

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра физики и методики преподавания физики  
А.С. Лелюхин, Т.И. Пискарёва, И.Н. Анисина

# ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки»

Оренбург

2019

УДК 537.3(076.5)

ББК 22.33я7

Л43

Рецензент – доктор физико-математических наук, профессор Н.А. Манаков

**Лелюхин, А.С.**

Л 43 Изучение процессов заряда и разряда конденсатора: методические указания / А.С. Лелюхин, Т.И. Пискарёва, И.Н. Анисина. – Оренбургский гос. ун – т. Оренбург : ОГУ, 2019. – 19 с.

Методические указания содержат описание лабораторной работы по электричеству. В работе представлена теоретическая часть, опирающаяся на соответствующие рабочим программам темы, экспериментальная часть, а также контрольные вопросы для самостоятельной проверки полученных знаний. Методические указания адресованы обучающимся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки».

УДК 537.3(076.5)

ББК 22.33я7

© Лелюхин А.С.,  
Пискарёва Т.И.,  
Анисина И.Н., 2019  
© ОГУ, 2019

## Содержание

1 Лабораторная работа «Изучение процессов заряда и разряда конденсатора» .....	4
1.1 Теоретическая часть.....	4
1.2 Экспериментальная часть.....	10
1.2.1 Описание экспериментальной установки.....	10
1.2.2 Порядок выполнения работы.....	14
Список использованных источников .....	19

# 1 Лабораторная работа «Изучение процессов заряда и разряда конденсатора»

## Цель работы

1. Познакомиться с виртуальными измерительными приборами, освоить принципы измерения параметров импульсных сигналов с помощью осциллографа.
2. Осуществить наблюдение динамики изменения напряжения на конденсаторе во время его заряда и разряда.
3. Определить время релаксации и оценить влияние параметров цепи на форму кривой заряда-разряда конденсатора.

## 1.1 Теоретическая часть

Рассмотрим процесс заряда конденсатора в электрической цепи, содержащей последовательно соединенные конденсатор  $C$ , сопротивление  $R$  и источник ЭДС  $\varepsilon$  (рисунок 1).

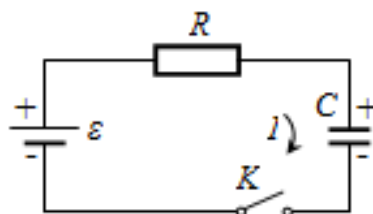


Рисунок 1 – Электрическая цепь при заряде конденсатора

Первоначально конденсатор не заряжен. Пусть  $I$ ,  $q$  и  $U$  – мгновенные значения тока, заряда и разности потенциалов между обкладками конденсатора. Полагая, что токи и напряжения удовлетворяют условиям квазистационарности (мгновенное значение тока во всех сечениях провода и элементах цепи одно и то же), можно допустить, что соотношение между мгновенными значениями  $I$ ,  $q$  и  $U$  такое же, как и в цепях постоянного тока.

В момент времени  $t = 0$  ключ  $K$  замыкается и в цепи протекает ток, заряжающий конденсатор

$$I = \frac{dq}{dt},$$

где  $q$  – заряд конденсатора.

Применим закон Ома к участку цепи, содержащей ЭДС:

$$IR = \varepsilon - U, \quad (1)$$

где  $R$  – полное сопротивление цепи, включающее внутреннее сопротивление источника ЭДС.

Учитывая, что разность потенциалов на пластинах конденсатора

$$U = \frac{q}{C},$$

запишем предыдущее уравнение в виде

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon - q/C}{R}. \quad (2)$$

Разделим переменные и проинтегрируем это уравнение с учетом начального условия при  $t = 0, q = 0$ :

$$\int_0^q \frac{Rdq}{\varepsilon - q/C} = \int_0^t dt;$$

$$RC \ln \left( 1 - \frac{q}{\varepsilon C} \right) = -t.$$

Откуда

$$q = q_m (1 - e^{-\frac{t}{RC}}), \quad (3)$$

где  $q_m = \varepsilon C$  – предельное значение заряда на конденсаторе.

Напряжение на конденсаторе изменяется по закону

$$U = \frac{q}{C} = \varepsilon (1 - e^{-\frac{t}{RC}}).$$

Закон изменения тока в цепи получим дифференцированием

$$I = \frac{dq}{dt} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (4)$$

где  $I_0 = \frac{\varepsilon}{R}$ .

Графики зависимостей  $q(t)$  и  $I(t)$  представлены на рисунке 2.

