

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа аэрокосмических технологий

# Отчёт о выполнении лабораторной работы

## 3.6.1

Спектральный анализ электр. сигналов

Авторы:

Болдинский Дмитрий Олегович

Байкова Алина Алексеевна

Группа Б03-201



# 1 Аннотация

**Цель работы:** изучить спектры сигналов различной формы и влияние параметров сигнала на вид соответствующих спектров; проверить справедливость соотношений неопределённостей; познакомиться с работой спектральных фильтров на примере RC-цепочки

**В работе используются:** генератор сигналов произвольной формы, цифровой осциллограф с функцией быстрого преобразования Фурье или цифровой USB-осциллограф, подключённый к персональному компьютеру.

## 2 Теоретическое введение

### Разложение сложных сигналов на периодические колебания

Представление периодического сигнала в виде суммы гармонических сигналов называется разложением в ряд Фурье.

Пусть заданная функция  $f(t)$  периодически повторяется с частотой  $\Omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ , где  $T$  - период повторения. Ее разложение в ряд Фурье имеет вид

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\Omega_1 t) + b_n \sin(n\Omega_1 t)] \quad (1)$$

Здесь  $\frac{a_0}{2}$  - среднее значение функции  $f(t)$ ,

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} f(t) \cos(n\Omega_1 t) dt, \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} f(t) \sin(n\Omega_1 t) dt. \quad (3)$$

Рассмотрим периодические функции, которые исследуются в нашей работе.

1. **Периодическая последовательность прямоугольных импульсов** (рис. 1) с амплитудой  $V_0$ , длительностью  $\tau$ , частотой повторения  $\Omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ , где  $T$  - период повторения импульсов. Найдем коэффициенты разложения ряда Фурье:

$$\frac{a_0}{2} = V_0 \frac{\tau}{T},$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} V_0 \cos(n\Omega_1 t) dt = 2V_0 \frac{\tau}{T} \frac{\sin(n\Omega_1 \frac{\tau}{2})}{n\Omega_1 \frac{\tau}{2}} \sim \frac{\sin x}{x}. \quad (4)$$

Поскольку наша функция четная, все коэффициенты синусоидальных гармоник  $b_n = 0$ . Спектр  $a_n$  последовательности прямоугольных импульсов представлен на рис. 2 (изображен случай, когда  $T$  кратно  $\tau$ ).

Назовем *шириной спектра*  $\Delta\omega$  расстояние от главного максимума ( $\omega = 0$ ) до первого нуля огибающей, возникающего при  $n = \frac{2\pi}{\tau\Omega_1}$ . При этом

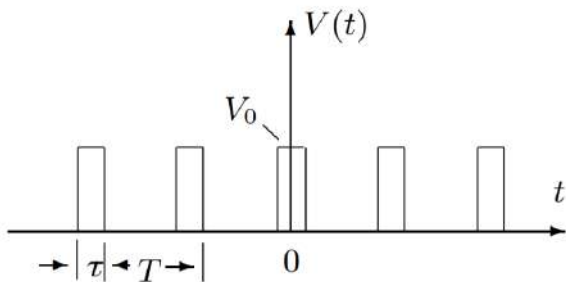


Рис. 1: Прямоугольные импульсы

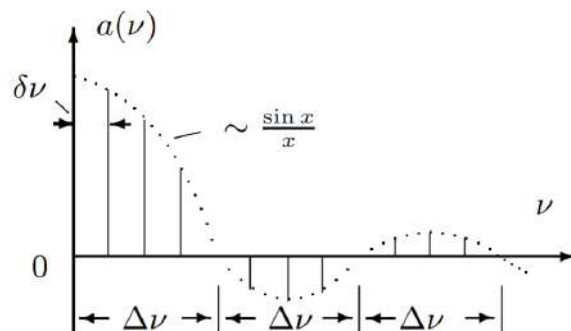


Рис. 2: Спектр последовательности прямоугольных импульсов

$$\Delta\omega\tau \simeq 2\pi$$

или

$$\Delta\nu\Delta t \simeq 1 \quad (5)$$

Полученное соотношение взаимной связи интервалов  $\Delta\nu$  и  $\Delta t$  является частным случаем соотношения неопределенности в квантовой механике.

2. **Периодическая последовательность цугов** гармонического колебания  $V_0 \cos(\omega_0 t)$  с длительностью цуга  $\tau$  и периодом повторения  $T$  (рис. 3).

Функция  $f(t)$  снова является четной относительно  $t = 0$ . Коэффициент при  $n$ -й гармонике равен

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} V_0 \cos(\omega_0 t) \cos(n\Omega_1 t) dt = V_0 \frac{\tau}{T} \left( \frac{\sin[(\omega_0 - n\Omega_1)\frac{\tau}{2}]}{(\omega_0 - n\Omega_1)\frac{\tau}{2}} + \frac{\sin[(\omega_0 + n\Omega_1)\frac{\tau}{2}]}{(\omega_0 + n\Omega_1)\frac{\tau}{2}} \right) \quad (6)$$

Зависимость для случая, когда  $\frac{T}{\tau}$  равно целому числу, представлена на рис. 4. Сравнивая спектр последовательности прямоугольных импульсов и цугов мы видим, что они аналогичны, но их максимумы сдвинуты по частоте на величину  $\omega_0$ .

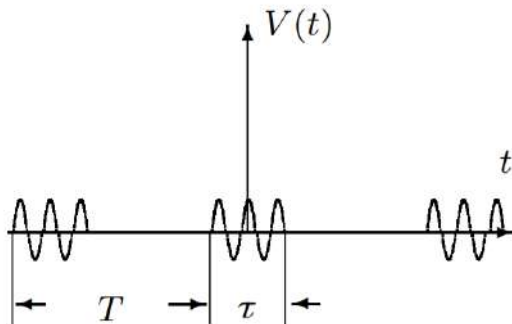


Рис. 3: Последовательность цугов

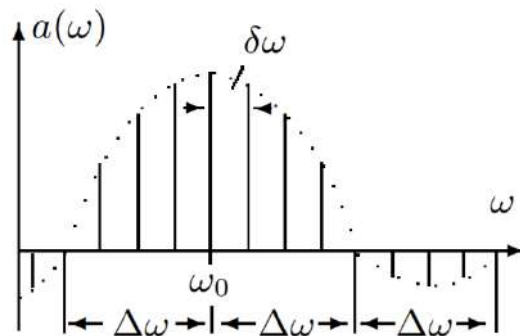


Рис. 4: Спектр последовательности цугов

3. **Амплитудно-модулированные колебания.** Рассмотрим гармонические колебания высокой частоты  $\omega_0$ , амплитуда которых медленно меняется по гармоническому закону с частотой  $\Omega$  ( $\Omega \ll \omega_0$ ) (рис. 5):

$$f(t) = A_0[1 + m \cos \Omega t] \cos \omega_0 t \quad (7)$$

Коэффициент  $m$  называют **глубиной модуляции**. При  $m < 1$  амплитуда колебаний меняется от минимальной  $A_{min} = A_0(1 - m)$  до максимальной  $A_{max} = A_0(1 + m)$ . Глубина модуляции может быть представлена в виде

$$m = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}} \quad (8)$$

Простым тригонометрическим преобразованием можно найти спектр амплитудно - модулированных колебаний:

$$f(t) = A_0 \cos(\omega_0 t) + \frac{A_0 m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{A_0 m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t. \quad (9)$$

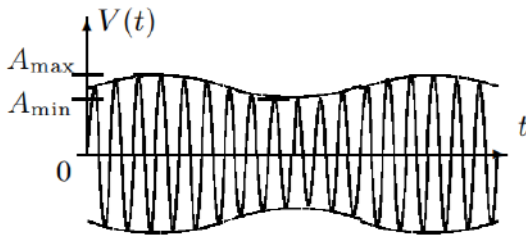


Рис. 5: Модулированные гармонические колебания

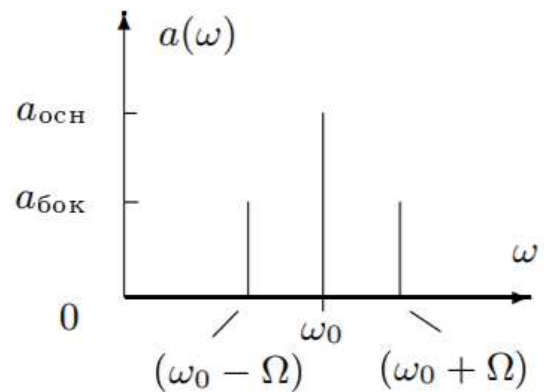


Рис. 6: Спектр модулированных гармонических колебаний

Спектр таких колебаний содержит три составляющих основную компоненту и две боковых (рис. 6). Первое слагаемое в правой части представляет собой исходное немодулированное колебание с основной (несущей) частотой  $\omega_0$  и амплитудой  $a = A_0$ . Второе и третье слагаемые соответствуют новым гармоническим колебаниям с частотами  $\omega_0 + \Omega$  и  $\omega_0 - \Omega$ . Амплитуды этих двух колебаний одинаковы и составляют  $\frac{m}{2}$  от амплитуды немодулированного колебания:  $a = \frac{A_0 m}{2}$ . Начальные фазы всех трех колебаний одинаковы.

