

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Чистяков Данил Эдуардович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Сравнение форм импульсного тока, измеренных разными поясами
Роговского**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19314

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. И. И. Морозов

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Д. Н. Капуста

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Цель работы заключалась в сравнении и анализе форм импульсного тока, зарегистрированного с использованием двух различных поясов Роговского. В ходе данной работы были найдены условия восстановления формы исходного импульсного тока при интегрировании на собственной индуктивности, а также проведен расчет параметров для каждого из поясов Роговского. Расчетные амплитуды импульсов тока в режиме трансформации находятся в хорошем согласии с экспериментально полученными значениями. Выводы этой работы могут быть использованы для создания подходящего под узкие нужды пояса Роговского, который позволит корректно определять форму и другие характеристики импульсного сигнала.

Ключевые слова: пояс Роговского, импульсный ток, интегрирование на собственной индуктивности.

Оглавление

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть.....	5
3. Описание экспериментальной установки.....	8
4. Определение собственных характеристик поясов.....	9
5. Интегрирование сигнала на собственной индуктивности.....	10
6. Заключение.....	12
Список литературы.....	13

1. Введение

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. Для измерения таких токов используется пояс Роговского.

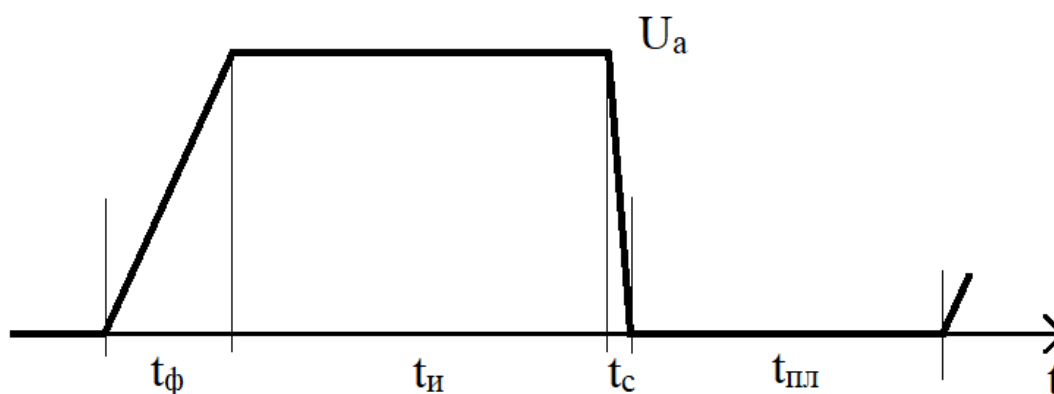


Рис. 1. Общий вид импульсного сигнала

У импульсного сигнала есть несколько характеристик (см. рис. 1): форма импульса, его амплитуда (U_a), фронт – время нарастания (t_f), длительность импульса ($t_{и}$), длительность спада (t_c) и длительность его плоской части ($t_{плл}$).

Для получения каждой из этих характеристик нужен свой пояс Роговского, уже с его определенными характеристиками. Кроме того, он должен правильно ее измерять. Например, для более точного измерения амплитуды сигнала, нужно подобрать пояс с меньшей постоянной затухания, а для установления формы – наоборот.

Преимущества использования пояса Роговского: возможность измерения широкого диапазона токов, компактность самого пояса, безопасность для оборудования и человека, легкость установки.

Недостатки: выходной сигнал получается низковольтным, пояс Роговского – частотно-зависимое устройство, фиксирование посторонних сигналов из-за наводок.

Цель: изучение принципа работы пояса Роговского, сравнение форм импульсного тока, измеренных разными поясами, нахождение условий восстановления формы импульсного тока.

Задачи:

- Определить собственные характеристики поясов: емкости, индуктивности, активные сопротивления;
- Проинтегрировать исходный сигнал на собственной индуктивности;
- Произвести анализ полученного результата.

2. Теоретическая часть

Пояс Роговского представляет собой замкнутый соленоид с равномерной намоткой витков. Он размещается так, чтобы охватить измеряемый ток (см. рис. 2).

