

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

Физический факультет
Кафедра общей физики

Лисихина Екатерина Ивановна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Нахождение условий и погрешности восстановления импульсного тока с
помощью пояса Роговского**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа № 19305

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

Целью данной работы является нахождение условий и погрешности восстановления формы импульсного тока с помощью пояса Роговского. Измерения проводились путем интегрирования тока на внешней цепи. В данной работе были найдены параметры представленного пояса Роговского. Определены параметры интегрирующей цепи, при которых существует ненулевой рабочий диапазон частот данного пояса. Были сняты осциллограммы прямоугольного импульса тока для различных частот: внутри и за пределами рабочего диапазона. Проведена оценка погрешности восстановления исследуемого тока.

Ключевые слова: пояс Роговского, восстановление тока, импульсные токи.

Оглавление

Введение	4
1. Описание эксперимента	5
1.1. Описание установки	5
1.2. Методика измерений	6
2. Анализ результатов измерений	7
2.1. Результаты измерений	8
2.1.1. Определение собственных параметров пояса	8
2.1.2. Нахождение рабочего диапазона	9
2.1.3. Подбор длительности импульса	9
2.2. Оценки погрешностей	10
Выводы и заключение	11
Список литературы	11
ПРИЛОЖЕНИЕ	12

Введение

В экспериментальной практике существует необходимость измерения характеристик импульсных токов. В некоторых случаях прямое включение измерительных приборов в электрическую цепь невозможно. Например, при измерении повышенных значений токов, в счётчиках для измерения количества энергии, или в цепях с большим напряжением. Для получения информации о величине и форме импульсного тока по наведенному переменному магнитному полю применяется пояс Роговского.

Пояс Роговского представляет собой длинный замкнутый соленоид с равномерной намоткой витков, один из выводов которой приведён к другому через ось соленоида. Этот соленоид размещается так, чтобы охватывать измеряемый ток (рис. 1).

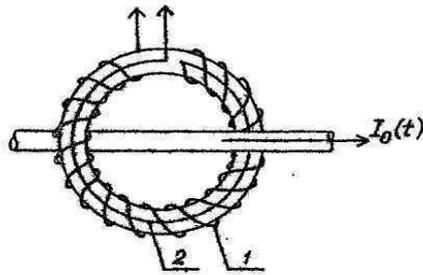


Рис. 1. Схема пояса Роговского, 1 – обмотка соленоида, 2 – обратный виток

Можно также заметить, что данная схема представляет собой трансформатор тока с воздушным сердечником, где первичную обмотку составляет проводник с исследуемым током $I_0(t)$, а вторичную обмотку – сам пояс Роговского. Для уменьшения паразитных емкостей витки должны наматываться в одну сторону равномерно. Чтобы исключить влияние витков, создаваемое катушкой, её конец возвращается к началу вдоль окружностей тороида (выводы обмоток 1 и 2 на рис. 1) [1].

Рассмотрим принцип работы пояса. Ток $I_0(t)$, протекающий в проводнике, создаёт магнитное поле, которое, в свою очередь, создаёт электродвижущую силу (ЭДС) индукции в катушке. Величина ЭДС равна:

$$\varepsilon(t) = -L \frac{\partial I_0(t)}{\partial t}, \quad (1)$$

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

Наводимую в контуре ЭДС, в свою очередь, можно измерить, подключив выводы к осциллографу. А для восстановления тока необходимо проинтегрировать наведенную в поясе Роговского ЭДС (1).

В данной работе интегрирование тока производилось на внешней ёмкости. Целью данной работы является нахождение условий и погрешности восстановления формы импульсного тока с помощью пояса. Для достижения цели необходимо найти параметры цепи, при которых наилучшим образом восстанавливается форма исходного сигнала на выводах пояса Роговского. В ходе работы были сняты осциллограммы форм выходных импульсов и произведена оценка погрешности восстановления значения тока.

1. Описание эксперимента

1.1. Описание установки

На рисунке 2 изображена принципиальная схема включения пояса Роговского в режиме интегрирования на внешней ёмкости. В качестве нагрузки используется RC – цепочка [2].