### 3 Экспериментальная установка.

В работе изучаются спектры периодических электрических сигналов различной формы (последовательности прямоугольных импульсов и цугов, а также амплитудно- и фазо-модулированных гармонических колебаний). Спектры этих сигналов наблюдаются с помощью спектроанализатора, входящего в состав USB-осциллографа и сравниваются с рассчитанными теоретически. Схема установки изображена на рис.??

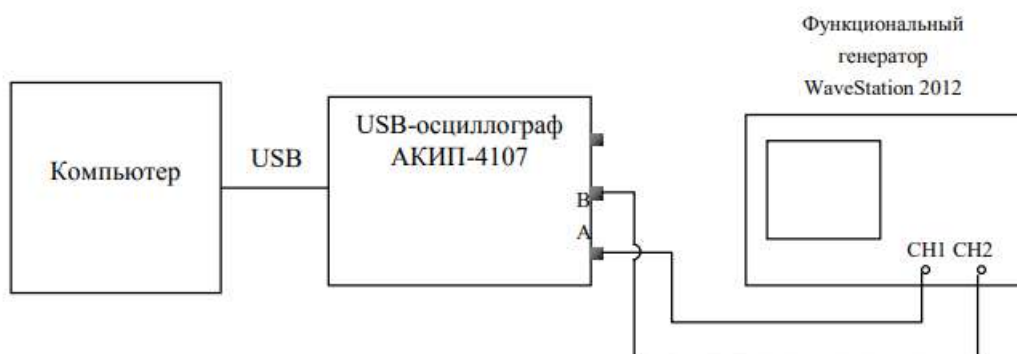


Рис. 7: Схема экспериментальной установки

Функциональный генератор WaveStation 2012 позволяет сформировать два различных электрических сигнала, которые выводятся на два независимых канала – "CH1" и "CH2". Сигнал с канала "CH1" подается на вход "А" а сигнал с канала "CH2" – на вход "В" USB-осциллографа. Затем эти сигналы подаются на вход компьютера через USB-соединение. При работе USB-осциллографа в режиме осциллографа, на экране компьютера можно наблюдать каждый из сигналов в отдельности, а также их произведение. В режиме спектроанализатора можно наблюдать спектры этих сигналов. При включении функционального генератора, на его экране отображается информация о параметрах электрического сигнала. На рис.?? показаны области на экране генератора, в которых отображены следующие данные: А – форма или тип сигнала и номер выходного канала; Б – форма и параметры выходного сигнала; В – область установки параметров выходного сигнала; Г – форма или тип сигнала; Д – экранное меню для установки параметров сигнала.

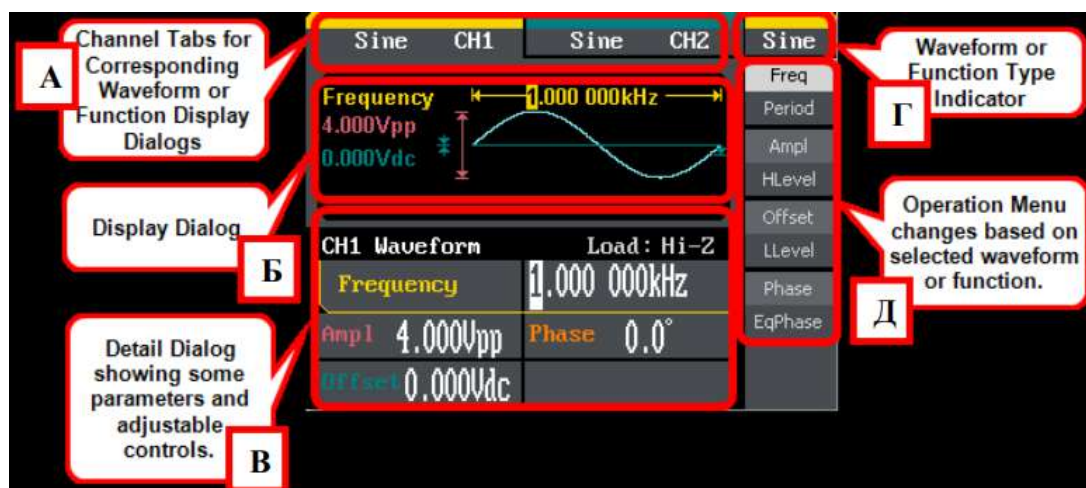


Рис. 8: Экран генератора

Передняя панель функционального генератора показана на рис.???. 1 – кнопка включения; 2 – USB-разъем; 3 – экран; 4 – кнопки экранного меню; 5 – кнопки выбора типа сигналов; 6 – цифровая панель; 7 - функциональные кнопки; 8 – разъемы с кнопками включения (выключения) выходных сигналов 1-го и 2-го каналов; 9 – кнопки перемещения; 10 – подстроечный регулятор.

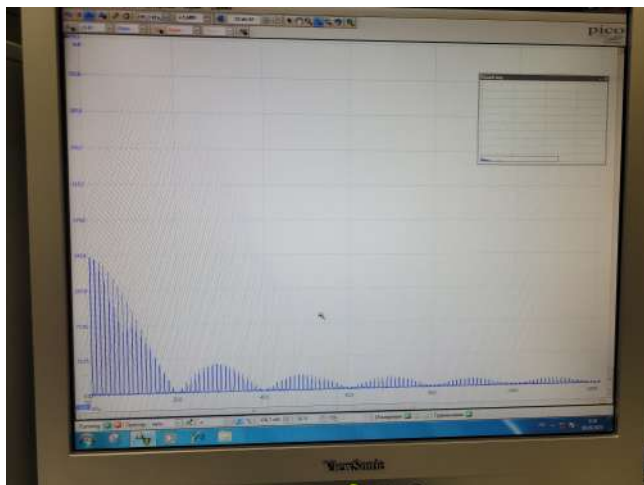


Рис. 9: Передняя панель функционального генератора

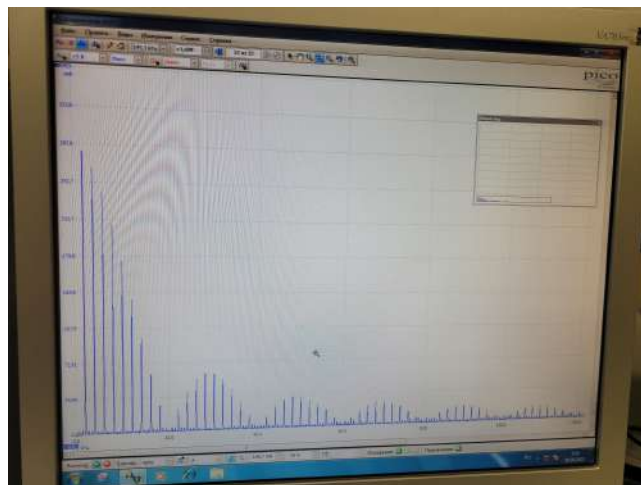
## 4 Ход работы

### А. Исследование спектра периодической последовательности прямоугольных импульсов и проверка соотношений неопределённости

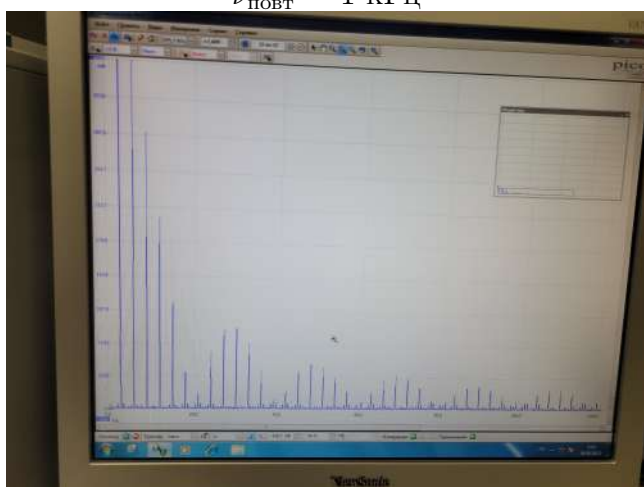
1. Настраиваем генератор на прямоугольные импульсы с частотой повторения  $\nu_{\text{повт}} = 1$  кГц (период  $T = 1$  мс) и длительностью импульса  $\tau = T/20 = 50$  мкс.
2. Получаем на экране спектр (Преобразование Фурье) сигнала.
  - а. Изменяем  $\nu_{\text{повт}}$  при фиксированном  $\tau = 50$  мкс и получаем:



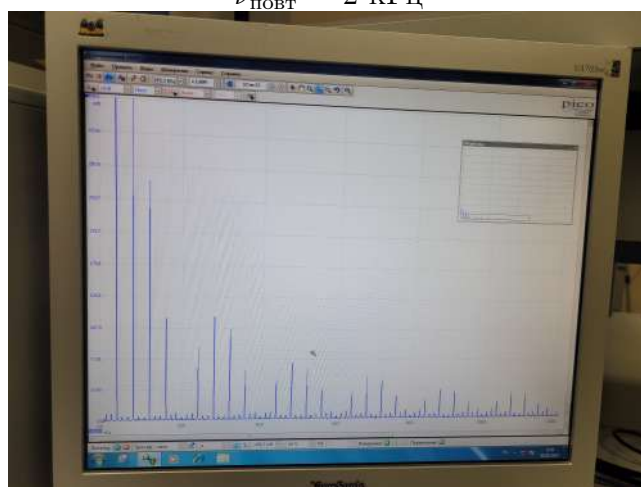
$\nu_{\text{повт}} = 1$  кГц



$\nu_{\text{повт}} = 2$  кГц



$\nu_{\text{повт}} = 3$  кГц



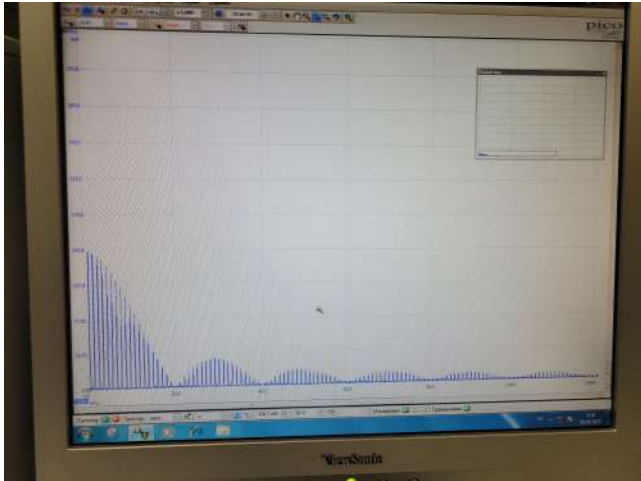
$\nu_{\text{повт}} = 4$  кГц

Рис. 10:

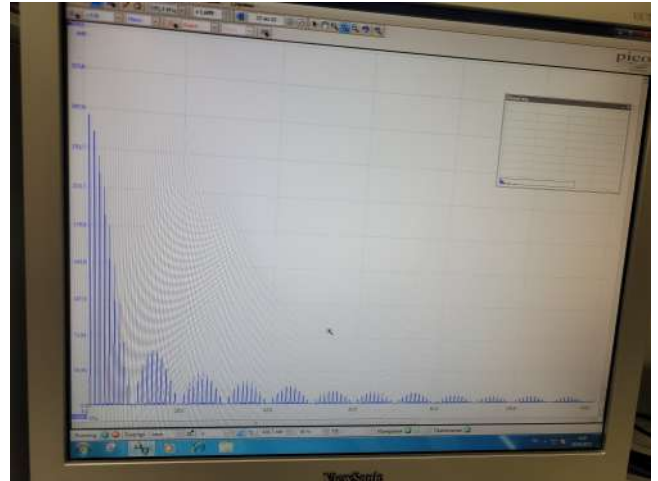
Как видно из графиков, при увеличении частоты повторения сигнала увеличивается расстояние между компонентами спектра.



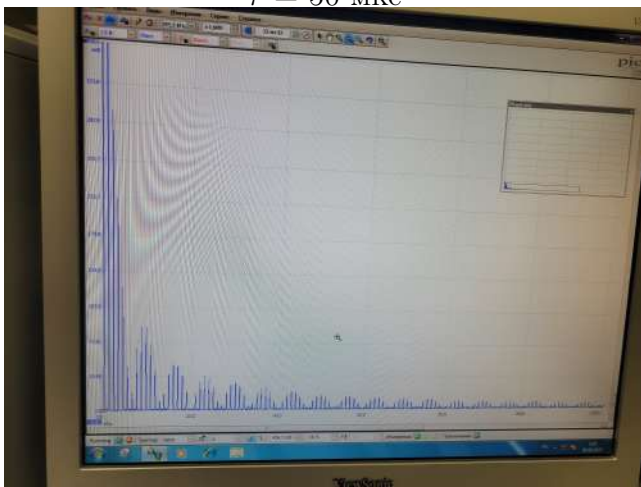
6. Изменяем  $\tau$  при фиксированном  $\nu_{\text{повт}} = 1$  кГц и получаем:



$\tau = 50$  мкс



$\tau = 100$  мкс



$\tau = 150$  мкс

Рис. 11:

Как видно из графиков, при увеличении длительности сигнала уменьшается ширина спектра.

3. Измерим амплитуды  $a_n$  и частоты  $\nu_n$  спектральных гармоник при фиксированных  $\nu_{\text{повт}}$  и  $\tau$ .

$n$ гармоники	5	7	9	11	13	15	17	19
$\nu_n^{\text{эксп}}$ , кГц	5.078	7.092	8.904	11.12	13.03	15.15	16.76	19.17
$\nu_n^{\text{теор}}$ , кГц	5	7	9	11	13	15	17	19
$ a_n ^{\text{эксп}}$ , мВ	125.9	112.3	94.73	73.98	54.58	37.44	20.75	4.962
$ a_n/a_1 ^{\text{эксп}}$	0.876	0.781	0.659	0.515	0.380	0.261	0.144	0.034
$ a_n/a_1 ^{\text{теор}}$	0.904	0.814	0.702	0.574	0.438	0.301	0.171	0.052

Здесь  $a_1 = 143.8$  мВ.

$$\nu_n^{\text{теор}} = \frac{n}{T}$$

$$|a_n|_{\text{теор}} = \frac{|\sin \frac{\pi n \tau}{T}|}{\pi n}$$

4. Зафиксируем период повторения прямоугольного сигнала  $T = 1$  мс,  $\nu_{\text{повт}} = 1$  кГц. Изменяя длительность импульса  $\tau$  в диапазоне от  $\tau = T/50$  до  $\tau = T/5$ , измерим полную ширину



спектра сигнала  $\Delta\nu$  — от центра спектра ( $\nu = 0$ ) до гармоники с нулевой амплитудой  $a_n \approx 0$  и установим зависимость между  $\Delta\nu$  и  $\tau$ , полученную из формулы ??.

$\tau$ , мкс	20	25	40	50	100	150	200
$\Delta\nu$ , кГц	49.68	39.71	24.61	19.98	9.91	6.84	4.93
$1/\tau \cdot 10^3$ , с <sup>-1</sup>	50	40	25	20	10	7	5

Таблица 1: Исследование зависимости  $\Delta\nu$  и  $\tau$

Построим график  $\Delta\nu$  ( $\frac{1}{\tau}$ ). Используя МНК, получим  $k = 0.994 \pm 0.002$ , откуда с хорошей точностью можем заключить, что  $\Delta\nu \frac{1}{\tau} = 1$ , что экспериментально доказывает соотношение неопределённостей. График приведён на рис.12

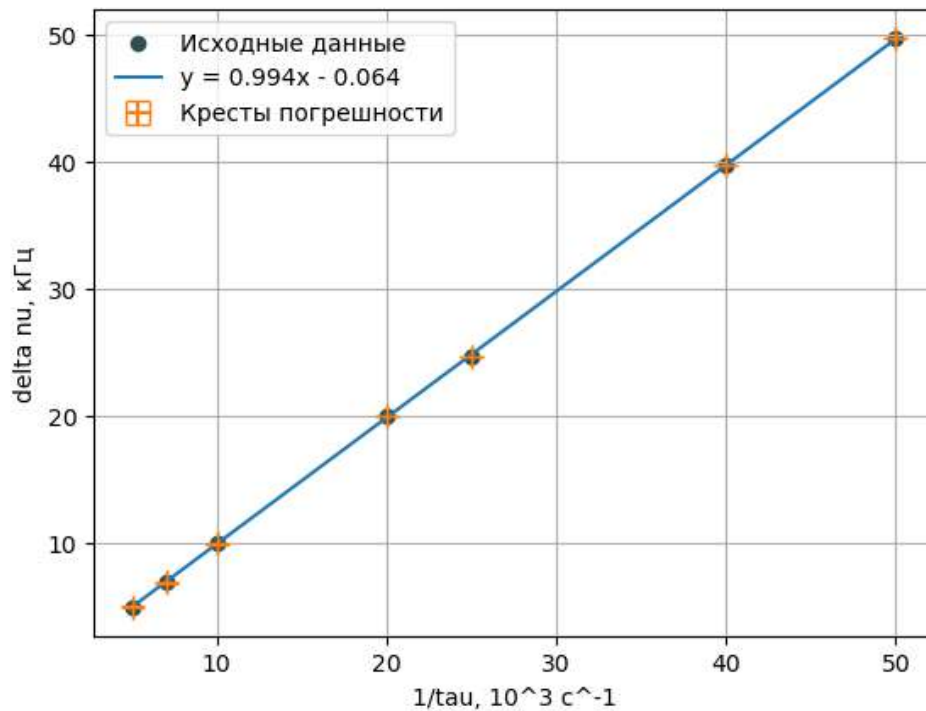


Рис. 12: Зависимость  $\Delta\nu$  от  $1/\tau$

- Зафиксируем длительность импульса прямоугольного сигнала  $\tau = 100$  мкс. Изменяя период повторения  $T$  в диапазоне от  $2\tau$  до  $50\tau$  измерим расстояния  $\delta\nu = \nu_{n+1} - \nu_n$  между соседними гармониками спектра.