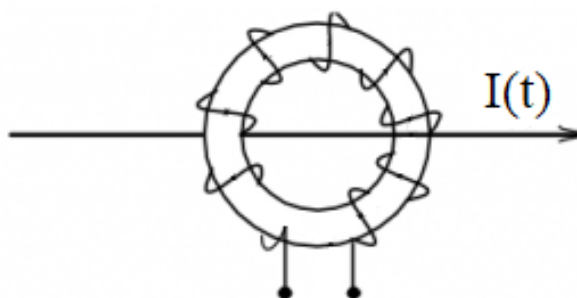


Рис. 2. Общий вид пояса Роговского

Пояс Роговского является импульсным трансформатором, где первичной обмоткой является проводник с исследуемым током, а вторичной – сам пояс.

Трансформатор хорошо передает форму сигнала, если в первичной обмотке течет синусоидальный ток. Когда на вход поступает импульс произвольной формы, задача усложняется. Форма и величина выходного сигнала в таком случае зависит от временных параметров исследуемого импульса, конструкции пояса и подключаемой нагрузки.

Принцип работы пояса Роговского подробно изложен в [1] и заключается в следующем. Вокруг проводника, в котором течет ток I_1 , создается переменное магнитное поле, которое индуцирует ЭДС в соленоиде, формула:

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

где M – коэффициент взаимной индукции, индуктивность соленоида $L = N \cdot M$, N – число витков.

Для получения информации об исходном токе, по измеряемой ЭДС, требуется ее проинтегрировать, например, на собственной индуктивности.

Подключив к поясу нагрузочное сопротивление R_n , эквивалентная схема может быть представлена следующим образом:

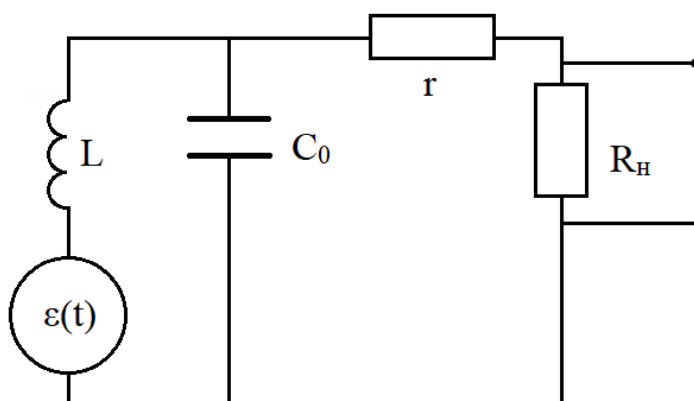


Рис. 3. Схема измерения тока на собственной индуктивности: $\varepsilon(t)$ – наведенная ЭДС, L – индуктивность пояса, C_0 – его емкость, r – активное сопротивление пояса, R_n – активное внешнее нагрузочное сопротивление

Если емкость пояса будет мала, то на характерных частотах ω емкостное сопротивление будет велико, а значит, будет слабо влиять на амплитуду снимаемого с R_n сигнала ($R_n + r \ll \frac{1}{\omega C_0}$).

Уравнение Кирхгофа для данной электрической цепи будет иметь следующую форму:

$$\varepsilon(t) = L \frac{dI_2}{dt} + (R_n + r)I_2 = -M \frac{dI_1}{dt}, \quad (2)$$

где I_2 – ток в цепи пояса, I_1 – исследуемый импульс тока.

Общее решение этого дифференциального уравнения:

$$I_2(t) = Le^{-\frac{t}{\tau}} \int_0^t e^{\frac{\xi}{\tau}} \varepsilon(\xi) d\xi, \quad (3)$$

где $\tau = \frac{L}{R_n + r}$ – характерная постоянная времени интегрирования LR цепочки,

ξ – переменная интегрирования.

Пусть длительность импульса тока (характерное время изменения тока) τ_n мала по сравнению с τ , тогда, с учетом оценок $R_n + r \ll \frac{1}{\omega C_0}$, $\tau_n \approx \frac{1}{\omega}$, получено неравенство $C_0(R_n + r) \ll \tau_n$ – это случай малой активной нагрузки по сравнению с индуктивной. Тогда членом $(R_n + r)I_2$ в уравнении (2) можно пренебречь и, проинтегрировав его, записать выражения:

$$I_2(t) = L \int_0^t e^{-\frac{\xi}{\tau}} \varepsilon(\xi) d\xi = -M \cdot I_1(t), \quad (4)$$

$$I_2(t) = \frac{I_1(t)}{N}. \quad (5)$$

Уравнение (5) выполняется при $\tau_n \ll \tau = \frac{L}{R_n + r}$.