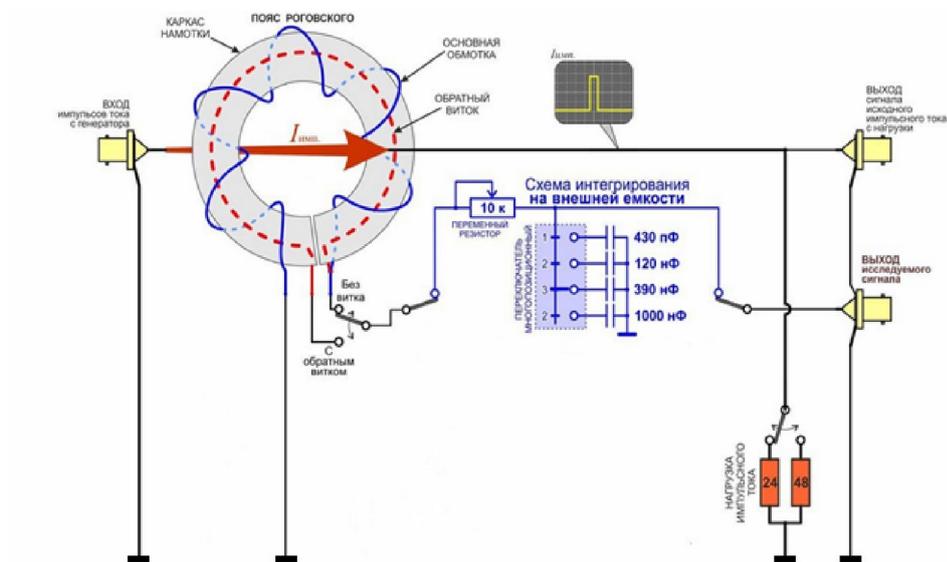


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема установки для измерения параметров импульсного тока с помощью пояса Роговского

Для создания импульсов тока в схеме установлен генератор прямоугольных импульсов, выход которого согласован на нагрузку 48 Ом. От генератора на проводник, проходящий по оси пояса, подается прямоугольный импульс. Этот проводник нагружен на сопротивление 48 Ом, к которому подключается один из входов осциллографа для наблюдения за параметрами импульса генератора. Сигнал с ёмкостной нагрузки подается на второй вход осциллографа. Сопротивление проводов r мало и им можно пренебречь в расчётах.

1.2. Методика измерений

Схема включения пояса Роговского изображена на рисунке 3. В работе используется метод интегрирования на внешней ёмкости, так как сигнал снимается с нагрузочной ёмкости C_n . Рассмотрим контур, отмеченный на рисунке 3 стрелкой.

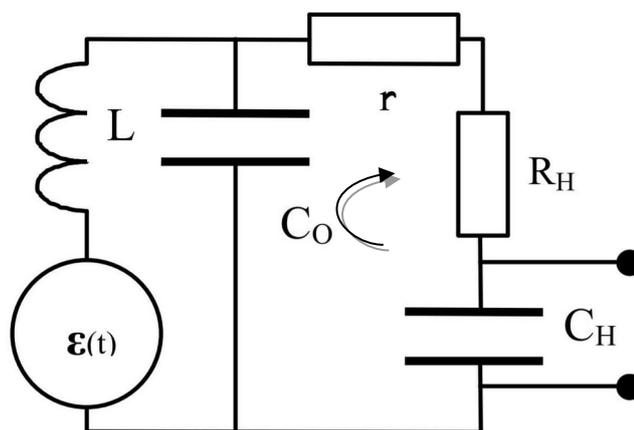


Рис. 3. Схема измерения тока с помощью пояса Роговского интегрированием на внешней ёмкости, где L – индуктивность пояса, C_0 – собственная ёмкость пояса, r – активное сопротивление пояса, $\varepsilon(t)$ – наведённая ЭДС индукции в поясе, R_n – сопротивление нагрузки, C_n – нагрузочная ёмкость

При протекании импульсного исследуемого тока в контуре возникает ЭДС (1), возбуждающая затухающие колебания. Запишем второй закон Кирхгофа для данного контура:

$$\varepsilon(t) = L \frac{\partial I_1}{\partial t} + \frac{1}{C_n} \int I_1 dt + (R_n + r) I_1 = -M \frac{\partial I_0(t)}{\partial t}, \quad (2)$$

где I_1 – ток в цепи пояса.