$\nu$ , кГц	5	2	1	0.5	0.25	0.1
$\delta\nu$ , кГц	5.036	1.927	1.008	0.510	0.253	0.206

Таблица 2: Зависимость  $\delta\nu$  от  $1/T$

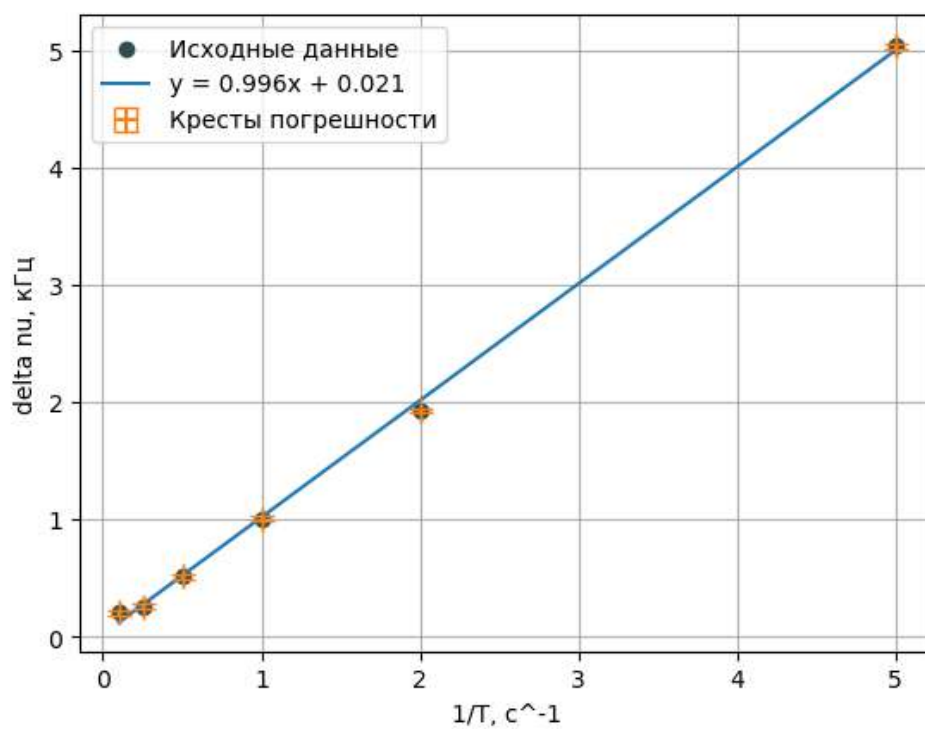
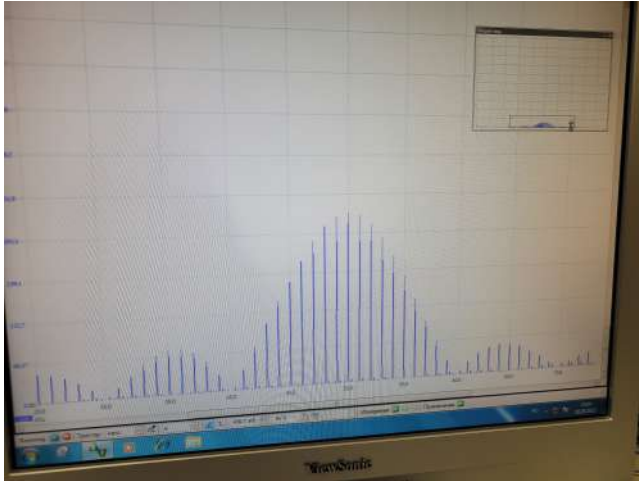


Рис. 13: Зависимость  $\delta\nu$  от  $1/T$

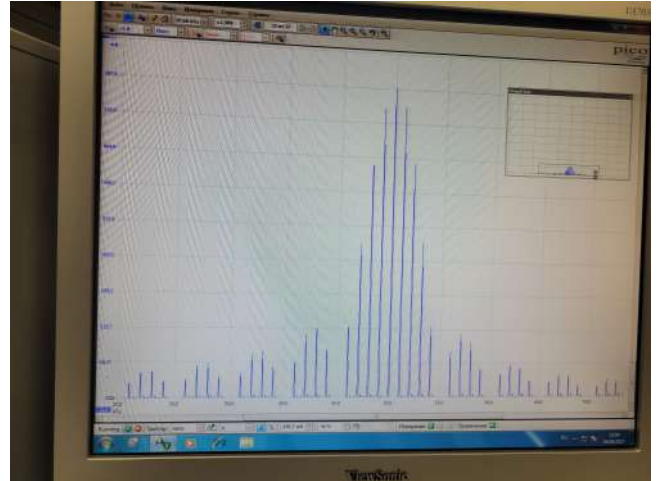
Построим график  $\delta\nu \left( \frac{1}{T} \right)$ . Используя МНК, получим  $k = 0.996 \pm 0.013$ , что экспериментально доказывает соотношение неопределённостей. График приведён на рис.13.

## Б. Наблюдение спектра периодической последовательности цугов

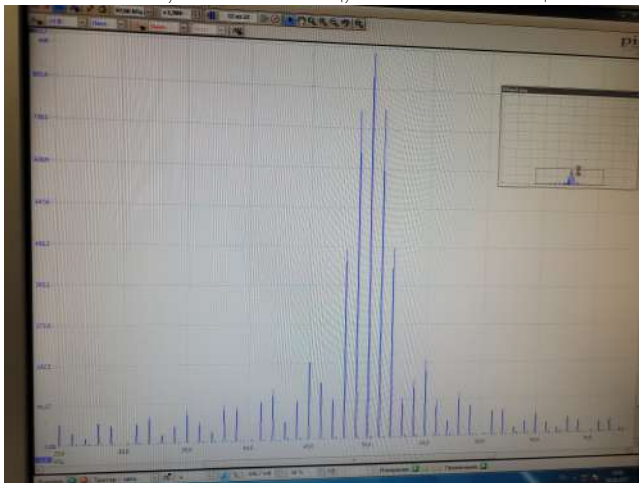
1. Настраиваем генератор на периодические импульсы синусоидальной формы (цугов) с несущей частотой  $\nu_0 = 50$  кГц, частотой повторения  $\nu_{\text{повт}} = 1$  кГц, число периодов синусоиды в одном импульсе  $N = 5$  (что соответствует длительности импульса  $\tau = N/\nu_0 = 100$  мкс).
2. Получаем на экране спектр (Преобразование Фурье) сигнала.
  - а. Изменяем  $N$  при фиксированных  $\nu_0 = 50$  кГц и  $\nu_{\text{повт}} = 1$  кГц:



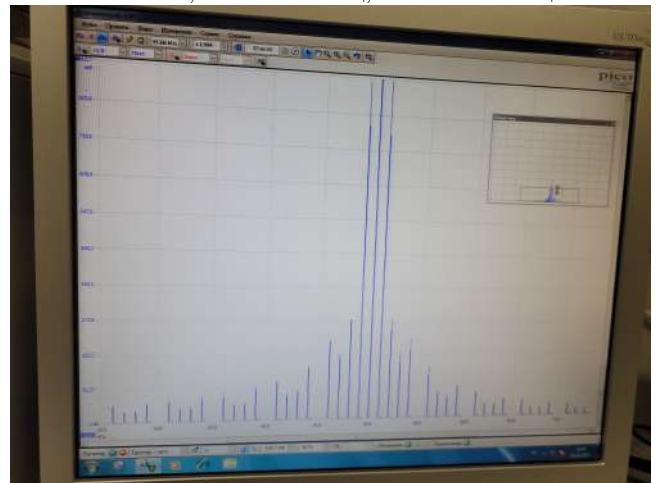
$N=5, \delta\nu = 1$  кГц,  $\Delta\nu = 10$  кГц