При этом пояс работает в режиме трансформации тока, коэффициент трансформации $K = \frac{1}{N} = \frac{I_2}{I_1}$ такой же, как и для трансформатора с обмотками в 1 и $\frac{1}{N}$ витков. Напряжение на нагрузке при этом определяется как:

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_n \cdot I_1}{N}. \quad (6)$$

Таким образом сила тока I_1 по переменному напряжению может быть найдена из уравнения (6) как:

$$I_1 = \frac{R_n \cdot U_{\text{вых}}}{N}. \quad (7)$$

Следовательно, определенный пояс Роговского может правильно регистрировать импульсы тока в некотором диапазоне характерных времен τ_n . Для оценки эти условия были выписаны в виде неравенства:

$$(R_n + r)C_0 \ll \tau_n \ll \frac{L}{R_n + r}. \quad (8)$$

Здесь малая нагрузка R_n с одной стороны дает низкую чувствительность, а с другой – максимально широкий диапазон τ_n .

На рисунке 2 индуктивность и емкость пояса образуют колебательный контур с затуханием на собственном сопротивлении, поэтому при регистрации коротких импульсов на фоне сигнала пропорционального $I_1(t)$ будут наблюдаться собственные затухающие колебания LC_0 контура.

3. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из генератора Актаком ADG-1005, измерительного участка (рис. 4) и осциллографа АКПП-4116/1.

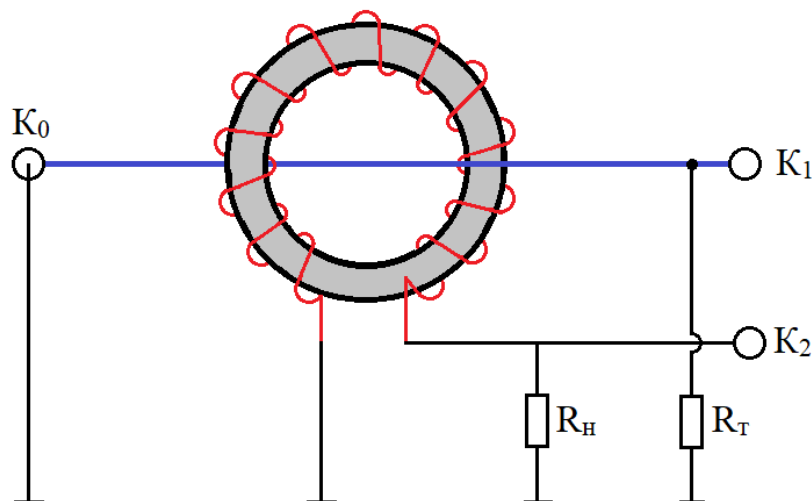


Рис. 4. Схема установки, где K_0 – вход импульсов тока с генератора, K_1 – выход исходного импульсного тока, K_2 – выход исследуемого тока, $R_r = 50$ Ом – нагрузка импульсного тока, $R_n = 10$ Ом – активное внешнее сопротивление пояса

В этой работе используются два разных пояса Роговского, их характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры поясов Роговского

Пояс	А	Б
Внутренний диаметр d , мм	22	70
Внешний диаметр D , мм	42	140
Ширина h , мм	18	50
Число витков N	100	220
Магнитная проницаемость μ	1000	1

4. Определение собственных характеристик поясов

При подаче по центральному проводнику прямоугольного импульса тока с достаточно короткими фронтами после каждого из фронтов возникают свободные затухающие колебания с собственной частотой f_0 , формула:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}, \quad (9)$$

где L и C_0 – собственные индуктивность и емкость.

Если параллельно выходу пояса подключить дополнительную емкость C_1 , то, измерив новую частоту f_1 , можно найти C_0 из соотношения:

$$\frac{f_0^2}{f_1^2} = \frac{C_0 + C_1}{C_0}. \quad (10)$$

По форме огибающей этих затухающих колебаний оценивается постоянная затухания пояса $\tau = \frac{2L}{r}$ и сопротивление пояса r .