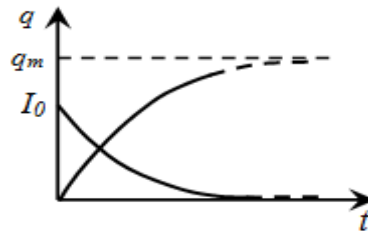


Рисунок 2 – Кривые изменения заряда на обкладках конденсатора и тока в цепи при заряде конденсатора

Рассмотрим процесс разряда конденсатора емкостью  $C$ , пластины которого замкнуты сопротивлением  $R$ . Пусть  $dq$  – уменьшение заряда конденсатора за время  $dt$ . При разряде конденсатора в цепи (рисунок 3) протекает ток  $I = -\frac{dq}{dt}$ .

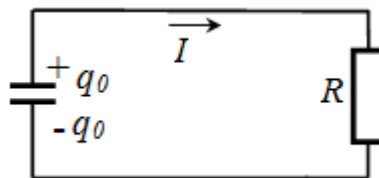


Рисунок 3 – Электрическая цепь при разряде конденсатора

Известно, что

$$q = CU,$$

где  $U$  – разность потенциалов на конденсаторе, а, следовательно, и на сопротивлении  $R$ .

По закону Ома имеем  $U = IR$ , тогда

$$-\frac{dq}{dt} = \frac{U}{R} = \frac{q}{CR}. \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает, что скорость уменьшения заряда конденсатора пропорциональна величине этого заряда. Интегрируя уравнение (5) при условии, что в момент времени  $t = 0$ ,  $q = q_0$ , получим

$$\frac{q}{q_0} \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt;$$

$$\ln \frac{q}{q_0} = -\frac{t}{RC}, \quad (6)$$

откуда

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (7)$$

Функция  $q(t)$  называется экспоненциальной. График зависимости  $q(t)$  приведен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Кривая изменения заряда на обкладках конденсатора при разряде конденсатора

Закон изменения напряжения на конденсаторе в процессе разряда аналогичен (7):

$$U(t) = \frac{q}{C} = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (8)$$

где  $U_0 = \frac{q_0}{C}$ .

Заряд и разряд конденсатора происходят по экспоненциальному закону. Напряжение на обкладках конденсатора асимптотически стремится к некоторому предельному значению (рисунок 5).

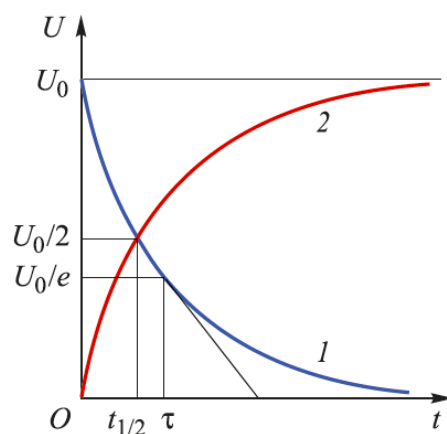


Рисунок 5 – Кривые изменения напряжения на обкладках конденсатора при его заряде (1) и разряде (2)

Как при заряде, так и при разряде конденсатора напряжение на его обкладках зависит от одних и тех же величин – емкости конденсатора  $C$ , сопротивления  $R$  в цепи и времени  $t$ , прошедшего от начала заряда или разряда.

Произведение  $RC$  имеет размерность времени  $\tau = RC$  и называется постоянной времени или временем релаксации  $\tau$ .

Постоянная времени задает время, которое необходимо, чтобы напряжение на конденсаторе изменилось в  $e$  раз. Постоянная времени не зависит от времени и определяется на графике функции как подкасательная экспоненты (проекция на ось времени касательной в любой точке экспоненты). Это свойство позволяет находить постоянную времени  $RC$ -цепи графически, не проводя расчетов.

Постоянная времени характеризует скорость заряда и разряда конденсатора. Так, при  $RC = 0$  изменение напряжения на конденсаторе будет происходить почти мгновенно, а при  $RC = \infty$  процесс заряда или разряда конденсатора продлится бесконечно долго.

Так как экспонента асимптотически приближается к оси абсцисс, то точно установить окончание процесса разряда конденсатора (так же как и процесса заряда) не представляется возможным. Для определения  $RC$  часто удобно измерять время, за которое величина заряда падает до половины первоначального значения, так



называемое «половинное время»  $t_{1/2}$ . «Половинное время» определяется из выражения

$$e^{-\frac{t_{1/2}}{RC}} = \frac{1}{2}. \quad (9)$$

Взяв натуральный логарифм от обеих частей уравнения (9), получаем

$$t_{1/2} = RC \cdot \ln \frac{1}{2} = RC \cdot 0,693$$

или

$$RC = 1,4425 \cdot t_{1/2}. \quad (10)$$

За каждый интервал времени  $t_{1/2} = RC \cdot 0,693$  заряд на конденсаторе уменьшается в 2 раза. Способ измерения постоянной времени состоит в определении  $t_{1/2}$  и умножении полученной величины на 1,44.