$N=10, \delta\nu = 1$  кГц,  $\Delta\nu = 5$  кГц



$N=15, \delta\nu = 1$  кГц,  $\Delta\nu \approx 3$  кГц



$N=20, \delta\nu = 1$  кГц,  $\Delta\nu \approx 2.5$  кГц

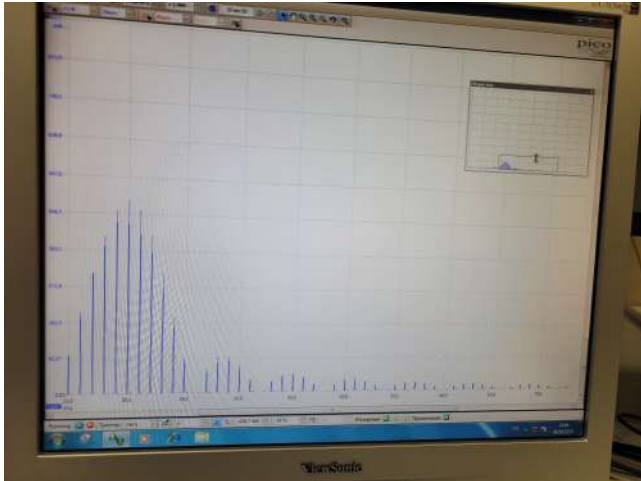
Рис. 14:

Соотношение неопределённостей:

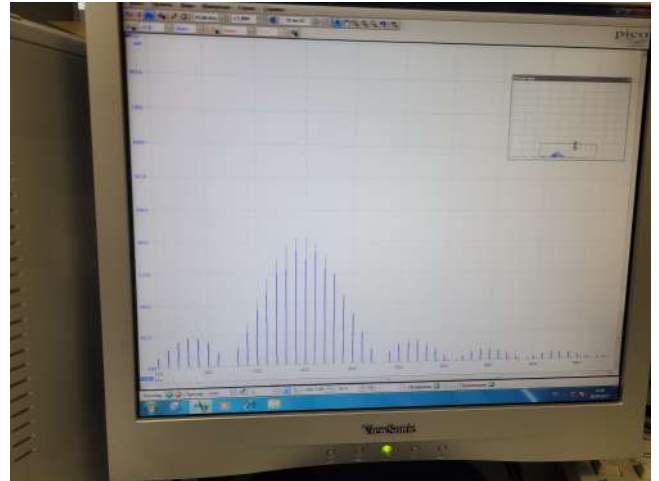
$$\Delta\nu \cdot \tau = 10 \cdot 10^3 \frac{5}{50 \cdot 10^3} = 5 \cdot 10^3 \frac{10}{50 \cdot 10^3} = 2.5 \cdot 10^3 \frac{20}{50 \cdot 10^3} \approx 3 \cdot 10^3 \frac{15}{50 \cdot 10^3} \approx 1$$

Видим, что спектр остаётся симметричным относительно одной и той же точки, однако "сжимается" к ней при увеличении  $N$ .

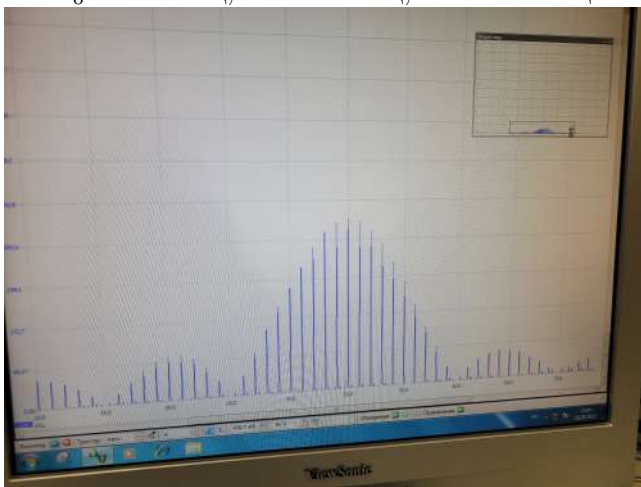
б. Изменяем  $\nu_0$  при фиксированных  $N = 5$  и  $\nu_{\text{повт}} = 1$  кГц:



$\nu_0 = 30$  кГц,  $\delta\nu = 1$  кГц,  $\Delta\nu = 6$  кГц



$\nu_0 = 40$  кГц,  $\delta\nu = 1$  кГц,  $\Delta\nu = 8$  кГц



$\nu_0 = 50$  кГц,  $\delta\nu = 1$  кГц,  $\Delta\nu = 10$  кГц

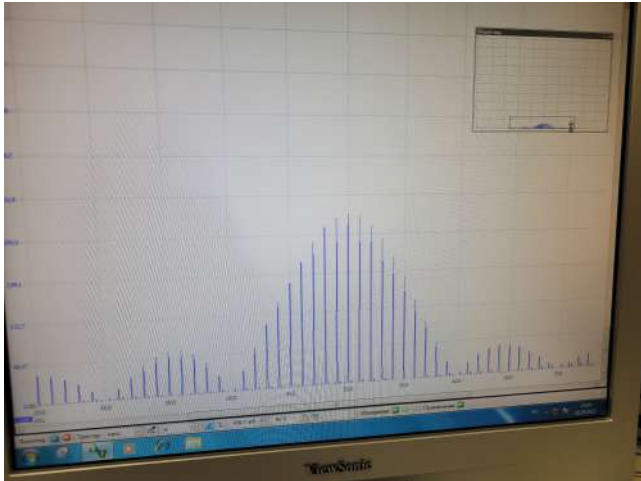
Рис. 15:

Соотношение неопределённостей:

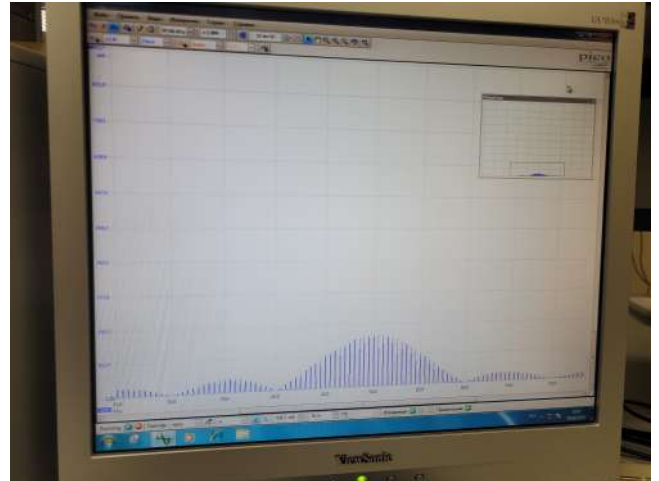
$$\Delta\nu \cdot \tau = 6 \cdot 10^3 \frac{5}{30 \cdot 10^3} = 8 \cdot 10^3 \frac{5}{40 \cdot 10^3} = 10 \cdot 10^3 \frac{5}{50 \cdot 10^3} = 1$$

Видим, что в этом случае спектр не меняет свою форму, однако его центр смещается в соответствии с изменением частоты несущей.

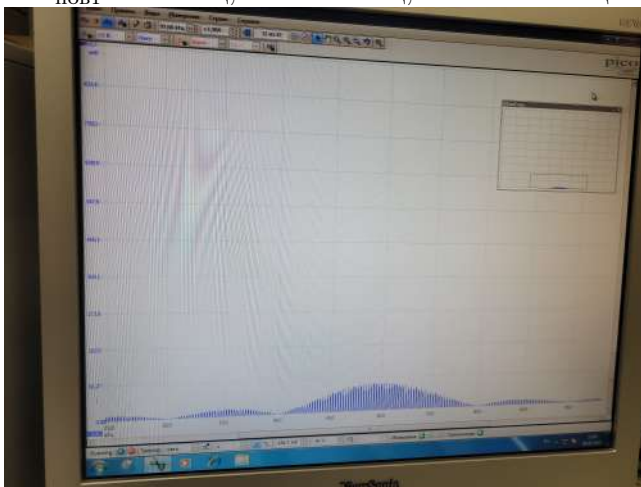
в. Изменяем  $\nu_{\text{повт}}$  при фиксированных  $N = 5$  и  $\nu_0 = 50$  кГц:



$\nu_{\text{повт}} = 1$  кГц,  $\delta\nu = 1$  кГц,  $\Delta\nu = 10$  кГц



$\nu_{\text{повт}} = 0.5$  кГц,  $\delta\nu = 0.5$  кГц,  $\Delta\nu = 10$  кГц



$\nu_{\text{повт}} = 0.25$  кГц,  $\delta\nu = 0.25$  кГц,  $\Delta\nu = 10$  кГц

Рис. 16:

Видно, что соотношение неопределённости выполняется:

$$\frac{\delta\nu}{\nu_{\text{повт}}} = \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} = \frac{0.5 \cdot 10^3}{0.5 \cdot 10^3} = \frac{0.25 \cdot 10^3}{0.25 \cdot 10^3} = 1$$

Также видно, что при стремлении частоты повторения к нулю, стремится к нулю и расстояние между компонентами спектра.