Подберем параметры цепи так, чтобы при протекании тока $I_1(t)$ с характерным временем τ_n основное падение напряжения было на внешнем сопротивлении R_n . Это соответствует малости импедансов $j\omega L$ и $1/(j\omega C_n)$ на индуктивности и ёмкости, соответственно, при характерных частотах исследуемого импульса тока I_0 . Также это требование соответствует малости $\tau_n \ll C_n R_n$ – характерного времени, и поэтому цепь является интегрирующей. С этими условиями уравнение (2) упрощается, и его можно записать в виде:

$$\varepsilon(t) = R_n I_1 = -M \frac{\partial I_0(t)}{\partial t}.$$

Проинтегрируем это выражение и получим:

$$I_0(t) = \frac{-R_n}{M} \int I_1(t) dt \quad (3)$$

Внешняя цепочка емкостей интегрирует ток:

$$U_c = \frac{1}{C} \int I_1(t) dt \quad (4)$$

Подставив интеграл из (4) в (3), получим:

$$I_0(t) = \frac{-R_n C}{M} U_c(t) = \frac{-R_n C N}{L} U_c(t) \quad (5)$$

Таким образом, зная параметры цепи, можно получить амплитуду $I_0(t)$ [2]. Тогда рабочий диапазон пояса можно оценить неравенством:

$$\frac{L}{R_n} \ll \tau_n \ll R_n C_n \quad (6)$$

2. Анализ результатов измерений

В работе использовался генератор Актаком ADG-1005 и осциллограф Tektronix TDS 2024B. Ниже, в таблице 1, приведены конструктивные параметры пояса Роговского, используемого в работе:

Таблица 1. Параметры пояса Роговского

Внутренний диаметр, мм	22
Внешний диаметр, мм	42
Ширина, мм	18
Число витков	100

Далее рассмотрим основные полученные результаты.

2.1. Результаты измерений

Для получения необходимых результатов была поставлена задача найти рабочий диапазон длительности импульсов тока, в котором восстановление формы импульсного тока будет наилучшим. Для этого необходимо было найти собственные параметры пояса: ёмкость, индуктивность и активное сопротивление.

2.1.1. Определение собственных параметров пояса

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

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{2\tau L_0 C_0}} \quad (7)$$

Собственная частота f_0 была измерена с помощью осциллографа и получена равной 74,63 кГц (рис. 4).

Тогда, подключив дополнительную известную по величине ёмкость C_1 параллельно выходу пояса и определив новую частоту f_1 , можно найти ёмкость C_0 с помощью следующего соотношения:

$$\frac{f_0^2}{f_1^2} = \frac{C_0 + C_1}{C_0}, \quad (8)$$

где частота f_1 определяется аналогично частоте f_0 . Тогда, из уравнения (8), легко получить собственную ёмкость пояса. Подставив уже известную величину C_1 в формулу (7), получаем собственную индуктивность.

Собственное активное сопротивление оценим с помощью соотношения $\tau = 2L/r$, где τ – время релаксации, $\tau = 1/\gamma$, где, в свою очередь, γ – коэффициент затухания. Из определения коэффициента затухания, найдём γ :

здесь A_n – амплитуда n-ого гребня волны на осциллограмме, $T_n = T \cdot n$, где T – период колебаний [2].

Выполнив необходимые вычисления, получаем параметры пояса: $L_0 = 0,035$ Гн, $C_0 = 130$ пФ, $r_0 = 0,5$ Ом.

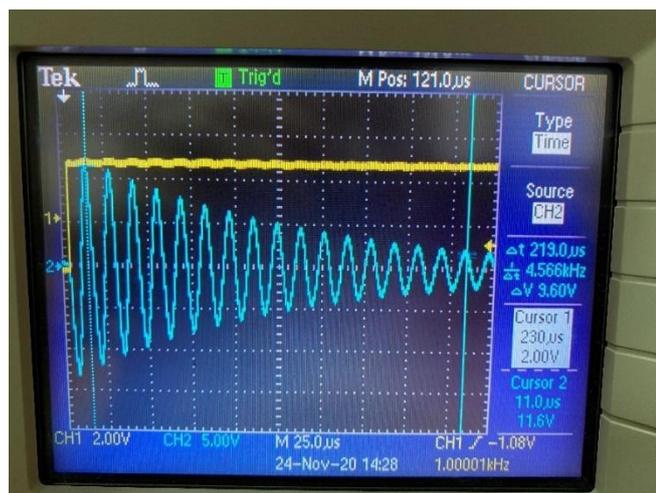


Рис. 4. Пример осциллограммы для определения собственных параметров пояса Роговского
2.1.2. Нахождение рабочего диапазона

