

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
Московский физико-технический институт (государственный университет)  
Физтех-школа ЛФИ  
Работа 3.6.1-А  
**Спектральный анализ электрических сигналов**  
  
**Семёнов Андрей**  
**20 ноября 2021 г.**

**Цель работы:** изучение спектров различных периодических электрических сигналов

**В работе используется:** персональный компьютер; USB-осциллограф АКИП-4107; функциональный генератор WaveStation 2012; соединительные кабели.

## 1 Экспериментальная установка

В работе изучаются спектры периодических электрических сигналов различной формы (последовательности прямоугольных импульсов и цугов, а также амплитудно- и фазомодулированных гармонических колебаний). Спектры этих сигналов наблюдаются с помощью спектроанализатора, входящего в состав USB-осциллографа и сравниваются с расчетными теоретически.

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 A, а сигнал с канала CH2 - на вход B 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.

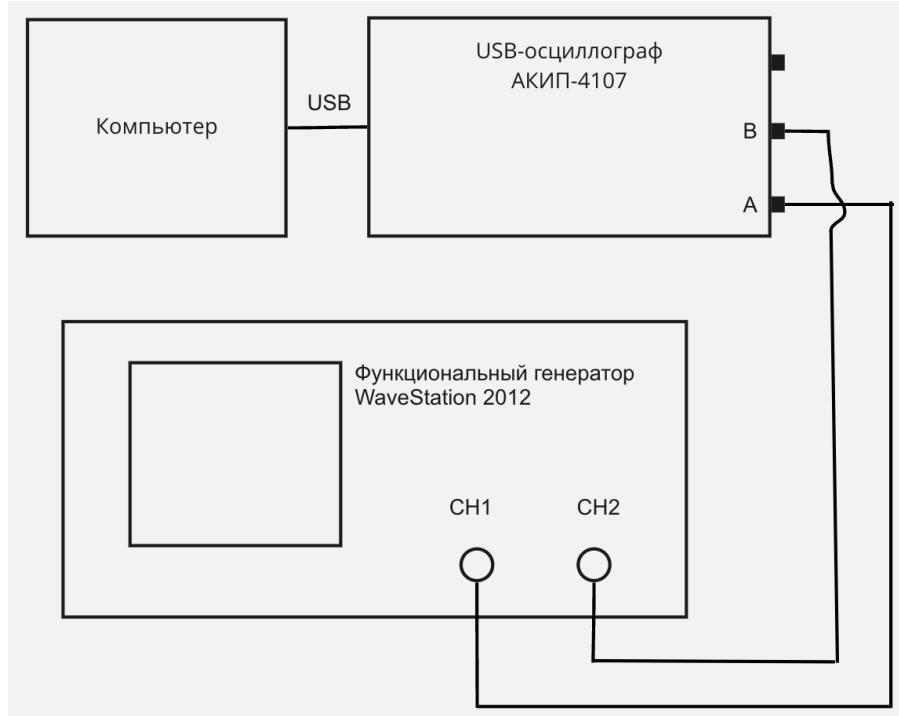


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

## 2 Задание

### I. Подготовка приборов к работе

1. Проверим соединение блоков экспериментальной установки. Все соединено согласно рис.1. Включим компьютер и функциональный генератор.
2. Запустим программу PicoScope6. В центре экрана можем наблюдать электрические сигналы, поступающие на USB-осциллограф, а также кнопки управления. Программа может работать в режиме осциллографа и спектроанализатора.
3. Нажмем кнопки **Output** над разъемами CH1 и CH2.
4. Установим запуск развёртки по сигналу с канала A согласно инструкции.

### II. Исследование спектра последовательности прямоугольных импульсов

5. На генераторе кнопкой **CH1/2** выберем вкладку для канала CH1 и нажмем кнопку **Pulse** (импульсный сигнал). На экранном меню генератора установим а) **Ampl** : 1 Vpp (разность минимального и максимального значений в 1 В); б) **Offset** : 0.5 Vdc (смещение сигнала на 0.5 В); в) **Freq** : 1kHz (частота повторений импульсов  $f_{\text{повт}} = 1$  kHz); г) **PulseWidth** : 100  $\mu$ s (длительность импульса  $\tau = 100$  мкс).