## В. Наблюдение спектра периодической последовательности гауссианов

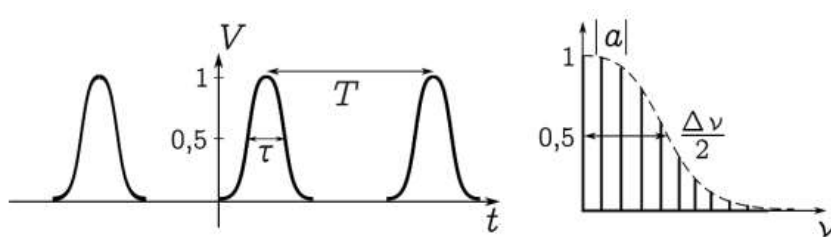
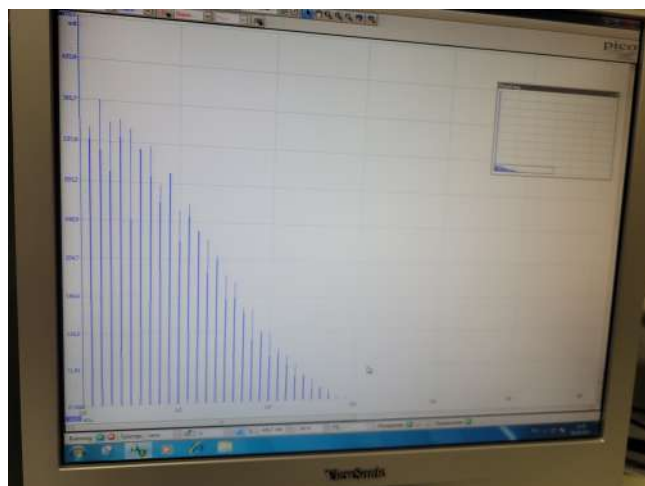
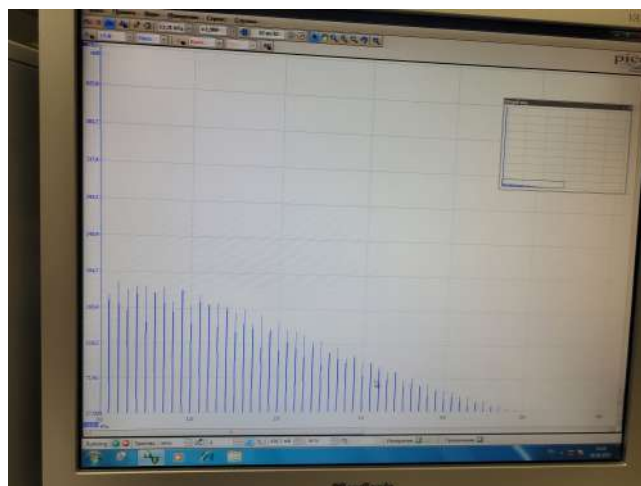


Рис. 17: Периодическая последовательность гауссианов и ее спектр

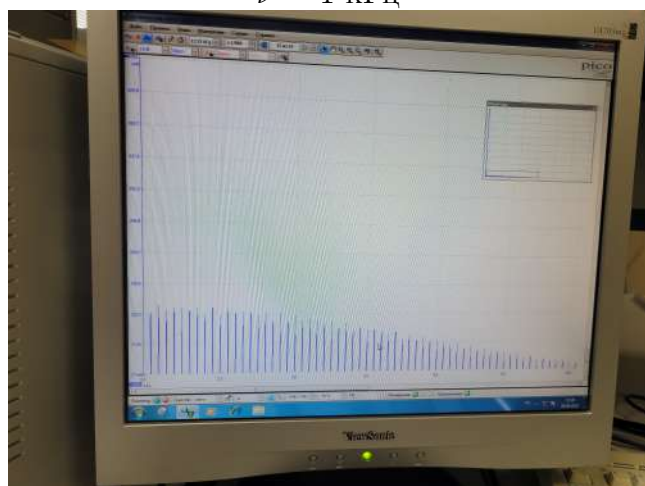
1. Настраиваем генератор в режим передачи периодической последовательности "гауссианов" с несущей частотой  $\nu_0 = 50$  кГц и периодом повторения  $T = 10$  мс.
2. Получаем на экране спектр (Преобразование Фурье) сигнала.
  - а. Изменяем  $\nu_0$  при фиксированных  $T = 10$  мс.



$\nu = 1$  кГц



$\nu = 2$  кГц

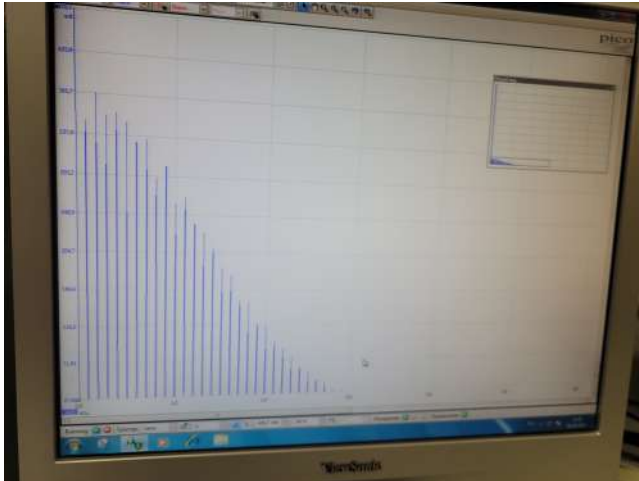


$\nu = 1$  МГц

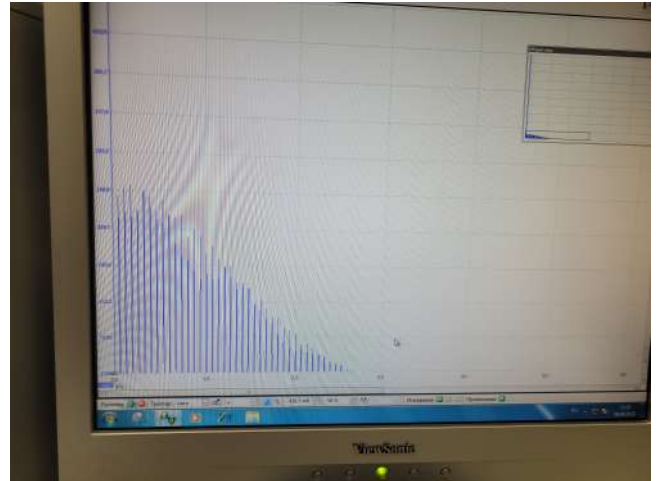
Рис. 18:



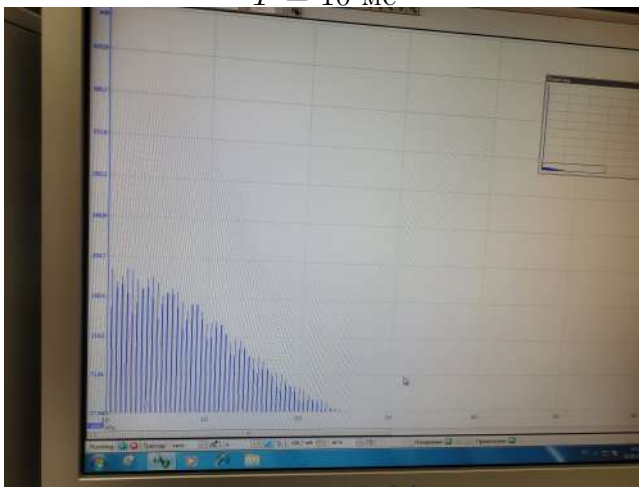
б. Изменяем  $T$  при фиксированных  $\nu_0 = 1$  кГц.



$T = 10$  мс



$T = 15$  мс



$T = 20$  мс

Рис. 19:

3. Найдём ширину отдельного импульса  $\tau$  и его спектра  $\Delta\nu$ :

$\nu$ , кГц	1	2
$\tau$ , мкс	299.5	148.2
$\frac{\Delta\nu}{2}$ , кГц	1.403	2.906

Таблица 3:

Видно, что соотношение неопределённости выполняется, но численное значение отличается :

$$\Delta\nu \cdot \tau = 1.403 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 299.5 \cdot 10^{-6} = 0.84$$

$$\Delta\nu \cdot \tau = 2.906 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 148.2 \cdot 10^{-6} = 0.86$$



## Г. Наблюдение спектра амплитудно-модулированного сигнала

1. Настраиваем генератор в режим модулированного по амплитуде синусоидального сигнала с несущей частотой  $\nu_0 = 50$  кГц, частотой модуляции  $\nu_{\text{мод}} = 2$  кГц и глубиной модуляции  $m = 0.5$ .
2. Получаем на экране спектр (Преобразование Фурье) сигнала. Из графика получим  $A_{\text{max}} = 3.057$  мВ и  $A_{\text{min}} = 1.027$  мВ и убедимся в справедливости соотношения

$$m = \frac{A_{\text{max}} - A_{\text{min}}}{A_{\text{max}} + A_{\text{min}}} = \frac{2.03}{4.084} \approx 0.5$$

Поскольку мы установили глубину модуляции на 0,5, а из теории у нас получилась 0,497, то мы видим, что формула ?? верна.