С помощью неравенства (6) получили следующую оценку для τ_n при выбранных параметрах интегрирующей цепочки $R = 30$ кОм, $C = 33$ нФ:

$$1,16 \cdot 10^{-6} \text{ с} \ll \tau_n \ll 9,9 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Отсюда получаем оценку рабочего диапазона частоты:

$$1 \text{ кГц} \ll \nu \ll 0,86 \text{ МГц.}$$

2.1.3. Подбор длительности импульса

Следующим этапом работы стал подбор подходящей длительности импульса, чтобы форма импульса передавалась на осциллограмме наилучшим образом. В итоге, была выбрана импульсная частота $\nu_0 = 6 \text{ кГц}$ из рабочего диапазона, полученного выше. На рисунке 5 приведено изображение формы импульса для выбранных параметров. Из осциллограмм видно, что при частотах $\nu \ll \nu_0$ (см. Приложение, рис. 1,2) и при частотах $\nu \gg \nu_0$ (см. Приложение, рис. 3 - 6) сигнал плохо восстанавливается.

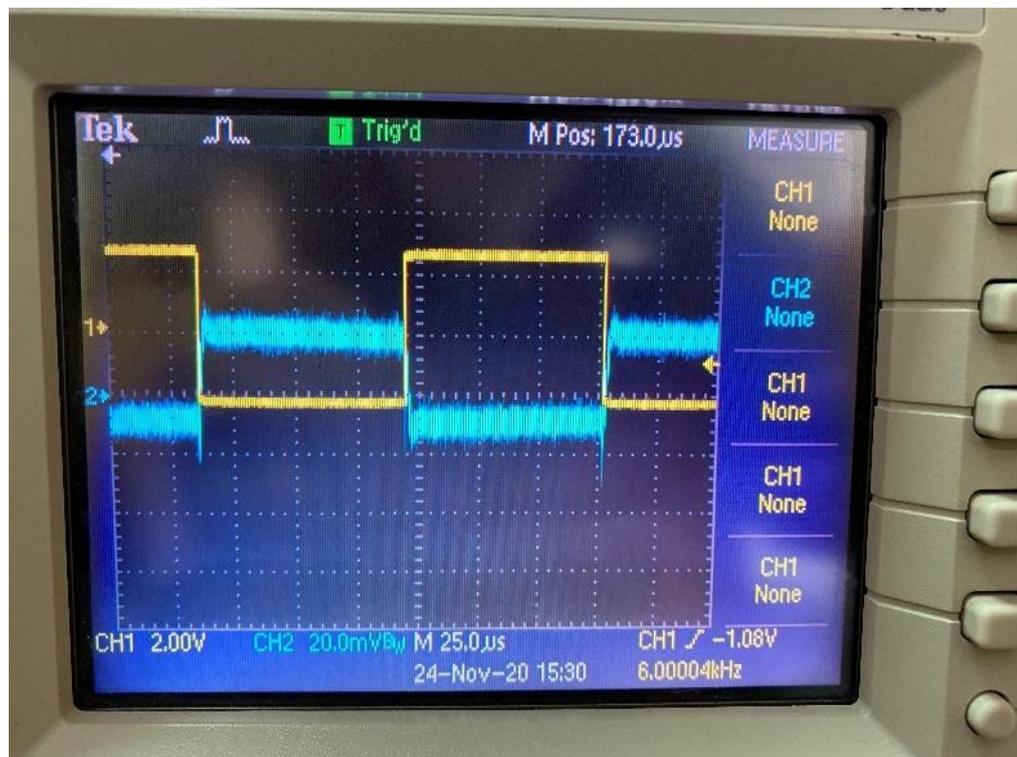


Рис. 5. Осциллограмма с формой импульса, передаваемой наилучшим образом, характеристики: $R = 30 \text{ кОм}$, $C = 33 \text{ нФ}$, а частота $\nu_0 = 6 \text{ кГц}$

2.2. Оценки погрешностей

Амплитуды напряжения, измеренные осциллографом, составляют: $U_{\text{CH1}} = 2.4 \text{ В}$, $U_{\text{CH2}} = 20 \text{ мВ}$. Как можно увидеть на рис. 5, форма импульса передается не точно, на горизонтальных отрезках появляются «шумы». Их амплитуда составила $h = 12,8 \text{ мВ}$.