6. В окне программы выберем режим "Спектр" затем в окне "Параметры спектра" установим а) "Масштаб": линейный; б) "Элементы разрешения спектра": 2048. Установим удобный для нас масштаб.
7. Проанализируем, как меняется спектр. На рис.2. мы можем видеть часть спектра волны, которую мы задали в предыдущем пункте на генераторе. На этом рисунке обозначено, что такое  $\Delta\omega_T$  (расстояние между соседними спектральными пиками) и  $\Delta\omega_\tau$  (характерная ширина спектра). На рис. 3 виден весь масштаб. На рис. 4 и 5 изображены спектры импульсных сигналов при других параметрах.

На таблице 1 указаны измеренные значения  $\Delta\omega_T$  и  $\Delta\omega_\tau$  в зависимости от  $f_{\text{повт}}$  и  $\tau$ . Погрешность измерения  $\sigma\Delta\omega_\tau = 2 \text{ kHz}$ ,  $\sigma\Delta\omega_T = 0.2 \text{ kHz}$  (измерение проводилось методом рядов). Т а б л и ц а 1

$f_{\text{повт}}, \text{ kHz}$	$\tau, \text{ мкс}$	$\Delta\omega_T, \text{ kHz}$	$\Delta\omega_\tau, \text{ kHz}$
1	100	1	20
1	200	1	10
2	100	2	20

8. Проведем измерение зависимости ширины спектра  $\Delta\omega_\tau$  от длительности импульса  $\tau$  (при  $f_{\text{повт}} = 1 \text{ kHz}$ ). Погрешность измерения  $\sigma\Delta\omega_\tau = 2 \text{ kHz}$ . Эта зависимость приведена в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

$\tau, \text{ мкс}$	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$\Delta\omega_\tau,$	50	36	25	20	16	14	12	11	10

9. Для  $f_{\text{повт}} = 1 \text{ кГц}$  установим  $\tau = 50 \text{ мкс}$ . Измерим значение амплитуды и частоты для каждой спектральной части составляющей сигнала. Результаты измерений приведены в таблице 3. ( $\Delta A = 1mB$ )

Т а б л и ц а 3

A, mV	157.8	67.75	65.2	62.11	57.4	55.52	55.21	54.19
n	0	1	2	3	4	5	6	7
$\omega$ , kHz	0	1	2	3	4	5	6	7
A, mV	47.76	43.05	38.03	32.39	26.82	22.74	19.53	15.53
n	9	10	11	12	13	14	15	16
$\omega$	9	10	11	12	13	14	15	16
A, mV	7.52	3.45	0.0	2.8	5.49	7.6	9.8	
n	18	19	20	21	22	23	24	
$\omega$ , kHz	18	19	20	21	22	23	24	

Проведем аналогичные измерения для  $\tau = 50$  мкс. Измерения приведены в таблице 4.

Т а б л и ц а 4

A, mV	255.3	133.9	124.8	110.7	92.8	78.7	64.3	48.6	31.3	14.1
n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\omega$ , kHz	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A, mV	11.7	19.5	23.7	26.7	27.4	24.9	20.7	14.1	7.0	0.0
n	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\omega$ , kHz	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Из теории мы знаем, что спектр импульса должен быть по закону

$$A(\omega) = \frac{\tau}{T} \cdot \frac{\sin \omega \tau / 2}{\omega \tau / 2} \quad (1)$$

Построим картины спектров на графике (рис.6 и рис. 7), и на том же самом графике изобразим теоретические предположения.

Расхождение в нулевой гармонике возможно вызвано глобальным сдвигом сигнала.

- Построим график  $\Delta\nu_1/(\tau)$  (рис. 8).

Угол наклона примерно равен  $k = 2 \pm 0.002$ , что совпадает с теорией.

- В окне программы нажмем - режим "Оscиллограф". На генераторе кнопкой CH1/2 выберем вкладку для канала "CH2" и нажмем кнопку Sine (синусоидальный сигнал). Кнопками 4 экранного меню (рис. 3) установим: а) Ampl : 2 Vpp (двойная амплитуда сигнала 2 В); б) Offset : 0 Vdc (смещение сигнала отсутствует); в) Freq : 25 kHz (частота несущей  $\nu_0 = 25$  кГц).