3. Изменяя на генераторе глубину модуляции  $m$  в диапазоне от 10 % до 100 % (всего 6-8 точек), измерим отношение амплитуд боковой и основной спектральных линий  $a_{\text{бок}}/a_{\text{осн}}$ . Построим график зависимости  $a_{\text{бок}}/a_{\text{осн}}$  от  $m$  и проверим, совпадает ли результат с теоретическим.

$m, \%$	10	20	30	40	50	80	100
$a_{\text{бок}}, \text{ мВ}$	69.02	136.3	207.1	283.2	352.2	559.2	669.0
$a_{\text{осн}} = 1318 \text{ мВ}$							
$a_{\text{бок}}/a_{\text{осн}}$	0.05	0.10	0.16	0.21	0.27	0.42	0.51

Таблица 3. Исследование зависимости  $a_{\text{бок}}/a_{\text{осн}}$  от  $m$ .

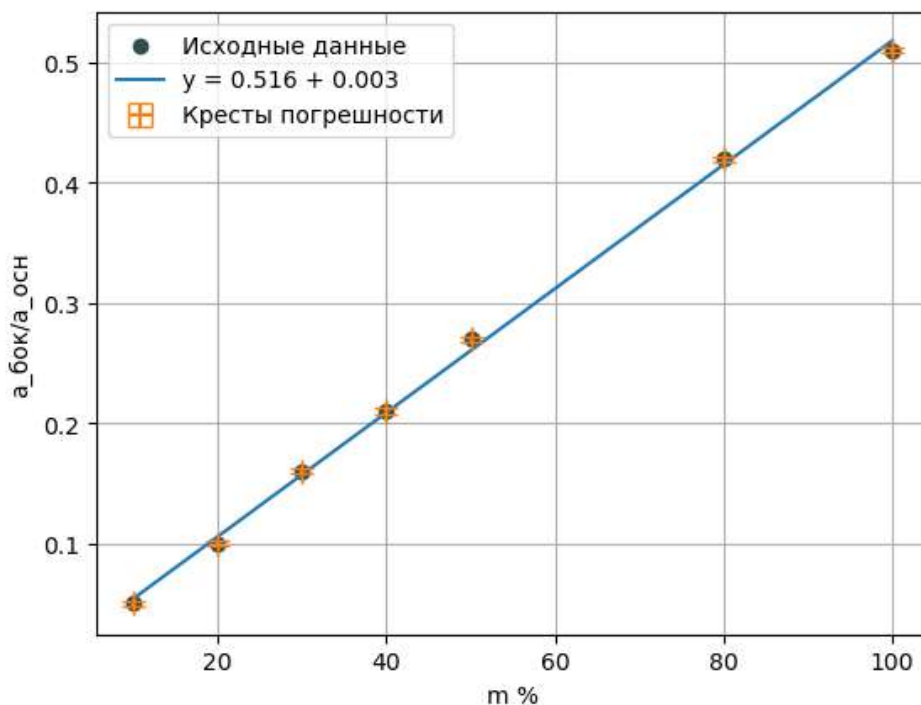
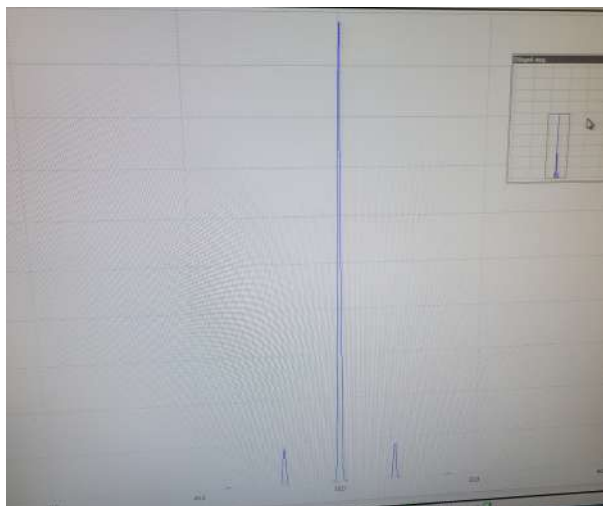


Рис. 20: Зависимость  $a_{\text{бок}}/a_{\text{осн}}$  от  $m$

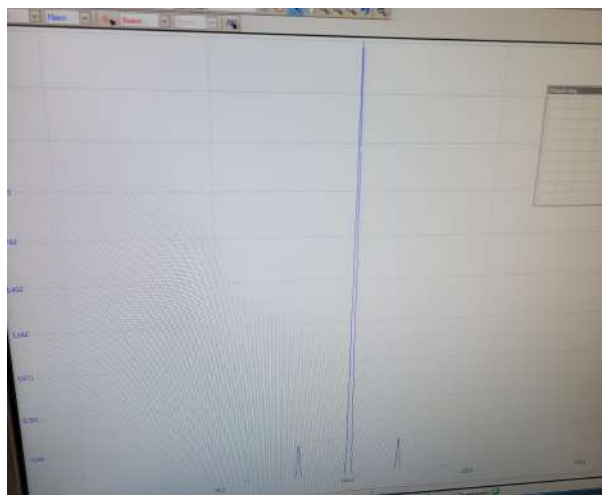
Построим график  $\frac{a_{\text{бок}}}{a_{\text{осн}}}(m)$ . Используя МНК, получим  $k = 0.516x \pm 0,00007$ , что подтверждает  $\frac{a_{\text{бок}}}{a_{\text{осн}}} = \frac{m}{2}$ , т.е. совпадает с теоретическим предсказанием. График приведён на рис.??.

## Д. Наблюдение спектра сигнала, модулированного по фазе

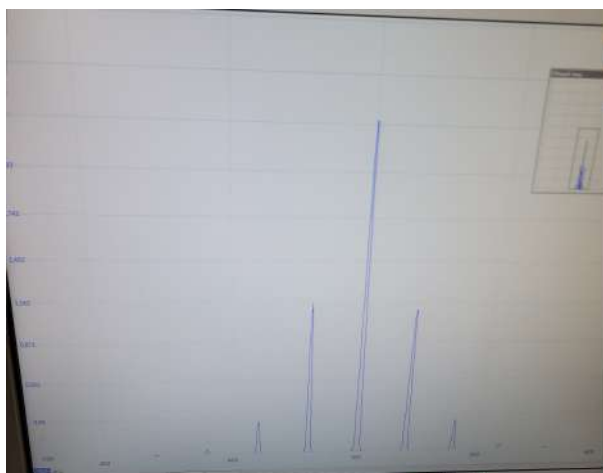
1. Настраиваем генератор в режим модулированного по фазе синусоидального сигнала с несущей частотой  $\nu_0 = 50$  кГц, частотой модуляции  $\nu_{\text{мод}} = 2$  кГц и максимальным отклонением (глубиной модуляции)  $\varphi = 10^\circ$ .
2. Получаем на экране спектр (Преобразование Фурье) сигнала.



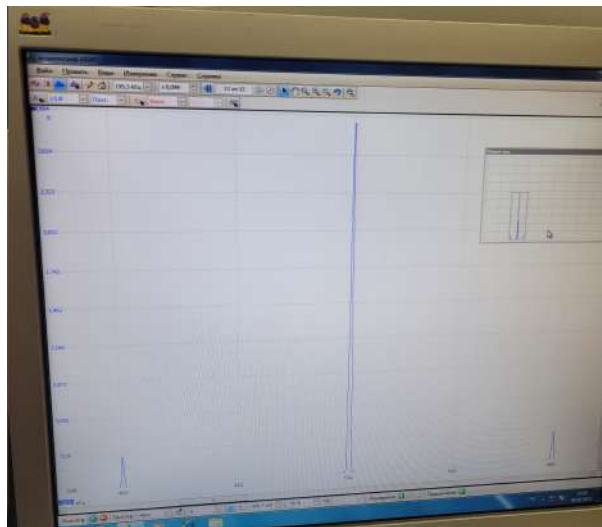
$\nu_0 = 50$  кГц,  $\nu_{\text{мод}} = 2$  кГц,  $\varphi = 10^\circ$



