

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Пришляк Елизавета Егоровна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Применение пояса Роговского для измерения импульсного тока с
интегрированием на внутренней индуктивности**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19312

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. И. А. Иванов
Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

аспирант А. С. Матвеев
Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к. т. н. В. Т. Астрелин
Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Данная курсовая работа посвящена изучению способа измерения импульсного тока с помощью пояса Роговского в режиме интегрирования на собственной индуктивности. В работе использовался пояс Роговского с ферритовым сердечником и количеством витков $N = 100$.

В ходе ее выполнения были определены внутренние параметра пояса и рассчитаны диапазоны характерных частот для наилучшей работы пояса. По результатам измерений найден коэффициент передачи по току, который совпал с расчетным.

Оглавление

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть.....	4
3. Оценка параметров эквивалентной схемы	6
4. Экспериментальная часть и установка	8
5. Результаты.....	9
6. Выводы	11
7. Библиографический список	11

1. Введение

Когда измерительный прибор невозможно напрямую включить в сеть, для регистрации характеристик импульсного тока используется пояс Роговского. Он представляет собой длинный соленоид, охватывающий проводник с исследуемым током [1]. В пространстве вокруг проводника с движущимися зарядами создается переменное магнитное поле. За счет него в поясе Роговского возникает электродвижущая сила, пропорциональная изменению тока $\varepsilon(t) \propto dI/dt$, откуда с помощью интегрирования можно найти значения тока.

Целью данной работы является восстановление исследуемого импульсного сигнала тока с помощью пояса Роговского. Совместно с измерительной цепью пояс работает в режиме трансформации тока. В данной работе были определены собственные параметры пояса: емкость, индуктивность, активное сопротивление, необходимые для расчета рабочего диапазона частот исследуемого тока. Были зарегистрированы осциллограммы снимаемых сигналов и найден коэффициент передачи по току. Результат сравнили с расчетным.

2. Теоретическая часть

Основным элементом пояса Роговского является катушка индуктивности, в которой возникает электродвижущая сила при изменении магнитного потока через нее. Как отдельный компонент цепи, катушка сама по себе имеет характеристику, называемую индуктивностью и представляет собой соленоид длины l , намотанный на сердечник диаметра d и с числом витков N [2]. Из этих параметров при $d \ll l$ индуктивность определяется формулой:

$$L = \frac{\mu\mu_0\pi^2 N^2 d^2}{l}$$

Пояс Роговского представляет собой тороидальную катушку с ферритовым сердечником (рис. 1). Пусть пояс охватывает измеряемый ток I_1 . Этот ток создает вокруг соответствующее переменное магнитное поле. Электродвижущая сила $\varepsilon(t)$, возникающая в катушке пояса Роговского, определяется следующим соотношением:

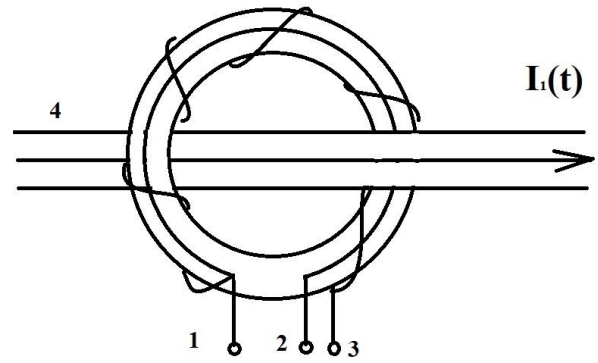


Рисунок 1 Схема пояса Роговского: 1, 2 – обратный виток; 1, 3 – равномерная обмотка соленоида; 4 – проводник с током I_1

$$\varepsilon(t) = -M \frac{\partial I_1(t)}{\partial t}, \quad (1)$$

где M – коэффициент взаимной индукции. Если подать на проводник прямоугольный импульс тока с короткими фронтами, то после каждого фронта в поясе возникают затухающие колебания. В отсутствие дополнительной емкости C_1 их собственная частота равна:

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi C_0 L_0}}. \quad (2)$$

Здесь C_0 и L_0 – собственные емкость и индуктивность пояса соответственно. Величина f_0 определяется из осциллограммы. Собственную емкость можно найти из соотношения:

$$\frac{f_0^2}{f_1^2} = \frac{C_0 + C_1}{C_0}, \quad (3)$$

где C_1 – известная дополнительная емкость, подключенная параллельно выходу пояса, f_1 – новая частота колебаний для пояса с дополнительной емкостью.

