

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Кинзин Кирилл Сергеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Исследование нагрева проводников импульсным током

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18303

Научный руководитель:

К.ф-м.н. А. Г. Анисимов

Оценка научного руководителя

«_____»_____20__г.

Преподаватель практикума:

К.ф-м.н. А. А. Симонов

Оценка преподавателя практикума

«_____»_____20__г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

«_____»_____20__г.

Новосибирск, 2019.

Аннотация

Целью работы является исследование нагрева медного проводника электрическим импульсным током, вплоть до его взрыва. Определение величины тока, необходимого для взрыва, рассчитывалось с помощью интеграла тока. Было исследовано влияние импульсного тока на сопротивление проводника, получена зависимость сопротивления от времени пропускания тока, а также получен ответ на вопрос о влиянии геометрии проводника с фиксированной площадью рабочего сечения на однородность проходящего через него тока. Было получено значение длительности взрыва при данных условиях. Исследования были проведены для плоской медной фольги, медной проволочки и медной фольги, свернутой в цилиндр, при условии, что все проводники плотно зажаты диэлектриком.

Оглавление

1 Введение.....	3
2 Теоретическая часть.....	4
2.1 Электрический взрыв проводника	4
2.2 Интеграл тока	5
3. Экспериментальная часть.....	6
3.1 Схема и установка эксперимента	6
3.2 Результаты эксперимента и обсуждение	7
3.3 Переменное сопротивление	9
4 Выводы.....	11
5 Литература	11

1 Введение

В курсовой работе исследуется воздействие нагрева импульсного тока на проводники, получаемого при разряде высоковольтной конденсаторной батареи. Параметры токового импульса и размеры проводника подбирались из условия нагрева проводника до температуры испарения. Основной задачей работы является исследование условий взрыва проводника и влияния импульсного тока на проводник. Обязательным условием проведения экспериментов являлось плотное зажатие проводника диэлектриками, что мешало развитию неустойчивости.

Явление взрыва имеет широкий спектр применения в промышленности, а само явление исследовано достаточно глубоко, но в основном для проволочек. Взрыв проводника может использоваться для создания переключателей тока, получения ударных волн, например для дробления валунов или пресс штамповки, сварки взрывом и для создания субмикронных порошков. В этих задачах очень важны подсчёт теплоты, выделяемой в проводнике и определение момента взрыва проводников.

В работе было исследовано влияние геометрии проводника с фиксированной рабочей площадью на однородность проходящего через него тока, определено влияние нагрева на сопротивление проводника в данных условиях, а также получена зависимость сопротивления проводника от времени нагрева импульсным током.

2 Теоретическая часть

2.1 Электрический взрыв проводника

Электрический взрыв проводника-это резкое изменение физического состояния металла в результате интенсивного выделения в нём энергии при пропускании импульсного тока большой плотности ($j \geq 10^6$ А/см²), приводящее к нарушению металлической электропроводимости и сопровождающееся генерацией ударных волн и электромагнитного излучения.

В работе при нагреве проводника наблюдались такие фазовые переходы как плавление и испарение проводника. Механизмы взрыва проводника зависят от условий их проведения. Поэтому электрический взрыв имеет свою классификацию.

В зависимости от величины и скорости подведенной энергии может наблюдаться:

- 1) Плавление. Подводимая энергия не достигает уровня, требуемого для полного испарения проводника. В таком случае проводник не испаряется, а лишь распадается на капли или просто перегорает.
- 2) Медленный взрыв. Время, необходимое для испарения проводника, велико по сравнению с временем развития неустойчивостей в расплавленной проволочке. То есть взрыв происходит достаточно медленно, так что физические искажения оказывают значительное влияние на характер его протекания.
- 3) Быстрый взрыв. Время испарения мало по сравнению с временем развития неустойчивостей. Он происходит так быстро, что значительные изменения формы не успеют проявиться.

4) Взрывная абляция. Развитие взрыва определяется испарением проводника лишь в тонком поверхностном слое, тогда как центр остаётся непрогретым. Процесс развития взрыв управляется «скин-эффектом».

2.2 Интеграл тока

Возрастание плотности внутренней (тепловой) энергии Q в проводнике, по которому протекает ток плотностью j , описывается уравнением:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{j^2}{\sigma} + \lambda \Delta \theta \quad (1)$$

λ -удельная теплопроводность, σ -электропроводность, θ -температура проводника, обычно в градусах Цельсия. Первый член правой части этого уравнения описывает источник тепла; второй член характеризует вклад теплопроводности в процесс изменения внутренней энергии проводника. Как сказано в [1], в данной задаче можно пренебречь вторым членом. В задачах диффузии магнитного поля теплопроводность играет ограниченную роль, толщина электрического скин-слоя в десять раз больше, чем толщина термического скин-слоя.