Если обкладки конденсатора попеременно подключать к источнику тока и к сопротивлению  $R$  (рисунок 6), то график процесса заряд-разряд конденсатора будет иметь вид, показанный на рисунке 7.

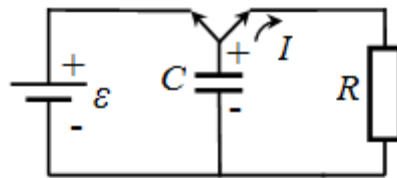


Рисунок 6 – Электрическая цепь заряда-разряда конденсатора

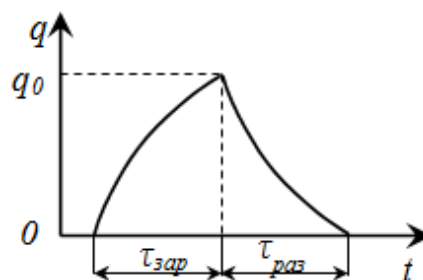


Рисунок 7 – Кривая изменения заряда на обкладках конденсатора

## 1.2 Экспериментальная часть

### 1.2.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для наблюдения процессов заряда-разряда конденсаторов содержит (рисунок 8):

$PQ$  – генератор прямоугольных импульсов;

$PO$  – осциллограф;

$MC$  – магазины сопротивлений ( $R1$  и  $R2$ );

$ME$  – магазин емкостей ( $C$ ).

Заряд и разряд конденсатора осуществляется периодическим импульсным сигналом прямоугольной формы. Конденсатор заряжается через сопротивление  $R2$  в течение длительности импульса и разряжается через сопротивления  $R1$ ,  $R2$  и выходную цепь генератора в промежутках между импульсами.

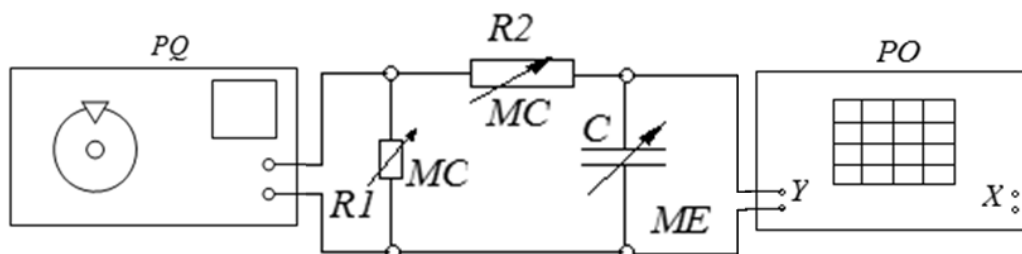


Рисунок 8 – Структурная схема экспериментальной установки

Для того, чтобы конденсатор успевал зарядиться до амплитудного значения импульса  $U_0$  и соответственно полностью разрядиться, длительность импульса  $t_{\text{имп}}$  должна быть больше времени релаксации  $\tau$ .

Наиболее устойчивый режим работы экспериментальной установки обеспечивается при изменении номинальных величин элементов  $RC$ -цепи в следующих пределах:

$$C = 0,02 - 0,04 \text{ мкФ};$$

$$R1 = 10^2 - 10^3 \text{ Ом};$$

$$R2 = 1 - 5 \text{ кОм};$$

$$f_{\text{ген}} = 0,7 - 2 \text{ кГц}.$$

При этом сравнительно полно происходит процесс заряда-разряда конденсатора. При увеличении сопротивлений и емкости больше определенных значений конденсатор не успевает полностью зарядиться и разрядиться за один период цикла. Наблюдаемые при этом кривые заряда и разряда изображены на рисунке 9 штрихпунктирной линией.