12. В окне программы включим канал "В" щелкнув в верхней части экрана и заменив значение "Выкл" на "Авто". Нажмем кнопку 7 - "Автоматическая настройка".
13. На генераторе кнопкой CH1/2 выберем вкладку для канала "CH1" и нажмем кнопку Pulse (импульсный сигнал). Кнопками 4 экранного меню (рис. 3) установим: а) Ampl : 1 Vpp (разность максимального и минимального значений сигнала 1 В); б) Offset : 0.5 Vdc (смещение сигнала на 0.5 В); в) Freq : 1 kHz (частота повторения импульсов  $f_{\text{повт}} = 1 \text{ кГц}$ ); г) PulWidth : 100  $\mu\text{s}$  (длительность импульса  $\tau = 100 \text{ мкс}$ ).
14. В окне программы выберем в меню: "Сервис" > "Математические каналы" выделим пункт, соответствующий произведению "A\*B" и нажмем "Ок". Выберем в меню: "Виды" > "Каналы" выделим пункт, соответствующий произведению "A\*B" с пунктов "A" и "B" выделение снимите. На экране должна быть видна периодическая последовательность щугов.
15. В окне программы нажмем режим "Спектр" и включим канал "В" щелкнув в верхней части экрана справа от кнопки заменив значение "Выкл" на "Авто". Выберем в меню: "Сервис" > "Математические каналы" выделим пункт, соответствующий произведению "A+B" и нажмем "Ок". Выберем в меню: "Виды" > "Каналы" выделим пункт, соответствующий произведению "A\*B" с пунктов "A" и "B" выделение снимем. В верхней части экрана установим масштаб по вертикальной оси "Авто" (справа от кнопки), а по горизонтальной оси "48,83 кГц". С помощью кнопки увеличим по вертикали изображение спектра. При нажатии на эту кнопку, а затем на область в пределах спектра, появляется окно "Общий вид". Опустите в этом окне прямоугольную рамку вниз и установите удобную для наблюдения спектра ее высоту и ширину.
16. Проанализируем, как изменяется вид спектра при увеличении длительности импульса вдвое от 100 до 200 мкс (рис. 9). При увеличении  $\tau$  уменьшается  $\Delta\omega_T \tau$ .
17. Установим длительность импульса  $\tau = 100 \text{ мкс}$ . Кнопкой CH1/2 выберем вкладку для канала "CH2". Проследим, как меняется картина спектра при изменении несущей частоты  $\nu_0$  ( $\nu_0 = 10, 25 \text{ и } 40 \text{ кГц}$ ). (рис. 10, рис. 11, рис. 12)
18. Установите частоту несущей  $\nu_0 = 30 \text{ кГц}$ . Кнопкой CH1/2 выберем вкладку для канала "CH1". Установим длительность импульса  $\tau = 100 \text{ мкс}$ , Определим расстояние  $\Delta\omega_T$  между соседними спектральными компонентами для разных частот повторения импульсов  $f_{\text{повт}}$  ( $\sigma\Delta\omega_T = 0.5 \text{ Гц}$ ). Данные отражены на таблице 5.

Т а б л и ц а 5

$\Delta\omega_T$ , Гц	0.5	1	2	3	4	5
$f_{\text{повт}}$ , Гц	0.5	1	2	3	4	5

Коэффициент наклона  $k = 1.0 \pm 0.1$ , что согласуется с теорией.

19. Установим  $\tau = 100$  мкс и  $f_{\text{повт}} = 1$  кГц. Измерим значение амплитуды и частоты для каждой спектральной части составляющей сигнала. Результаты измерений приведены в таблице 6. ( $\Delta A = 1mB$ )

Т а б л и ц а 6

A, мВ	8.2	16.4	20.2	22.2	23.6	25.1	23.1	17.3	9.1	0.0		
n	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0		
$\omega$ , kHz	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0		
A, мВ	0.0	9.6	17.3	23.4	28.9	33.8	35.7	33.0	25.3	14.2	0.0	14.9
n	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0
$\omega$ , kHz	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0
A, мВ	47.5	68.5	89.3	106.7	119.3	126.3	126.8	170.6	105.9	104.4	100.6	91.4
n	23.0	24.0	25.0	26.0	27.0	28.0	29.0	30.0	31.0	32.0	33.0	34.0
$\omega$ , kHz	23.0	24.0	25.0	26.0	27.0	28.0	29.0	30.0	31.0	32.0	33.0	34.0
A, мВ	59.5	42.7	25.3	11.1	0.0	8.6	15.7	20.0	23.1	21.4	18.8	13.7
n	36.0	37.0	38.0	39.0	40.0	41.0	42.0	43.0	44.0	45.0	46.0	47.0
$\omega$ , kHz	36.0	37.0	38.0	39.0	40.0	41.0	42.0	43.0	44.0	45.0	46.0	47.0

