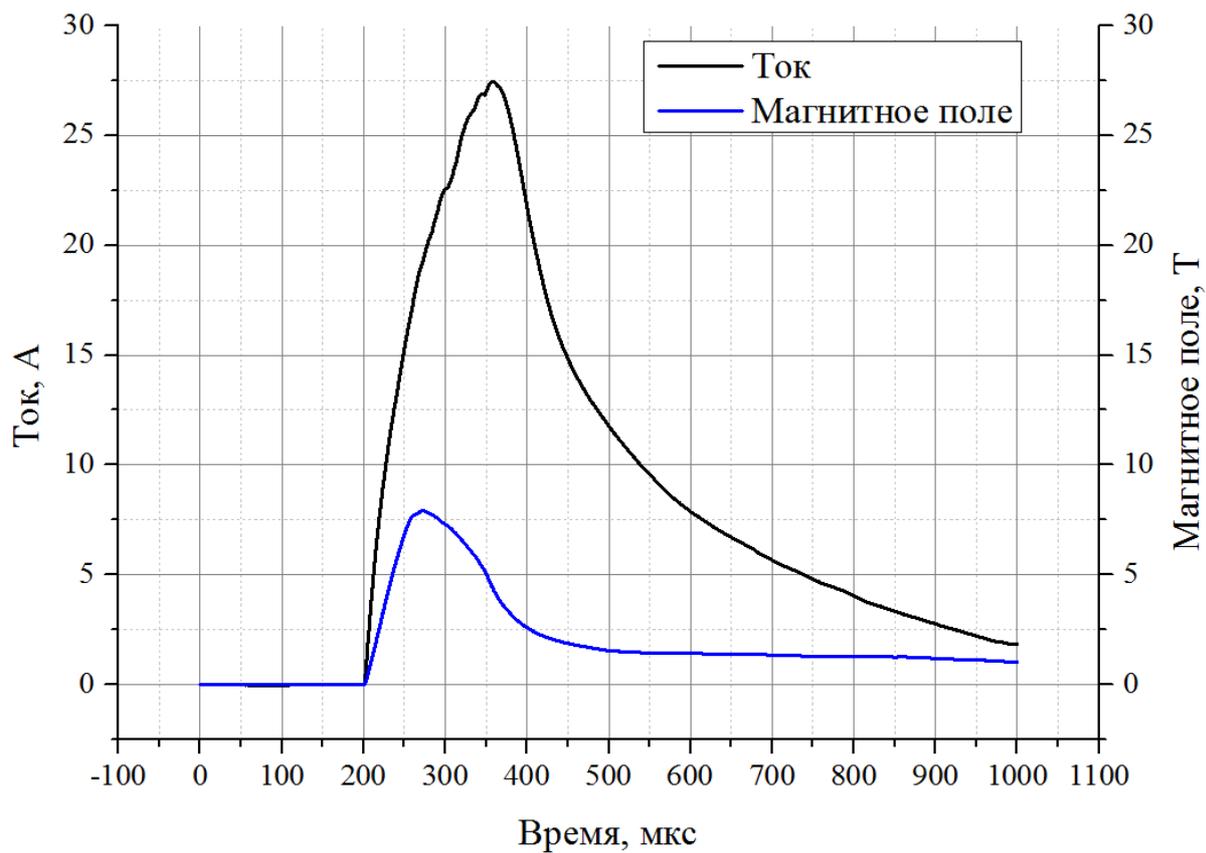


Рисунок 17 Временные зависимости силы тока и магнитной индукции при разряде батареи конденсаторов через соленоид 3.

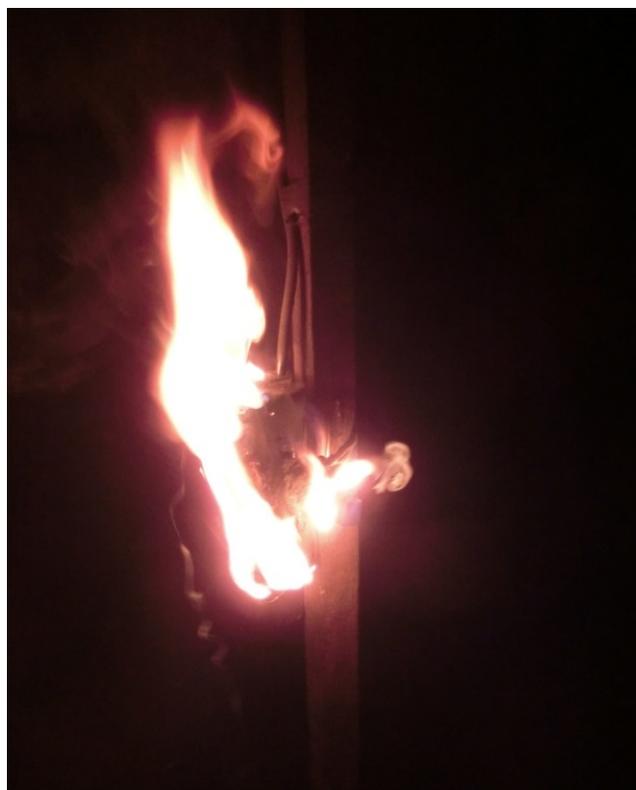


Рисунок 18. Разрушенный соленоид номер 3. Последствия большого тока прошедшего через соленоид.