Собственная индуктивность определяется выражением:

$$L_0 = \frac{1}{2\pi f_0^2 C_0} \quad (4)$$

В режиме интегрирования тока на собственной индуктивности подключается активное сопротивление R_n (рис. 2). Для проведения измерений нужно обеспечить правильную работу пояса, при которой он сможет правильно регистрировать значения импульсных токов. Поэтому необходимо оценить рабочий диапазон длительности импульсов тока.

3. Оценка параметров эквивалентной схемы

В действительности, ни один элемент цепи не может быть идеальным. Катушка индуктивности, обмотка которой состоит из провода, имеет некоторое сопротивление, зависящее от параметров этого провода, и межвитковую емкость. Конденсатор, состоящий из проводников, по которым протекает ток и создает магнитное поле, обладает индуктивностью. В случаях, когда иными сопротивлениями элемента пренебречь нельзя ввиду их величины, прибегают к замене этого элемента эквивалентной цепью с несколькими идеализированными элементами. Зачастую эти цепи состоят из комбинаций элементов емкости, индуктивности и резисторов, хотя даже в этом случае перечисленные выше факторы могут вносить погрешности.

Рассмотрим эквивалентную схему для измерения тока с интегрированием на собственной индуктивности (рис. 2). После подключения активного нагрузочного сопротивления R_H , с него снимается напряжение, образующееся из-за протекания тока. Необходимо найти условия, при которых сигнал на R_H был бы пропорционален току I_1 .

Если емкость C_0 мала, тогда на характерных частотах ω сигнала I_1 емкостное сопротивление в цепи станет настолько велико, что будет слабо влиять на амплитуду сигнала на R_H :

$$R_H + r \ll \frac{1}{\omega C_0} \quad (5)$$

В таком случае емкостью C_0 можно пренебречь. Согласно закону Кирхгофа для тока I_2 в цепи и исследуемого импульса тока I_1 :

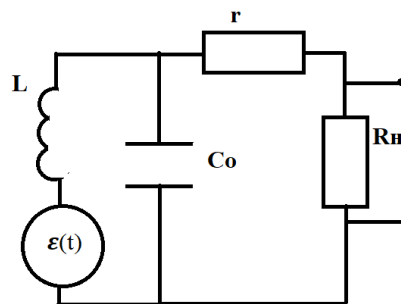


Рисунок 2. Схема для измерения тока с интегрированием на собственной индуктивности. $\varepsilon(t)$ – наведенная э. д. с. индукции в поясе; L – индуктивность пояса; C_0 – собственная емкость в поясе; r – активное сопротивление; R_H – активное внешнее нагрузочное сопротивление

$$\varepsilon(t) = L \frac{dI_2}{dt} + (R_H + r) \cdot I_2 = -M \frac{dI_1}{dt}, \quad (6)$$

Общим решением этого уравнения будет:

$$I_2(t) = \frac{1}{L} e^{-\frac{t}{\tau}} \int_0^t e^{\frac{\xi}{\tau}} \varepsilon(\xi) d\xi,$$

где $\tau = L/(R_H + r)$ – характерная постоянная времени интегрирования LR -цепочки; ξ – переменная интегрирования. Пусть характерное время изменения тока $\tau_H \ll \tau$. Полагая $\tau_H \approx 1/\omega$ в (5), можно получить случай малой активной нагрузки по сравнению с емкостной. После пренебрежения вторым слагаемым в уравнении (6), проинтегрируем его:

$$I_2(t) = \frac{I_1(t)}{N}. \quad (7)$$

Получили, что $1/N$ – коэффициент трансформации тока с одним витком для первичной обмотки. В таком случае напряжение на нагрузке в эквивалентной схеме:

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_H \cdot I_1}{N}$$

Как было сказано выше, для правильной работы пояса следует оценить диапазон для τ_H и подобрать необходимые C_0 и L . Пусть так же $\tau_H \approx 1/\omega$ в (5), и аналогично для случая $R_H + r \ll \omega L$, тогда:

$$C_0(R_H + r) \ll \tau_H \ll \frac{L}{R_H + r} \quad (8)$$

Откуда можно получить оценку для частотного диапазона:

$$\frac{R_H + r}{L} \ll f_H \ll \frac{1}{C_0(R_H + r)} \quad (9)$$

Примечательно, что требование малости R_H и C_0 сильно расширяет частотный диапазон. Однако совсем этими параметрами пренебрегать нельзя, т.к. индуктивность L и емкость C_0 пояса образуют колебательный контур с затуханием на собствен-

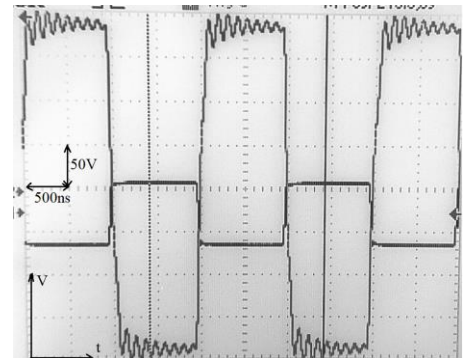


Рисунок 3. Пример графика с затухающими колебаниями.