Аналогичные измерения для  $f_{\text{повт}} = 2$  кГц (таблица 7).

Т а б л и ц а 7

A, мВ	0.0	59.8	137.4	213.5	251.2	287.9	209.6	182.6	121.7	51.2	0.0
n	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0
$\omega$ , kHz	20.0	22.0	24.0	26.0	28.0	30.0	32.0	34.0	36.0	28.0	40.0

На рис. 13 и рис. 14 изображены картины спектров

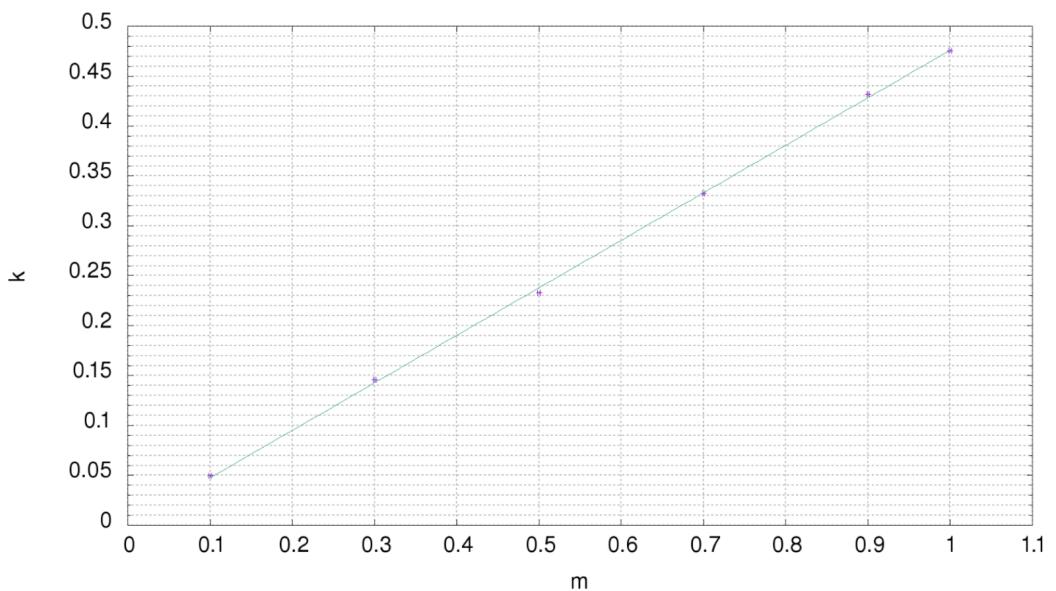
- Построим график  $\Delta\omega_T(f_{\text{повт}})$  (рис. 15). Угловой коэффициент посчитан в п.18
- а) Не меняется расстояние между пиками, меняется характерная ширина спектра  
б) Не меняется расстояние между пиками, меняется характерная ширина спектра в)  
Меняется расстояние между пиками, спектр сдвигается
- В окне программы нажмем режим "Оscиллограф". Выберем в меню: "Виды> "Каналы выделим пункт, соответствующий произведению "A\*B" и пункт "A".