Значение собственной индуктивности L можно получить по расчетной формуле:

$$L = \frac{\mu_0\mu}{2\pi} N^2 b \ln\left(\frac{R+a}{a}\right), \quad (11)$$

где $\mu_0 \approx 125 \cdot 10^{-8} \frac{\Gamma H}{M}$ – магнитная проницаемость вакуума, μ – магнитная проницаемость пояса, N – число витков, a – внутренний радиус пояса, $R+a$ – внешний, b – ширина пояса.

Необходимые параметры приведены в таблице 2.

Таблица 2. Измерения для поясов

Пояс	f_0 , кГц	f_1 , кГц	C_1 , нФ	τ , мкс
А	35,86	15,08	3,3	280
Б	636,9	136,2	3,3	30,6

Собственные параметры поясов вычисляются по измеренным величинам: способ 1 – с помощью формул (9), (10) и вычисление r из соотношения $\tau = \frac{2L}{r}$; способ 2 – используя формулу (11), формулу (9) – для нахождения C_0 , а также мультиметр для измерения r . Результаты вычислений приведены в таблице 3.

Таблица 3. Собственные параметры поясов

Пояс	L , мГн		C_0 , нФ		R , Ом	
	1	2	1	2	1	2
А	27,78	23,16	0,71	0,85	198,46	1,6
Б	0,39	0,33	0,16	0,19	25,81	6,5

И собственная индуктивность, и емкость получились довольно близкими по значению, однако, сопротивление, полученное из соотношения, оказалось намного больше измеренного мультиметром, это связано с низкой точностью определения постоянной затухания τ .

5. Интегрирование сигнала на собственной индуктивности

На вход K_0 (см. рис. 3) с генератора поступает прямоугольный сигнал частотой 69 кГц и амплитудой 5 В, для которого характерное время $\tau_n \approx 7,3 \text{ мкс}$.

По данным таблицы 3 была произведена оценка характерных времен τ_n , когда пояса работают правильно, с помощью неравенства (8). Получены условия:

$$9,86нс \ll \tau_n(A) \ll 2мс, \quad (12)$$

$$3нс \ll \tau_n(B) \ll 20мкс. \quad (13)$$

Результаты интегрирования сигнала на собственной индуктивности приведены на рисунке 5.