Тогда: $\frac{dQ}{dt} = \frac{j^2}{\sigma}. \quad (2)$

Интегралом тока называют интеграл $J = \int_0^t j^2 dt$. Проинтегрировав равенство, получаем: $\int_0^t j^2 dt = \int_{Q_0}^{Q_f} \sigma dQ$. Это выражение показывает, что J зависит только от свойств проводника и начальной и конечно плотностей энергии.

3. Экспериментальная часть

3.1 Схема и установка эксперимента

При исследовании условий взрыва проводника была использована схема, представленная на рисунке 1.

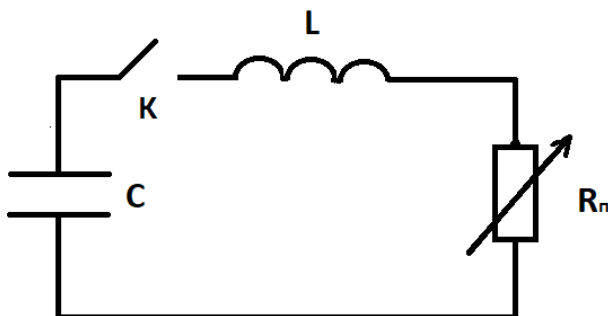


Рисунок 1. Схема установки для эксперимента. С-ёмкость конденсаторной батареи, К-ключ, L-индуктивность, конденсаторной батареи, проводов и осциллографа, R_n -переменное сопротивление исследуемого проводника.

Измерения тока проводились с помощью индуктивного датчика, подключённого к цифровому осциллографу «Tektronix». Перед проведением измерений, датчик был тарирован с помощью катушки Гельмгольца. Датчик был помещен между двумя одинаковыми витками, на

расстоянии, равном их радиусу. При пропускании тока через витки, в точке с датчиком создавалось электромагнитное поле, вызвавшее ЭДС индукции в датчике индуктивности. Сопоставив расчетные ЭДС и напряжения на датчике, проведена тарировка и был получен коэффициент $G=934,3 \text{ A}/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Для создания импульсного разряда использовалась высоковольтная конденсаторная батарея ёмкостью $C=80 \text{ мкФ}$ и напряжением до $U=5 \text{ кВ}$.



Рисунок 2. Экспериментальная установка с конденсаторными батареями, установленным индуктивным датчиком внутри полосковой линии.

Индуктивность в цепи составляет $L=80 \text{ нГн}$. Соединение с рабочим проводником осуществлялось с помощью мало-индуктивной полосковой линией. В качестве разрядника использовался воздушный промежуток, в котором организовывался пробой при помощи высоковольтного импульса.

На рисунке 2 изображена фотография экспериментальной установки.

3.2 Результаты эксперимента и обсуждение

Обработка экспериментальных данных проходила по одному алгоритму для всех исследуемых проводников. На примере медной фольги, свёрнутой в цилиндр, рассмотрим процесс обработки.

Индуктивные датчики дают зависимость напряжения от времени, приведённую на рисунке 3. Умножив напряжения на коэффициент G , получается производная тока от времени. Интегрирование получившейся функции напряжения, умноженной на G , приводит к зависимости $I(t)$, указанной на рисунке 4. После этого находится интеграл тока $\int j^2 dt$, в предположении, что при данных условиях плотность тока однородная, поэтому $j=I/S$, где $S=36 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$, рисунок 5. Далее на графике напряжения индуктивного датчика определить точки скачков производной. Во всех экспериментах со взрывом повторяется наличие двух скачков производных. Первый скачок соответствует началу плавления проводника, второй скачок – началу испарения и взрыва. На всех предоставленных графиках данные точки отмечены цифрами 1 и 2.

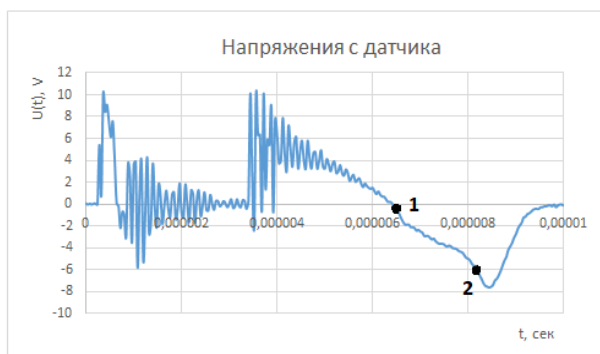


Рисунок 3. График зависимости напряжения на индуктивном датчике от времени для фольги, свёрнутой в цилиндр.