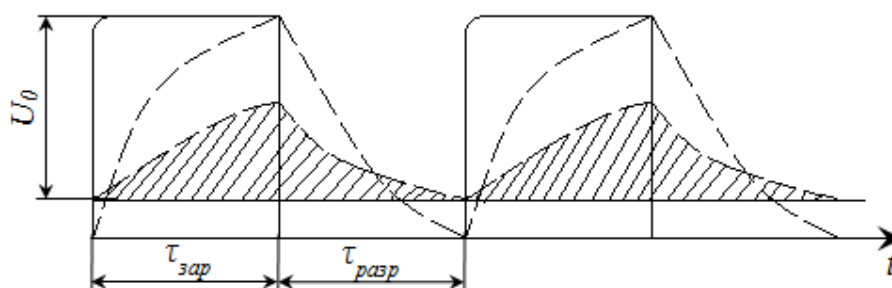


Рисунок 9 – Кривые заряда-разряда конденсатора при разных соотношениях длительности импульса и времени релаксации

Для формирования и наблюдения электрических сигналов в работе используются виртуальный генератор и виртуальный осциллограф, реализованные на базе звуковой карты персонального компьютера (ПК).

Состав экспериментальной установки иллюстрируется рисунком 10.

Исследуемая электрическая цепь организуется согласно схеме (рисунок 8) с помощью соединительных кабелей. Кабели для подключения к персональному компьютеру имеют цветовую маркировку:

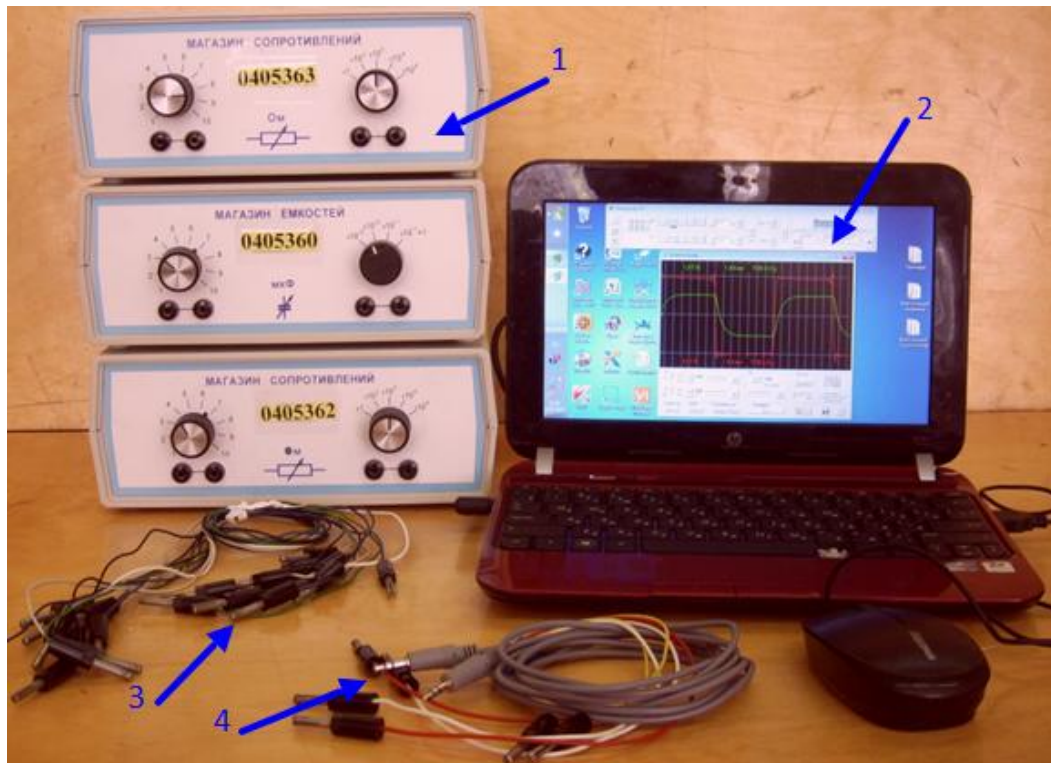
желтый – общий провод;

коричневый – первый (левый) канал;

белый – второй (правый) канал.

Входной сигнал подается на сопротивление  $R1$  путем подключения к линейному выходу звуковой карты ПК. Выходной сигнал с емкости  $C$  подаются на линейный вход звуковой карты.

**Внимание! Категорически запрещается подключать к ПК иные приборы кроме элементов экспериментальной установки, если это не оговорено отдельно.**



1 – модули магазинов сопротивлений и емкостей; 2 – персональный компьютер с сервисным программным обеспечением; 3 – соединительные кабели; 4 – кабели для подключения испытуемой цепи к звуковому порту ПК.

Рисунок 10 – Экспериментальная установка для изучения процессов заряда-разряда конденсаторов

Виртуальный осциллограф «РадиоМастер» позволяет исследовать переменные напряжения в звуковом диапазоне частот от 10 Гц до 20 кГц. Для наблюдения сигналов доступны два независимых канала Y1 (зеленый) и Y2 (красный).