4. На генераторе кнопкой CH1/2 выберем вкладку для канала "CH2" и нажмем кнопку Sine (синусоидальный сигнал). Кнопками 4 экранного меню (рис. 3) установим: а) Ampl : 1 Vpp (двойная амплитуда сигнала 1 В); б) Offset : 0 Vdc (смещение сигнала отсутствует); в) Freq : 25 kHz (частота несущей  $\nu_0 = 25$  кГц).
5. Кнопкой CH1/2 выберите вкладку для канала "CH1" и нажмите кнопку Sine. Кнопками 4 экранного меню (рис. 3) установите: а) Offset : 1 Vdc (смещение сигнала на 1 В); б) Freq : 1 kHz (частота модуляции  $f_{\text{мод}} = 1$  кГц), в) Ampl : 0.2 Vpp (двойная амплитуда сигнала 0,2 В). Перемещая мышкой желтый квадратик маркера запуска (вблизи значения  $\approx 1$  В по вертикальной оси), получите на экране устойчивое изображение сигнала (Рис. 16).
6. В окне программы нажмем режим "Спектр". В верхней части экрана установим масштаб по вертикальной оси "Авто" (справа от кнопки ), а по горизонтальной оси "48,83 кГц". Нажмем кнопку "Выбор".
7. Меняя двойную амплитуду сигнала канала "CH1" от 0,2 до 2 В (возьмем 6 значений), измерим для каждого значения максимальную  $A_{\max}$  и минимальную  $A_{\min}$  амплитуды сигналов модулированного колебания (переключаясь на вкладку "Оscиллограф") и  $A_{\text{бок}}$ ,  $A_{\text{осн}}$  - амплитуды спектральных компонент (переключаясь на вкладку "Спектр"). Так же рассчитаем глубину модуляции  $m = (A_{\max} - A_{\min}) / (A_{\max} + A_{\min})$  и коэффициент  $k = A_{\text{бок}} / A_{\text{осн}}$ . Данные отображены на таблице 8.

$A_{\max} - A_{\min}$ , В	$A_{\text{бок}}$ , В	$m$	$k$
0.2	0.0160	0.1	0.0497
0.6	0.0470	0.3	0.1460
1.0	0.0750	0.5	0.2329
1.4	0.1070	0.7	0.3323
1.8	0.1390	0.9	0.4317
2.0	0.1530	1.0	0.4752

$$A_{\text{осн}} = (322 \pm 0.5) \text{ мВ}, \Delta A_{\text{бок}} = 0.5 \text{ мВ}, \Delta k = 0.0016$$

8. Построим график отношения  $k = A_{\text{бок}} / A_{\text{осн}}$  в зависимости от  $m$ . Определим угловой коэффициент наклона графика



Из графика

$$\frac{k}{m} = 0.476 \pm 0.015,$$

что сходится с теоретическим значением 0.5.