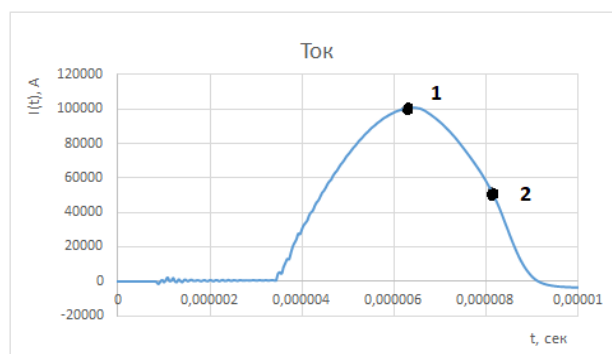


Рисунок 4. График зависимости тока, проходящего через фольгу, свёрнутую в цилиндр, от времени.

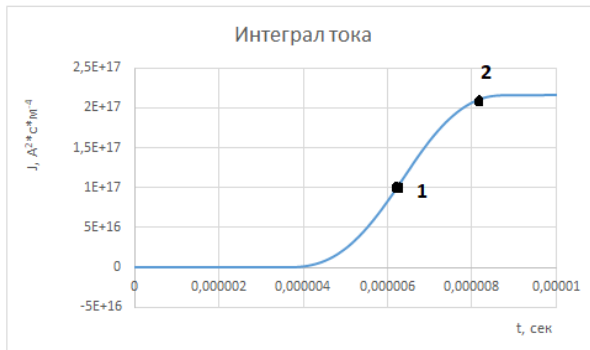


Рисунок 5. График зависимости интеграла тока от времени.

Геометрия проводника	$J, A^2 \cdot c \cdot m^{-4}$
Проволочка	$1,97 \cdot 10^{17}$
Тонкая фольга 7мм*50мкрн	$2,23 \cdot 10^{17}$
Тонкая фольга 12мм*30мкрн	$2,13 \cdot 10^{17}$
Фольга, свёрнутая в цилиндр	$2,03 \cdot 10^{17}$

Таблица 1. Расчётные значения интеграла тока для медных проводников разных геометрий. Площадь сечения проводников: $36 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$.

проводников, протекающий в них ток однороден и взрыв происходит при одном и том же значении интеграла тока. Указанные в таблице 1 результаты совпадают с теоретическими данными, приведенными в [1].

Определить, произошёл ли взрыв в ходе эксперимента, можно по нескольким признакам, не требующих специальных процедур. Благодаря этим признакам можно подтвердить данные, полученные из измерения тока.

Первый и самый очевидный признак: это характерный звук. При взрыве издаётся мощный хлопок, который трудно спутать с простым разрывом проводника. Громкий, чёткий, пугающий звук.

Вторым признаком взрыва является разлёт образца после пропускания через него импульсного тока. При взрыве, на месте фольги остаётся только чёрное пятно. Хороший пример успешно проведенного взрыва указан на рисунке 6.

В этих точках происходят скачки сопротивления проводника. В работе исследовались условия взрыва для медных проводников с одинаковой площадью рабочих сечений $S = 36 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$, но разных геометрий. В таблице 1 представлены экспериментальные значения интеграла тока, при которых происходит взрыв проводника.

Погрешность расчёта интеграла тока составила 10%. В пределах погрешности полученные значения равны $2 \cdot 10^{17} \pm 0,2 \cdot 10^{17} \text{ А}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$. Следовательно, можно сделать вывод, что при данных геометриях

В некоторых случаях, проводник может просто расплавиться, без дальнейшего взрыва. Пример расплавленного проводника приведен на рисунке 7.

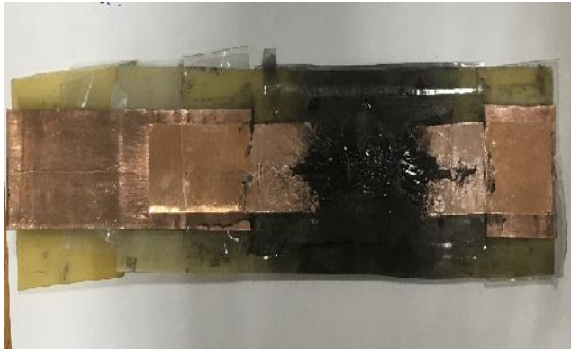


Рисунок 6. Образец взорвавшегося проводника.