Амплитуда входного напряжения без использования входного делителя напряжения ограничена возможностями звуковой карты ПК и не превышает 1,5 В.

На лицевой панели прибора (рисунок 11) располагаются органы управления, типичные для реальных осциллографов, а также специальные средства настройки и кнопки для работы в режиме запоминания осциллограмм. Все элементы панели снабжены всплывающими комментариями. Программа сопровождается файлом «help» с кратким описанием функциональных возможностей.

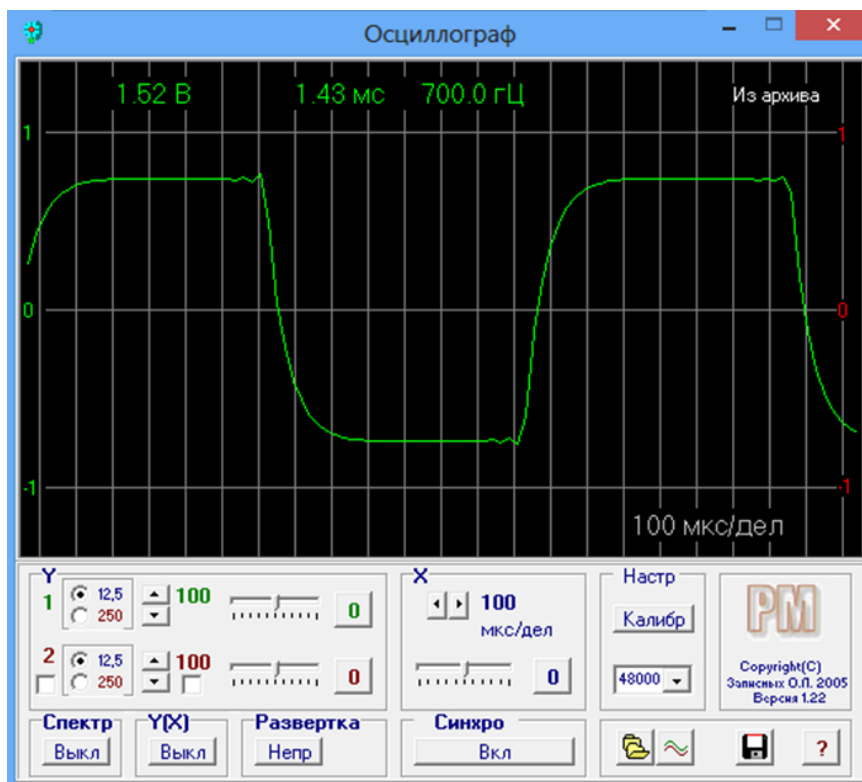


Рисунок 11 – Лицевая панель виртуального осциллографа

Виртуальный генератор «Авангард» позволяет возбуждать на линейном выходе звуковой карты ПК низкочастотные сигналы специальной формы в диапазоне до 20 кГц. Амплитуда выходного сигнала ограничена возможностями звуковой карты ПК и не превышает 1,5 В. Поскольку амплитуда сигнала определяется текущим положением регуляторов уровня, то задание амплитуды осуществляется в процентах от максимального уровня. Для вывода сигналов доступны два независимых канала.

На лицевой панели прибора (рисунок 12) располагаются органы управления для выбора формы выходного сигнала, задания его частоты и амплитуды, а также кнопки для динамического изменения выходного сигнала по частоте или амплитуде (Свип-режим). Все элементы панели снабжены всплывающими комментариями. Программа сопровождается файлом «help» с кратким описанием функциональных возможностей.

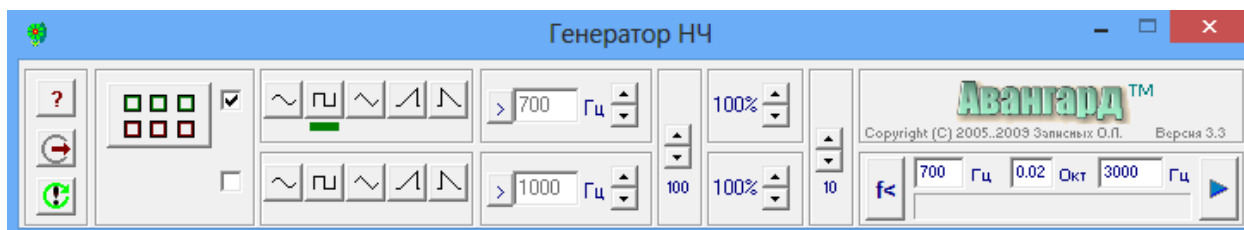


Рисунок 12 – Лицевая панель виртуального генератора низкочастотных сигналов

## 1.2.2 Порядок выполнения работы

### Задание 1

1. Включите персональный компьютер. После загрузки убедитесь, что регуляторы уровня для активных аудиоустройств установлены на максимальный (100%) уровень, а регулятор баланса установлен в нейтральное положение. Для этого откройте «Панель управления», далее «Оборудование и звук» и перейдите к свойствам активных устройств (рисунок 13). Проверьте и при необходимости скорректируйте выходные уровни.