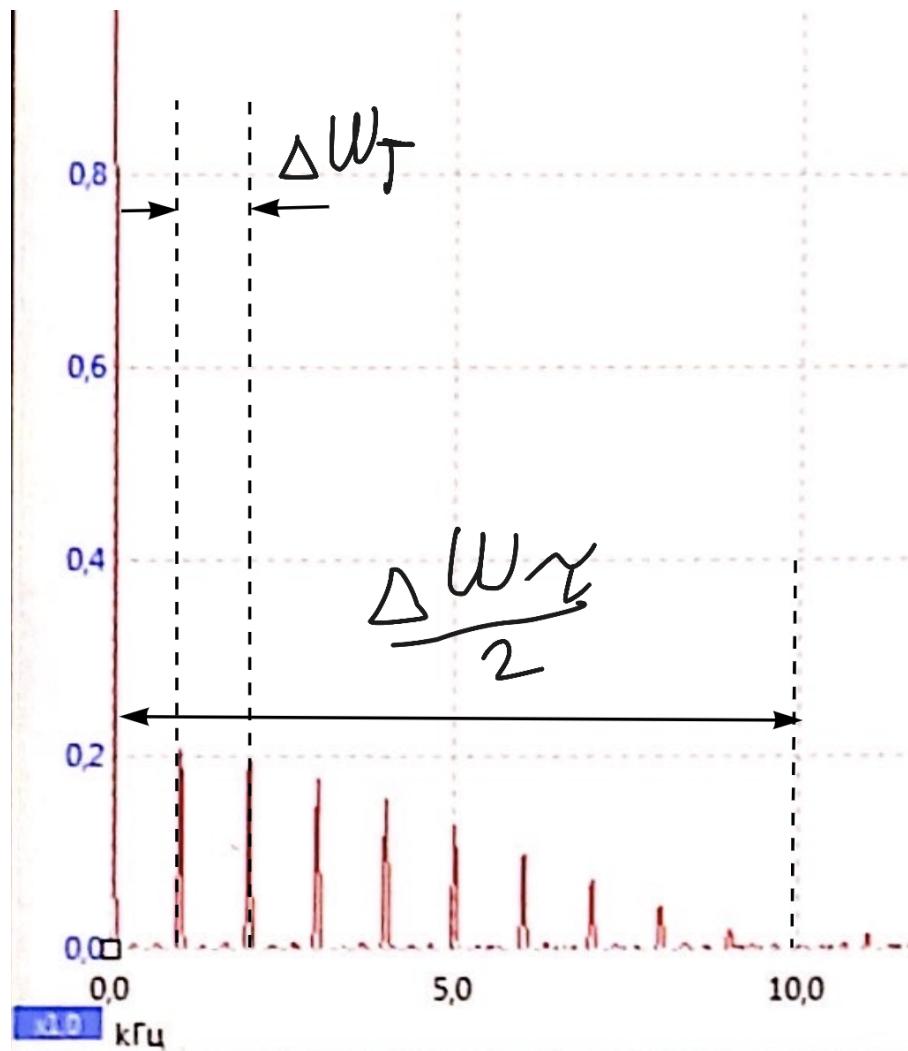


Рис. 2: Иллюстрация  $\Delta\omega_T$  и  $\Delta\omega_\tau$



Рис. 3: Спектр импульсного сигнала при  $f_{\text{повт}} = 1 \text{ kHz}$  и  $\tau = 100 \text{ мкс}$

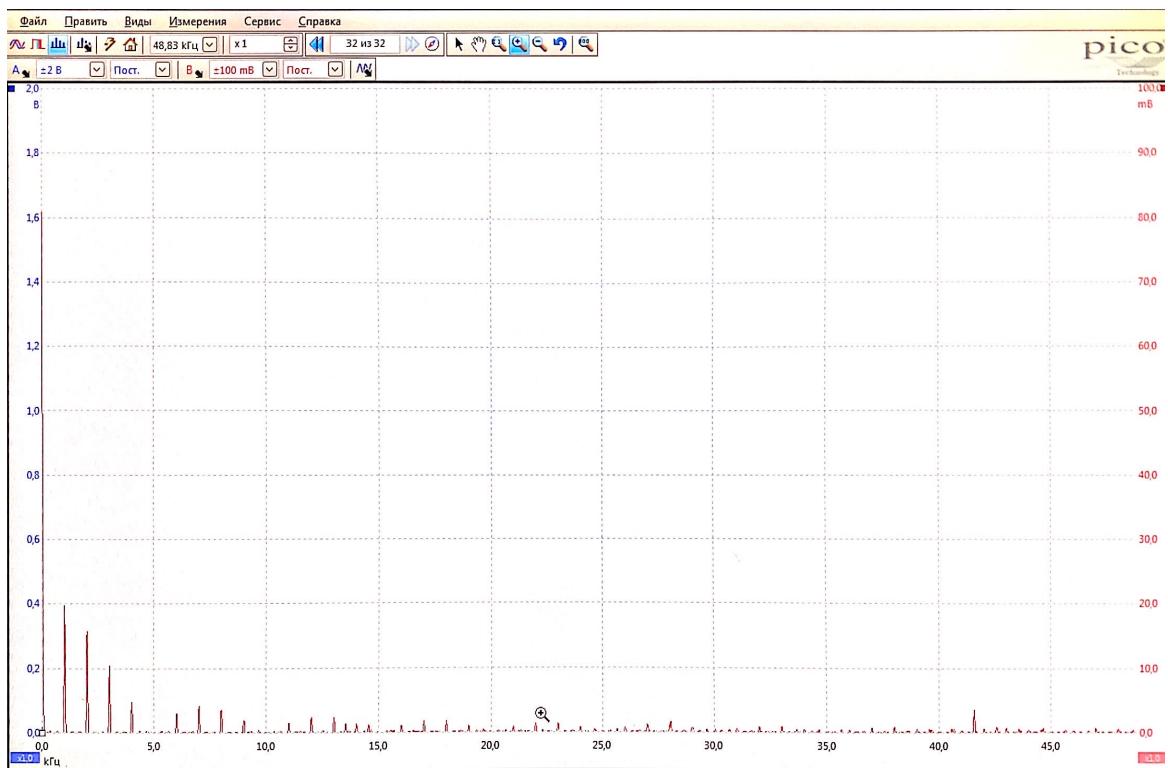


Рис. 4: Спектр импульсного сигнала при  $f_{\text{повт}} = 1 \text{ kHz}$  и  $\tau = 200 \text{ мкс}$