Исследуемый ток I_0 , измеряемый с помощью пояса, протекает через известное сопротивление (рис. 2). Измеряя напряжение на данном сопротивлении с помощью осциллографа (рис. 5), мы получаем значение тока:

$$I_0 = \frac{U_{CH1}}{48 \text{ Ом}} = 55 \text{ мА.}$$

На выводах второго контура, представляющего собой пояс Роговского и интегрирующую цепочку, образуется напряжение, измеряемое вторым каналом осциллографа. Ток I_0 в данном случае находится из уравнения (5):

$$I_0 = \frac{R_H CN}{L} U_{CH2} = 56 \text{ мА.}$$

Следовательно, погрешность восстановления тока равна:

$$\delta I_0 = \frac{R_H CN}{L} \delta U_{CH2} = 36 \text{ мА.}$$

Выводы и заключение

В ходе выполнения работы я познакомилась с методикой восстановления тока с помощью пояса Роговского. Описан алгоритм расчета параметров пояса, а также диапазон работы исследуемого пояса Роговского в режиме интегрирования на внешней ёмкости. Зарегистрированы осциллограммы прямоугольного импульса для различных частот и, соответственно, найдена частота, при которой форма импульса передаётся наилучшим образом. Получена погрешность восстановления импульсного тока, равная 36 мА. Большая относительная погрешность ($\sim 60\%$) в определении амплитуды исследуемого тока возникает из-за малого значения данного тока. Поэтому пояс Роговского рекомендуется использовать для измерения токов большой силы.

Список литературы

1. Сивухин Д.В. Электричество. Учебное пособие: Для вузов. В 2 ч. Ч. 1. – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 320 с.
2. Вячеславов Л. Н, Курочкин В. Л., Рева В. Б., Смирных Л Н. Электрические цепи. Учебно-методическое пособие: НГУ, 2008. – 127 с.

3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учебное пособие: Для вузов. В 5 т. Т. 3. Электричество. – М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2004. – 656 с.