2. Запустите виртуальный осциллограф и генератор. Для этого найдите на рабочем столе папки «Виртуальный осциллограф» и «Виртуальный генератор» и активируйте исполняемые файлы «osc.exe» и «gen33.exe». После запуска программ разместите лицевые панели приборов на рабочем столе для комфортной работы.

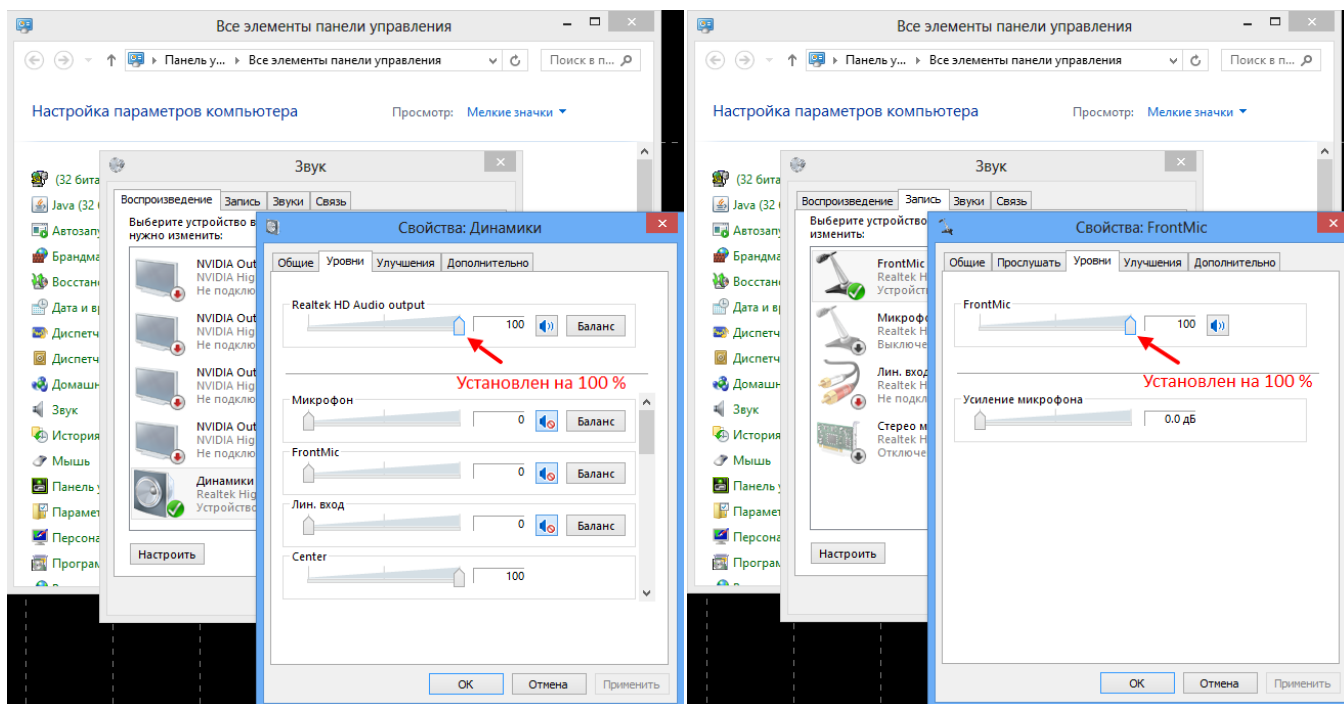


Рисунок 13 – Установка выходных уровней сигналов активных аудиоустройств

3. Установите на лицевых панелях виртуальных приборов элементы управления в положения, соответствующие рисункам 11 и 12. Убедитесь, что генератор работает в режиме «Меандр».

4. Соберите исследуемую электрическую цепь (рисунок 8), воспользовавшись соединительными кабелями. Установите:

- на магазине сопротивлений  $R1 = 10^2$  Ом;
- на магазине сопротивлений  $R2 = 10^3$  Ом;
- на магазине емкостей  $C = 3 \cdot 10^{-2}$  мкФ.