Рисунок 7. Образец расплавившегося проводника.



Рисунок 8. Целый образец перед проведением эксперимента.

3.3 Переменное сопротивление

Отдельного обсуждения требует получение ответа на вопрос: как изменяется сопротивление при данных условиях нагрева проводника? По этому изменению можно определить длительность взрыва. Для того чтобы решить поставленную задачу, напомним для схемы, изображенной на рисунке 1, второй закон Кирхгофа:

$$\left(\frac{1}{C}\right) * \int Idt + L * \frac{dI}{dt} + R(t)I(t) = 0 .$$

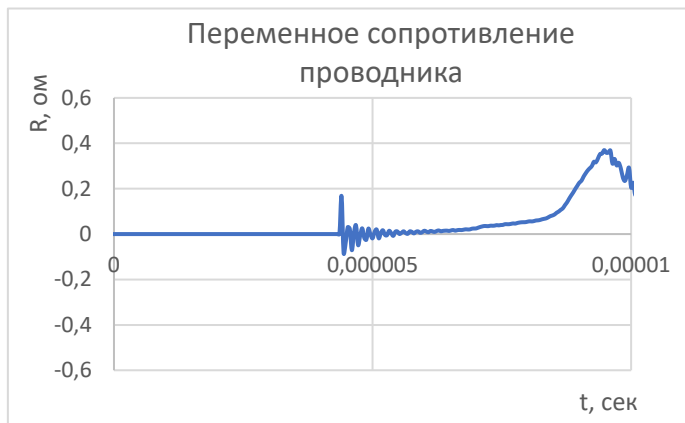


Рисунок 8. График зависимости сопротивления от времени для медной фольги, свёрнутой в цилиндр.

Используя это получаем:

$$\frac{1}{C} * (q_0 - \int I dt) + L * \frac{dI}{dt} + R(t)I(t) = 0.$$

$$R(t) = \frac{-1}{C * I(t)} * (q_0 - \int I dt) - L * \frac{dI}{dt} - \text{искомая теоретическая зависимость.}$$

$C=80\text{мкФ}$ -ёмкость конденсатора, $L=80\text{ нГн}$ -индуктивность в цепи, $R(t)$ - искомая зависимость сопротивления от времени, $I(t)$ -ток, проходящий в цепи.

Учтём, что $\int I dt = q(t)$. Из условия разрядки конденсатора: $\frac{1}{C} q(t) = \frac{1}{C} * (q_0 - \int I dt)$.

На графике 4 изображена получившаяся зависимость сопротивления от времени на примере фольги, свёрнутой в цилиндр. На этом графике видно, что при достижении времени плавления проводника, сопротивление начинает возрастать. При времени, характерном для начала испарения и взрыва фольги происходит скачок сопротивления. Таким образом сопротивление проводника при плавлении увеличивается на 30%, а при взрыве увеличивается в 10 раз. Взрыв происходит за 0,5 мкрс, это видно из характерного роста сопротивления.

4 Выводы

- 1) Медные проводники взрываются при значении интеграла тока, равном $2 \cdot 10^{17} \text{ А}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$, а плавление проводника при значении $1 \cdot 10^{17} \text{ А}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}$.
- 2) В приведённых исследованиях, при данных условиях эксперимента, разницы влияния формы проводника на электрический взрыв не обнаружено, что свидетельствует об однородной плотности тока и отсутствии скиннирования.
- 3) Проведена оценка сопротивления взрывающегося проводника. При взрыве проводника его сопротивление увеличивается в 10 раз, при плавлении увеличивается на 30%. А процесс взрыва составляет примерно 0,5 мкрс.

5 Литература

- 1) Г. Кнопфель. Сверхсильные импульсные магнитные поля. Издательство «Мир», Москва, 1972.
- 2) В. Чейс и Г.Мур. Взрывающиеся проволоочки. Под редакцией А.А. Рухадзе. Издательство иностранной литературы, Москва, 1963.
- 3) В. Чейс и Г.Мур. Электрический взрыв проводников. Под редакцией А.А. Рухадзе и И.С. Шпигеля. Издательство «Мир», Москва, 1965.
- 4) В.А. Бурцев, Н.В. Калинин, А.В. Лучинский. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. Москва, Энергоатомиздат, 1990.