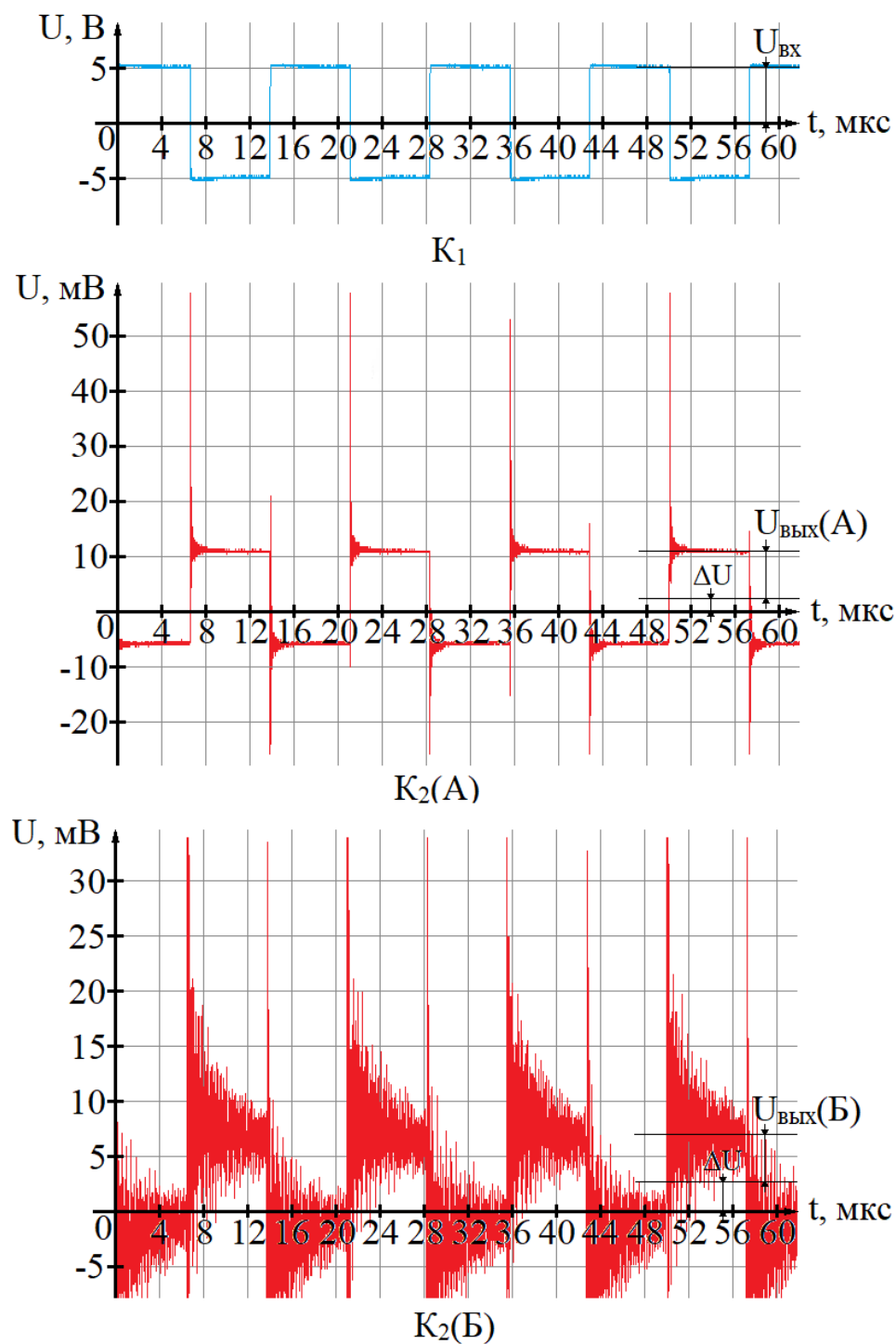


Рис. 5. Результаты интегрирования: K1 – выход исходного импульсного тока, $U_{вх}$ – его амплитуда, K2(A) – выход пояса А, K2(Б) – выход пояса Б, $U_{вых}(A)$ и $U_{вых}(Б)$ – сдвинутая на ΔU амплитуда сигнала соответствующих поясов

По графикам видно, что направления исходного импульса тока и полученного на выходе у поясов не совпадают, это связано с направлением обмотки поясов. Если это учесть, то направление исходного импульса можно определить, отразив график относительно оси времени. Также видно, что сигналы на выходе сдвинуты на какую-то постоянную величину, причем $\Delta U \approx 2,63 мВ$ – одинаковое для этих поясов, значит это связано с работой генератора, так как на графике видно, что сигнал исходного импульса тока тоже поднят. Значения сдвинутых амплитуд получились $U_{\text{вых}}(A) = 8,8 \pm 0,9 мВ$, $U_{\text{вых}}(B) = 4 \pm 2 мВ$. Погрешность была получена из ширины выходного сигнала на концах импульса.

Амплитуда на выходе поясов может быть определена с использованием формулы (6) и соотношения $I_1 = \frac{U_{\text{вх}}}{R_m}$. Получено: $U_{\text{вых}}(A) \approx 10 мВ$, $U_{\text{вых}}(B) \approx 4,5 мВ$, что, с учетом погрешности номинала сопротивлений, соответствует тому, что было получено экспериментально.

Для пояса А было выполнено условие (12), поэтому колебания, возникающие в контуре, быстро затихали. Но для пояса Б характерное время импульса тока $\tau_n \approx 7,3 мкс$ стало сравнимо с правой частью условия (13), из-за этого колебания просто не успевали затухать, когда исходный сигнал уже менялся.

6. Заключение

В ходе работы были разобраны 2 способа нахождения собственных параметров пояса Роговского – экспериментально и по расчетной формуле. Были найдены условия правильной работы поясов, а именно (12) и (13), и разобраны формы импульсного тока на выходах поясов, для одного из которых условие было выполнено, а для другого – нет. Было установлено, что погрешность измерения тока сильно возрастает при невыполнении этих условий.

Полученные амплитудные значения: $U_{\text{вых}}(A) = 8,8 \pm 0,9 мВ$, $U_{\text{вых}}(B) = 4 \pm 2 мВ$ – для поясов А и Б соответственно, при входной амплитуде 5 В.

Список литературы

1. Вячеславов Л. Н., Курочкин В. Л., Рева В. Б., Смирных Л. Н. Электрические цепи (Учебно-методическое пособие) // Новосиб. гос. ун-т., 2008, С. 73 – 86.