Далее, меняя значения коэффициентов развертки по времени и амплитуде, добейтесь устойчивой картины воспроизведения на экране осциллографа исследуемого сигнала (рисунок 14).

5. Установите частоту выходного сигнала 1 кГц. Переключите свип-режим в положение «Наращение амплитуды».

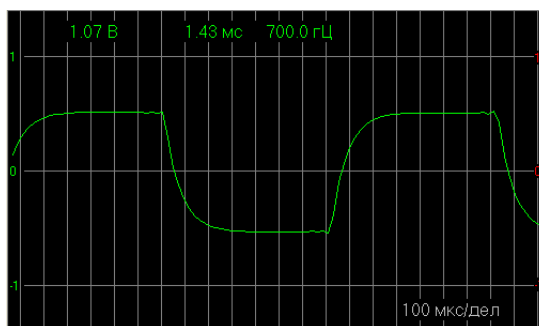


Рисунок 14 – Осциллограмма напряжения на конденсаторе

На панели генератора «Свип-режим» задайте начальное значение амплитуды сигнала – 0.00 %; шаг изменения амплитуды сигнала – 10 %; конечное значение амплитуды сигнала – 100%. Нажмите кнопку «Запустить» и наблюдайте за изменениями сигнала на экране осциллографа. Остановите процесс кнопкой «Остановить». Поясните наблюдаемые изменения формы кривой заряда-разряда конденсатора.

9. Переключите свип-режим в положение «Нарастание частоты». Установите начальное значение частоты – 700 Гц; шаг – 0.02 Окт; конечное значение 3 кГц. Нажмите кнопку «Запустить» и наблюдайте за изменениями сигнала на экране осциллографа. Остановите процесс кнопкой «Остановить». Поясните наблюдаемые изменения формы кривой заряда-разряда конденсатора.

## Задание 2

1. В режиме «Меандр» задайте частоту выходного сигнала генератора 1 кГц.

2. Не изменяя усиление канала Y1 осциллографа, получите на экране кривые заряда и разряда конденсатора при различных параметрах цепи:

– оставляя неизменной величину сопротивлений  $R1 = 2 \cdot 10^2$  Ом и  $R2 = 2 \cdot 10^3$  Ом получите осциллограммы для ряда значений емкости конденсатора  $C = 1 \cdot 10^{-2}$  мкФ;  $C = 3 \cdot 10^{-2}$  мкФ;  $C = 5 \cdot 10^{-2}$  мкФ;  $C = 7 \cdot 10^{-2}$  мкФ;  $C = 9 \cdot 10^{-2}$  мкФ.

– оставляя неизменной величину сопротивления  $R1 = 2 \cdot 10^2$  Ом и емкости  $C = 3 \cdot 10^{-2}$  мкФ; получите осциллограммы для ряда значений сопротивления  $R2 = 1 \cdot 10^3$  Ом;  $R2 = 3 \cdot 10^3$  Ом;  $R2 = 5 \cdot 10^3$  Ом;  $R2 = 7 \cdot 10^3$  Ом;  $R2 = 9 \cdot 10^3$  Ом.

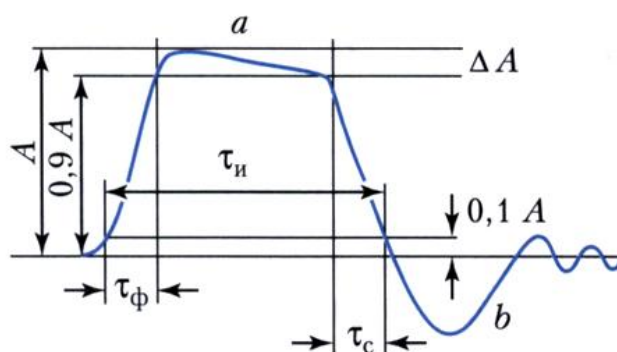


– оставляя неизменной величину сопротивления  $R_2 = 1 \cdot 10^3$  Ом и емкости  $C = 3 \cdot 10^{-2}$  мкФ; получите осциллограммы для ряда значений сопротивления  $R_1 = 1 \cdot 10^2$  Ом;  $R_1 = 1 \cdot 10^3$  Ом;  $R_1 = 1 \cdot 10^4$  Ом;  $R_1 = 1 \cdot 10^6$  Ом  $R_2 = 9 \cdot 10^3$  Ом.

Поясните наблюдаемые изменения формы кривой заряда-разряда конденсатора.