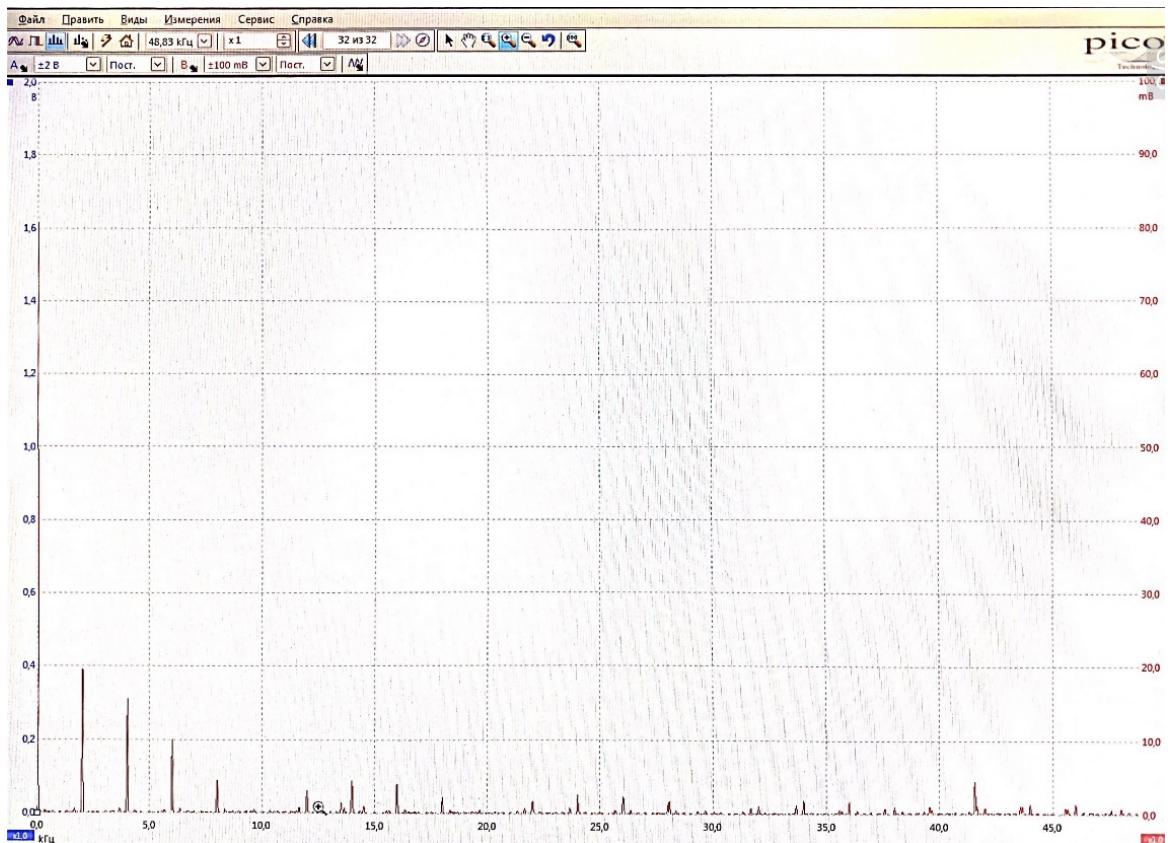


Рис. 5: Спектр импульсного сигнала при  $f_{\text{повт}} = 2 \text{ kHz}$  и  $\tau = 100 \text{ мкс}$