$\nu_0 = 100$  кГц,  $\nu_{\text{мод}} = 2$  кГц,  $\varphi = 10^\circ$

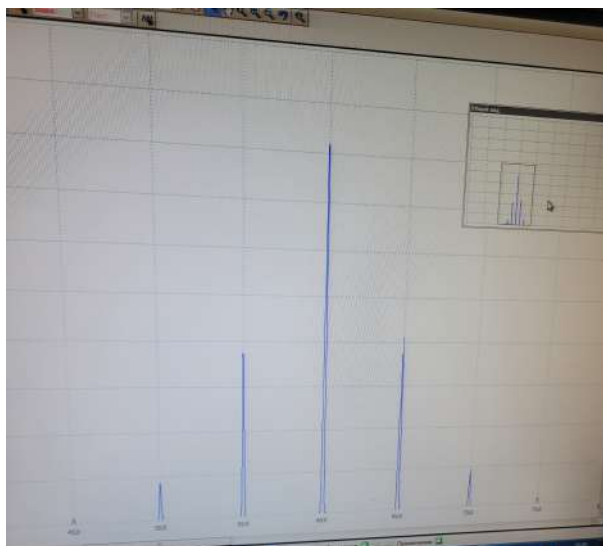


$\nu_0 = 50$  кГц,  $\nu_{\text{мод}} = 2$  кГц,  $\varphi = 50^\circ$



$\nu_0 = 50$  кГц,  $\nu_{\text{мод}} = 10$  кГц,  $\varphi = 10^\circ$

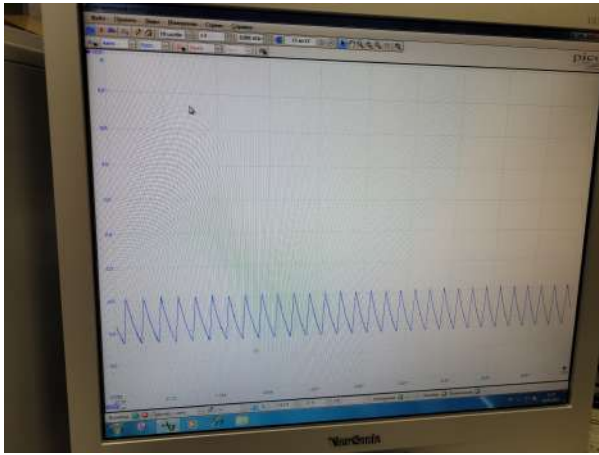
Рис. 21:



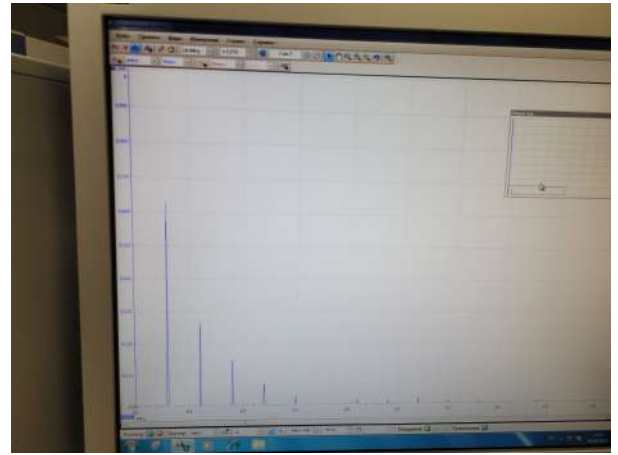
$$\nu_0 = 60 \text{ кГц}, \nu_{\text{мод}} = 5 \text{ кГц}, \varphi = 50^\circ$$

## Е. Изучение фильтрации сигналов

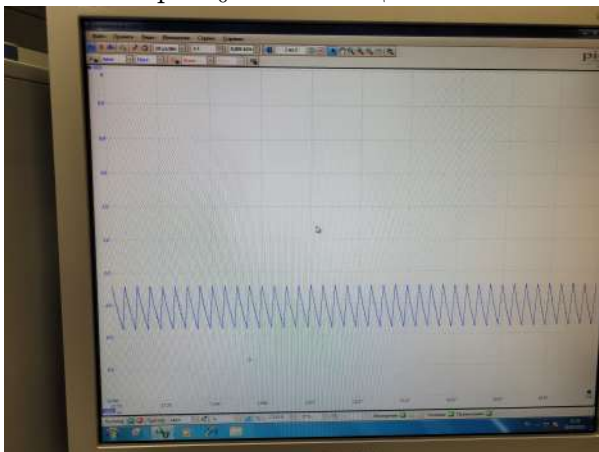
1. Подключаем  $RC$  цепочку с сопротивлением  $R = 3$  кОм и ёмкостью  $C = 1000$  пФ. Получаем характерное время  $\tau_{RC} = RC = 3$  мкс. Подаём на вход  $RC$ -цепочки последовательность прямоугольных импульсов с периодом повторения  $T \sim \tau_{RC}$ .
2. Получаем на экране спектр (Преобразование Фурье) сигнала.



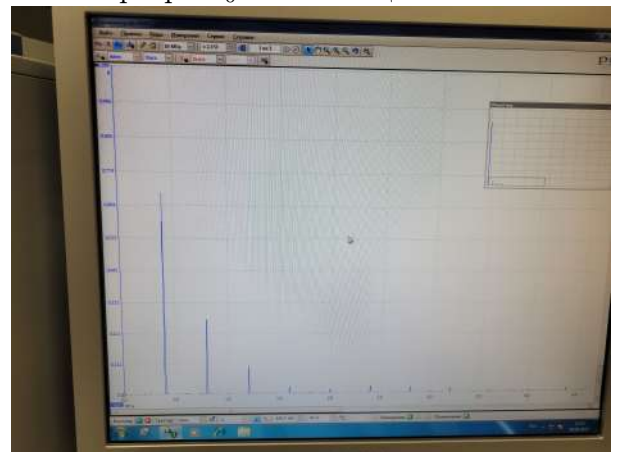
Сигнал при  $\nu_0 = 300$  кГц и  $\tau = 510$  нс.



Спектр при  $\nu_0 = 300$  кГц и  $\tau = 510$  нс.



Сигнал при  $\nu_0 = 400$  кГц и  $\tau = 510$  нс.



Спектр при  $\nu_0 = 400$  кГц и  $\tau = 510$  нс.

Рис. 22:

3. При фиксированной частоте  $\nu = 300$  кГц проведем измерения отношений амплитуд соответствующих спектральных гармоник (для 7–9 гармоник) фильтрованного и исходного сигналов:  $K_n = |a_n^\Phi|/|a_n^0|$ . Для измерения амплитуд  $a_n^0$  спектра исходного сигнала переподключим генератор к осциллографу напрямую.

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a_n^\Phi$ , мВ	695.0	295.4	166.6	82.17	27.76	0	15.55	12.28	19.15
$a_n^0$ , мВ	4452	3768	3151	1991	891	0	647	897	1008
$K_n =  a_n^\Phi / a_n^0 $	0.156	0.078	0.0529	0.041	0.031	?	0.024	0.014	0.019

Таблица 4:

Построим график зависимости амплитудного коэффициента фильтрации  $K(\nu)$  от частоты  $\nu = n\nu_0$ .

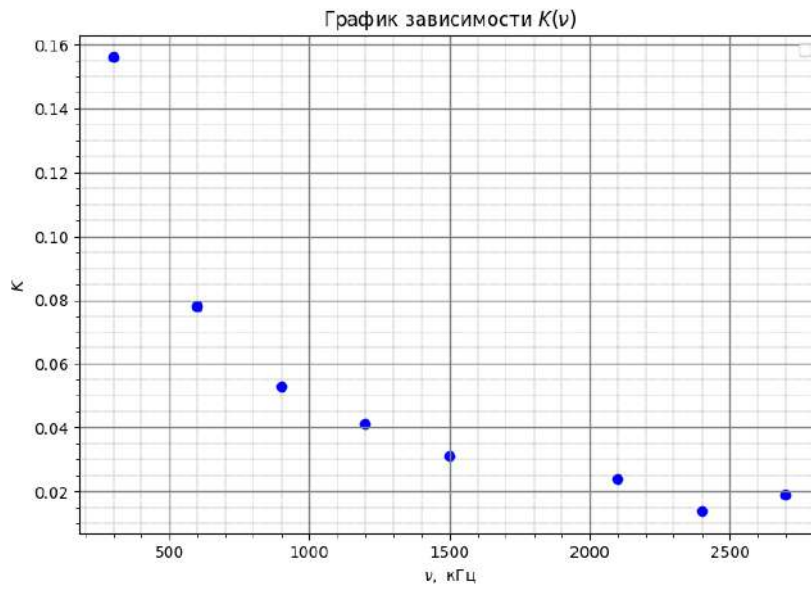


Рис. 23: Зависимость  $K(\nu)$

Проверим, что экспериментальная зависимость совпадает с теоретической  $K = \frac{1}{\tau_{RC}} \int_0^t f(t') dt'$ . Т.к. мы подаём последовательность прямоугольных импульсов, то правая часть зависит линейно от  $t$ , т.е. обратно пропорционально  $\nu$ . График соответствует этой зависимости

## 5 Обсуждение результатов и выводы

В данной работе мы изучили понятие спектра и спектрального анализа, исследовали спектральный состав периодических электрических сигналов, а точнее прямоугольных импульсов, цугов гармонических колебаний, гауссиан, гармонических сигналов, модулированных по амплитуде и частоте, а также проанализировали фильтрацию сигналов при прохождении их через  $RC$  контур. Проверили частный случай выполнения соотношения неопределённости.