3. Оставляя неизменной величину сопротивления  $R_1 = 2 \cdot 10^2$  Ом получите осциллограммы для следующих сочетаний:  $R_2 = 1 \cdot 10^3$  Ом и  $C = 2 \cdot 10^{-2}$  мкФ;  $R_2 = 3 \cdot 10^3$  Ом и  $C = 5 \cdot 10^{-2}$  мкФ;  $R_2 = 5 \cdot 10^3$  Ом и  $C = 7 \cdot 10^{-2}$  мкФ. Осциллограммы сохраните в виде графических файлов. Сохранение осциллограмм осуществляется нажатием кнопки «Поместить в архив». Сохраненные осциллограммы размещаются в папке «data». Воспользовавшись кнопкой «Архив осциллограмм» можно визуализировать осциллограммы, помещенные в архив.

4. Выполните анализ формы импульсов для сохраненных осциллограмм. Форму импульсов и свойства отдельных его участков с количественной стороны оценивают следующими параметрами (рисунок 15): амплитудой  $A$ , длительностью  $\tau_{и}$  (отсчитывается на заранее обусловленном уровне, например  $0,1 A$  или  $0,9 A$ ), длительностью фронта  $\tau_{ф}$  и спада  $\tau_{с}$  (отсчитываются между уровнями  $0,1 A$  и  $0,9 A$ ), скосом вершины  $\Delta A$  (выражается в процентах от  $A$ ).



$a$  – вершина;  $b$  – хвост;  $A$  – амплитуда;  $\Delta A$  – скос вершины;  $\tau_{ф}$  – длительность фронта;  $\tau_{и}$  – длительность импульса;  $\tau_{с}$  – длительность спада.

Рисунок 15 – Трапецеидальный импульс и его характеристики

Результаты анализа представьте в форме таблицы.

### Задание 3

1. Для сохраненных осциллограмм измерьте по наблюдаемым на экране осциллографа кривым релаксации заряда «половинное время» в делениях шкалы. Затем  $t_{1/2}$  переведите в секунды.

2. Вычислите постоянную времени  $RC$ , используя значения параметров цепи. Учтите, что при заряде конденсатора  $R=R_2$ , а при разряде –  $R=R_1+R_2$  ( $R_1$  может шунтироваться выходным сопротивлением генератора). Рассчитайте отношение  $t_{1/2}$  к  $RC$  для всех случаев по формуле

$$A = \frac{t_{1/2}}{RC}. \quad (11)$$

Сравнить величину  $A$  с теоретическим значением, равным

$$\ln 2 = 0,693.$$

Оценить достоверность измерений по формуле

$$\delta = \frac{\bar{A}_{\text{изм}} - A_{\text{теор}}}{A_{\text{теор}}} \cdot 100\%,$$

где  $\bar{A}_{\text{изм}}$  – среднее значение выполненных измерений.

Результаты анализа представьте в форме таблицы.

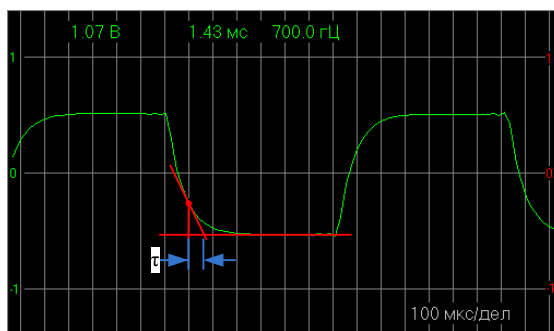


Рисунок 16 – Осциллограмма напряжения на конденсаторе

### Задание 4

1. Для сохраненных осциллограмм в трех точках по фронту импульса постройте касательные к графику функции и оцените в делениях шкалы длину каждой подкасательной (рисунок 16).

2. Переведите найденные значения в секунды, сравните результаты между собой и рассчитайте средние значения для каждого импульса. Сопоставьте результаты с результатами, полученными при выполнении задания 3.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение электрической емкости? В каких единицах она измеряется в системе СИ?

2. Получите и решите уравнения, описывающие изменение заряда на обкладках конденсатора при его зарядке и разрядке.

3. Что называют временем релаксации?

4. Как называется величина  $RC$ ? Как найти ее графически? Какова размерность  $RC$  в системе СИ?

5. Опишите блок-схему экспериментальной установки.

6. Как зависит время заряда и разряда конденсатора от элементов цепи  $R1$ ,  $R2$  и  $C$ ?

7. Назовите основные характеристики импульса, которые могут быть найдены по осциллограммам.

### **Список использованных источников**

1. **Савельев, И.В.** Курс общей физики [Текст]: учебное пособие. В 3 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1988. – 496 с.

2. **Трофимова, Т.И.** Курс физики [Текст]: учебное пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 2001. – 542 с.