Осциллограммы форм импульсов

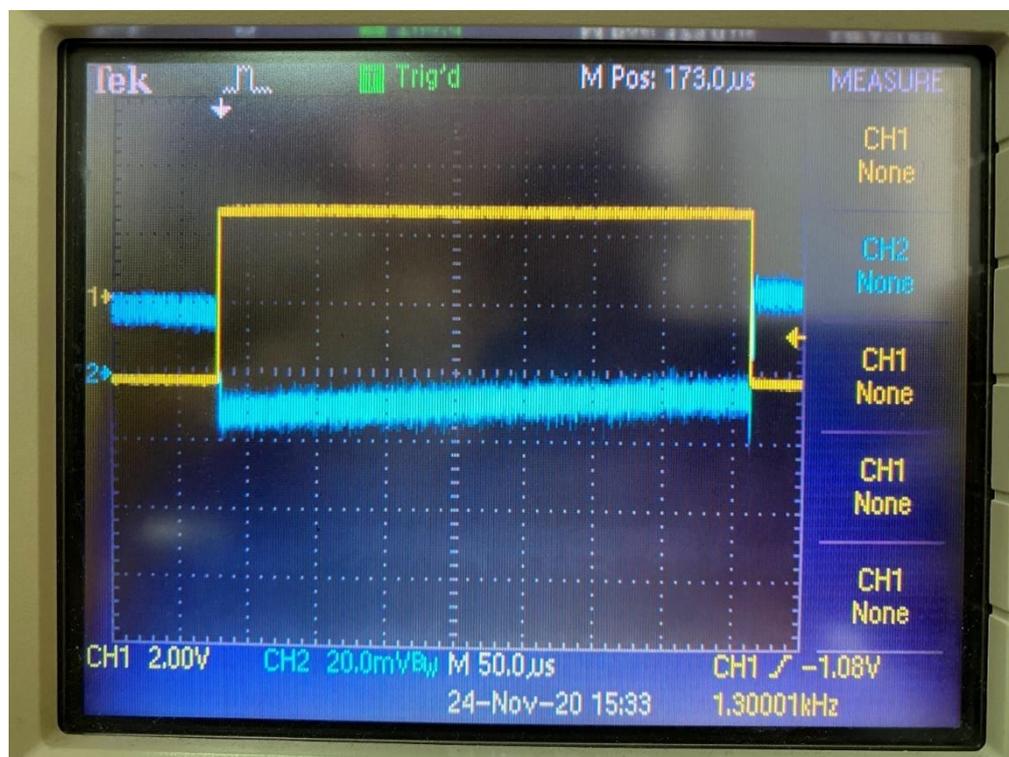


Рис. 1. Осциллограмма при частоте 1,3 кГц



Рис. 2. Осциллограмма при частоте 2 кГц

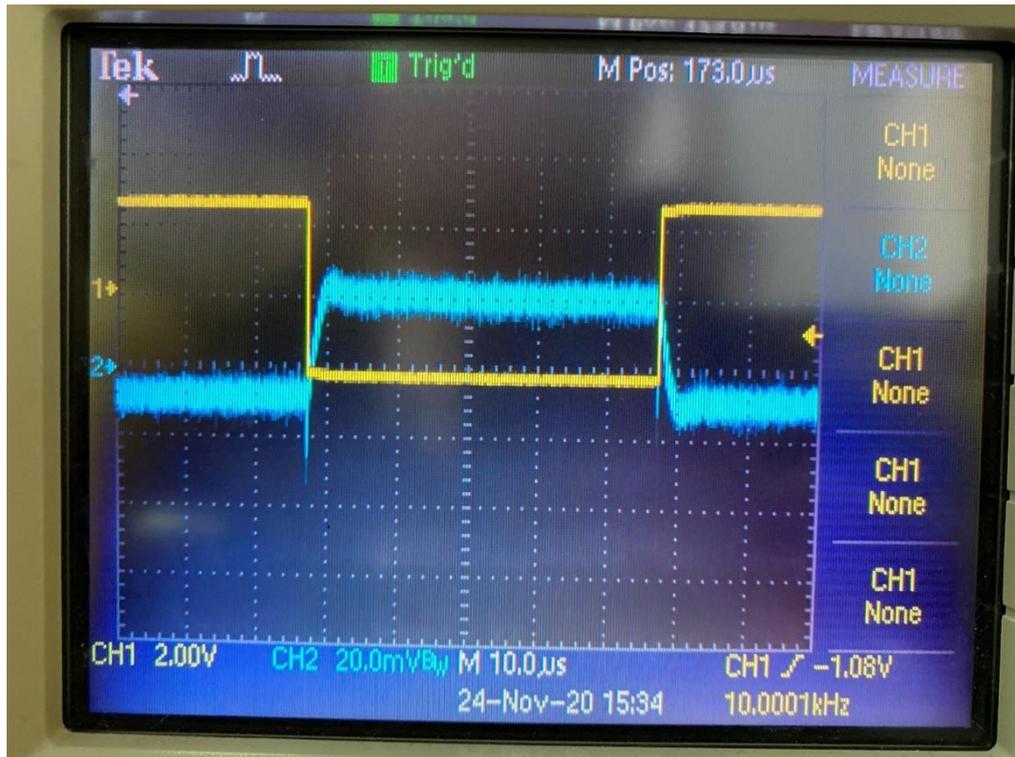


Рис. 3. Осциллограмма при частоте 10 кГц