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОЛЕНОИДОВ

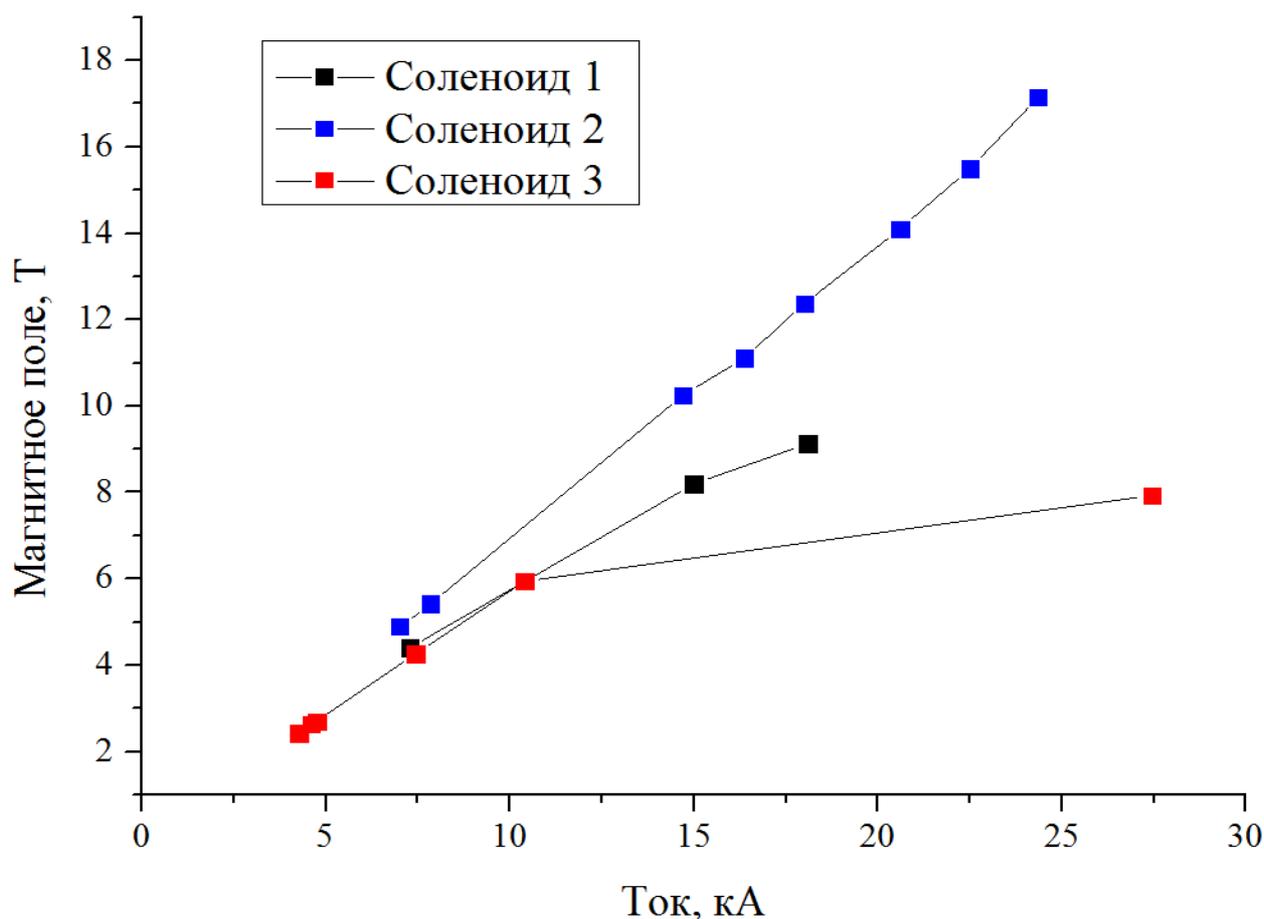


Рисунок 19. Зависимости максимальных полученных значений магнитного поля от силы тока при различных начальных напряжения зарядки конденсаторной батареи

Полученные значения тока и магнитного поля говорят нам о том, что армирование дает возможность получать большие значения тока и магнитной индукции нежели обычный соленоид. Но всегда необходимо учитывать, что при больших токах существует вероятность возгорания частей соленоида не рассчитанных на большие температуры. Таким образом кроме механического разрушения, для получения импульсных магнитных полей, необходимо учитывать и термические разрушения при подборе необходимых компонентов для создания соленоида.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Определена постоянная пояса Роговского, чувствительность  $5,3 \cdot 10^7$  А/(В с).
2. Изготовлен и прокалиброван индуктивный датчик для измерения магнитной индукции, получена чувствительность  $2,2 \cdot 10^4$  Т/(В с)
2. Измерены временные зависимости магнитной индукции и силы электрического тока при разряде батареи конденсаторов через однослойный соленоид.
3. Показано, что армирование однослойного соленоида стеклолентой с эпоксидным компаундом приводит к увеличению генерируемых полей. Максимальное магнитное поле полученное в экспериментах составило 17 тесла.
4. Показано, что разрушение соленоидов происходит из-за пробоя межвитковой изоляции, из-за радиальных и осевых деформаций, а также и из-за джоулева нагрева соленоида.