ном сопротивления. Именно эти затухающие колебания мы наблюдаем на экране после каждого фронта прямоугольного сигнала (рис. 3).

4. Экспериментальная часть и установка

В данной работе используется оборудование:

- Генератор сигналов функциональный АКТАКОМ ADG-1005;
- Цифровой осциллограф Tectronix 2024В и коаксиальный кабель (Удельная емкость кабеля – 100 пФ/м, входная емкость осциллографа — 20 пФ);
- Пояс Роговского.

Схема рабочей установки приведена на рис. 4.

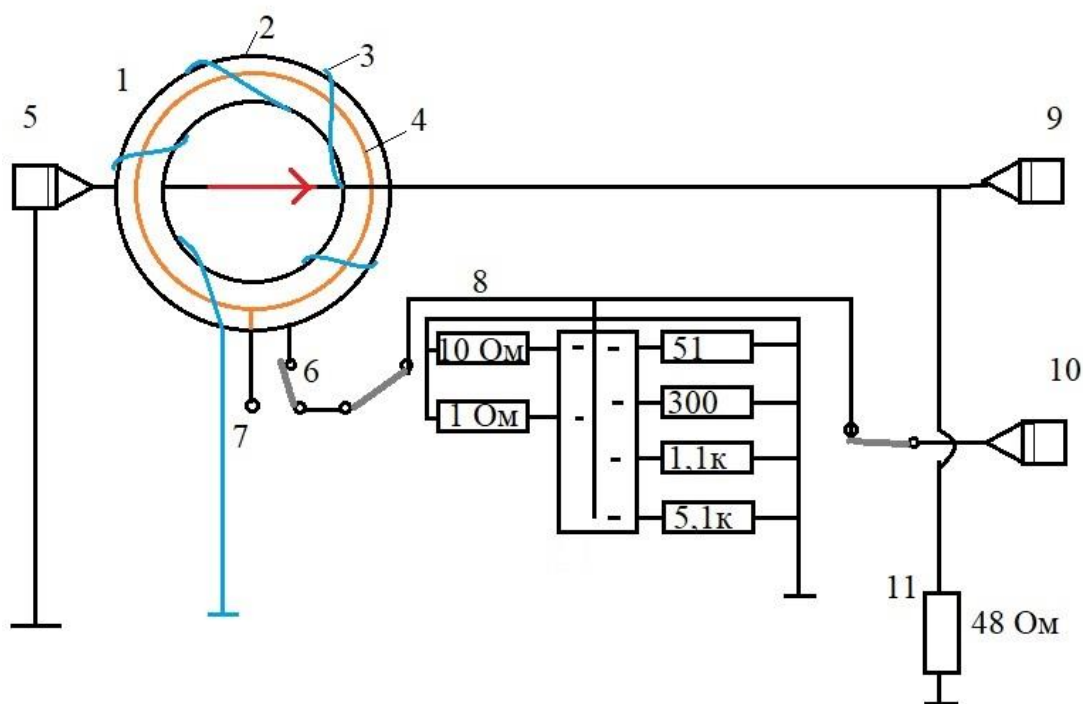


Рисунок 4. Схема установки: 1 – пояс Роговского; 2 – каркас катушки; 3 – основная катушка; 4 – обратный виток; 5 – вход импульсов тока с генератора; 6 – подключение без витка; 7 – подключение с обратным витком; 8 – схема интегрирования на собственной индуктивности; 9 – выход сигнала исходного импульса тока с нагрузки; 10 – выход исследуемого сигнала; 11 – нагрузка импульсного тока