Рис. 4. Осциллограмма при частоте 50 кГц

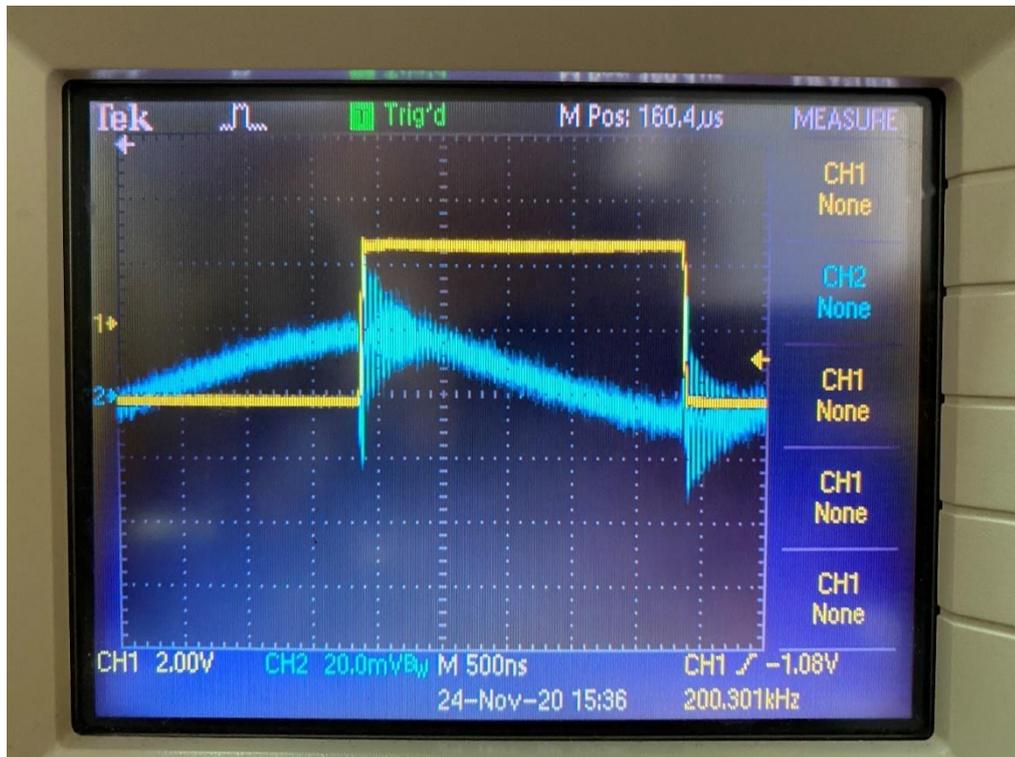


Рис. 5. Осциллограмма при частоте 200 кГц

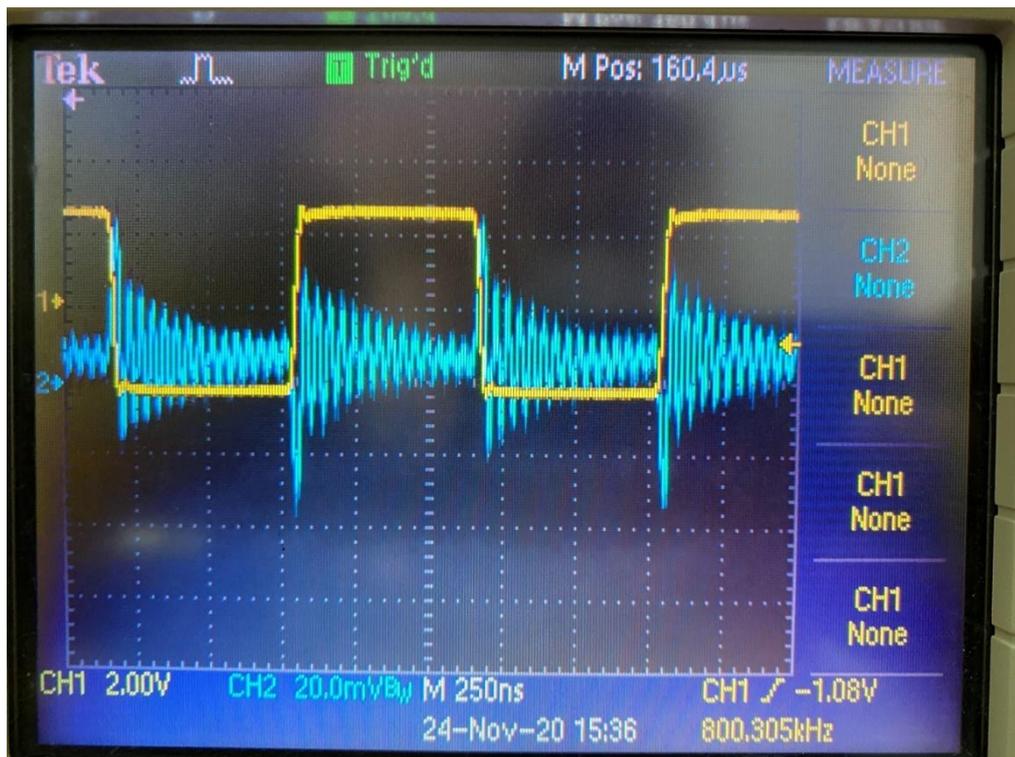


Рис. 6. Осциллограмма при частоте 800 кГц