Генератор сигналов создает импульсы тока в проводнике. Измерительный трансформатор чувствителен к этим сигналам, и наводимая в нем электродвижущая сила пропорциональна изменению тока в проводнике. В данной работе измерение наводимой э. д. с. $\varepsilon(t)$ производится с помощью осциллографа, к которому подключается сам пояс Роговского через измерительный коаксиальный кабель. После подачи прямоугольного импульса на проводник возникающие в поясе затухающие колебания можно наблюдать на экране осциллографа. При подключенной дополнительной емкости C_1 из осциллограмм определены частоты f_0 и f_1 . Далее с помощью формулы (3) найдены собственная емкость C_0 и собственная индуктивность L_0 из (4)

F_0 , кГц	f_1 , кГц	C_1 , пФ	C_0 , пФ	L_0 , Гн
74	36	430	133,9	0,035

Таблица 1. Значения собственных параметров цепи

Активное сопротивление пояса $r = 0,5$ Ом.

5. Результаты

Теперь, когда все собственные параметры пояса найдены, можно оценить, в каком диапазоне характерных времен τ_n пояс Роговского правильно регистрирует импульсы тока для конкретных параметров. Подключим к выходу пояса нагрузочное сопротивление, которое можно изменить с помощью многопозиционного переключателя. Согласно (8) для τ_n :

R_n , кОм	нижний предел, пс	верхний предел, кс
1	133,9670	0,035

Таблица 2. Диапазон характерных времен

Тогда из (9) диапазон характерных частот составит:

R_n , кОм	Нижний предел, кГц	Верхний предел, МГц
1	28,58	7,46

Таблица 3. Диапазон характерных частот

Коэффициент передачи по току составил $1/N = 0,01$, что соответствует количеству витков $N = 100$.

При достаточно малых сопротивлениях частотный диапазон для импульса, как было замечено в теоретической части, расширяется. Это дает возможность получать хороший сигнал при большем наборе частот. При увеличении сопротивления на несколько порядков этот диапазон значительно уже и смещен при этом вниз. При $f_r = 100$ кГц и $R = 1$ кОм был получен сигнал (рис. 5), на котором хорошо видны импульсы напряжений с контуров.

Рассчитаем токи:
 $I_1 = U_1/R \approx 0,9$ А; $I_2 = U_2/R_n = 0,01$ А. Из выражения (7) коэффициент передачи по току, равный отношению токов, составил $1/N \approx 0,011$. Значение близко к полученному ранее, т. е. полученные формулы справедливы для предложенного случая.

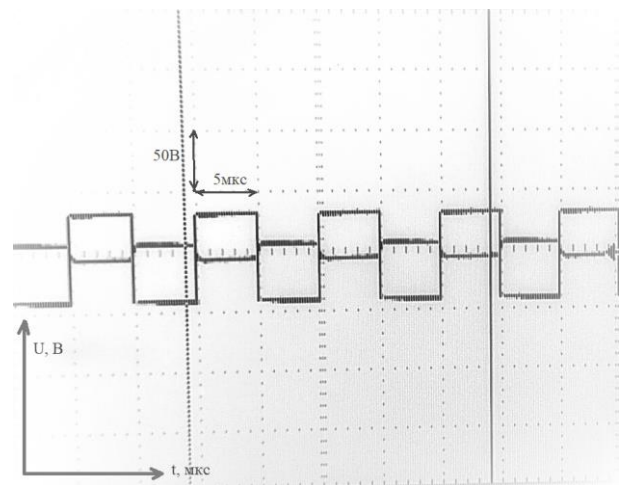


Рисунок 5. Пример оциллограммы при $R = 1$ кОм и частоте генератора равной 100 кГц

6. Выводы

В ходе выполнения работы:

1. вычислены собственные параметры пояса;
2. получены и проанализированы осциллограммы импульсов тока в пределах рассчитанного диапазона;
3. получены значения токов: $I_1 = 0,9$ А, $I_2 = 0,01$ А; и коэффициент передачи по току: $1/N \approx 0,01$.

7. Список литературы

1. Батыгин Ю.В., Сериков Г. С., Чаплыгин Е. А.; Численная обработка результатов измерения импульсных токов поясом Роговского: Текст научной статьи по специальности «Электротехника, электронная техника, информационные технологии», 2009. С. 1-5.
2. Сивухин Д.В., Общий курс физики. М.: Наука, 1977. Т. 3. Электричество. 704 с.
3. Князев Б.А., Костюрина А.Г., Лаборатория электричества и магнетизма. Введение в практикум. Новосибирск: НГУ, 2005. С. 1-18
4. Лаборатория Электричества и Магнетизма НГУ: [сайт]. URL: <https://elmag.nsu.ru>. Последняя дата обращения: 11.12.2020.