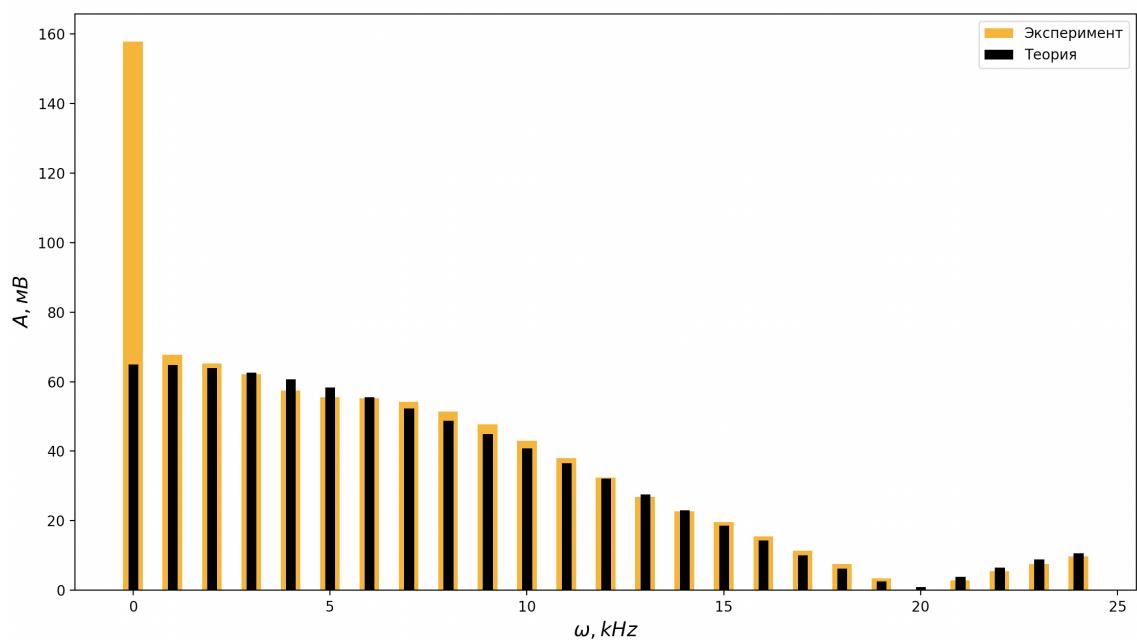


Рис. 6: Спектральная картина импульсного сигнала при  $f_{\text{повт}} = 1 \text{ kHz}$  и  $\tau = 50 \text{ мкс}$

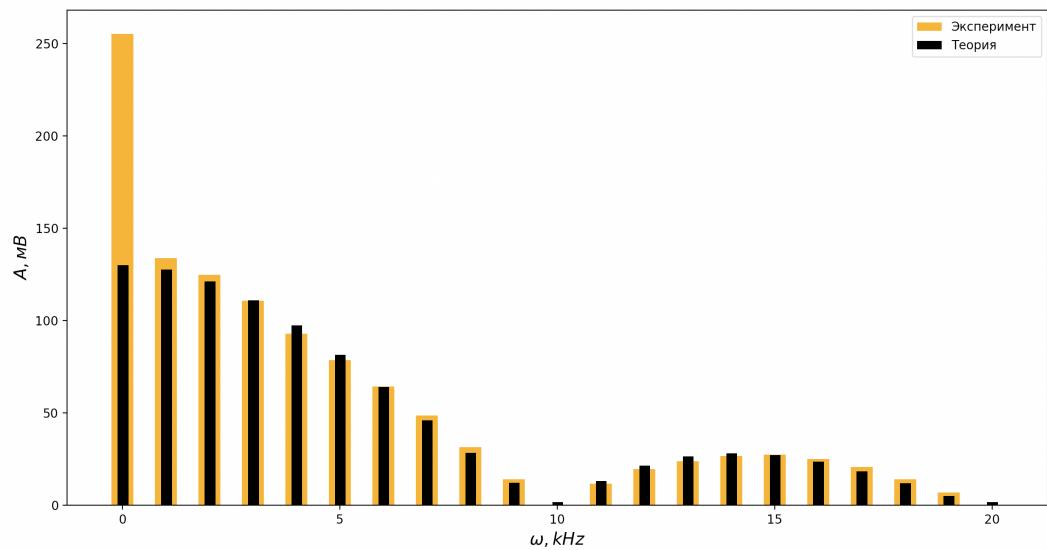


Рис. 7: Спектральная картина импульсного сигнала при  $f_{\text{повт}} = 1 \text{ kHz}$  и  $\tau = 100 \text{ мкс}$

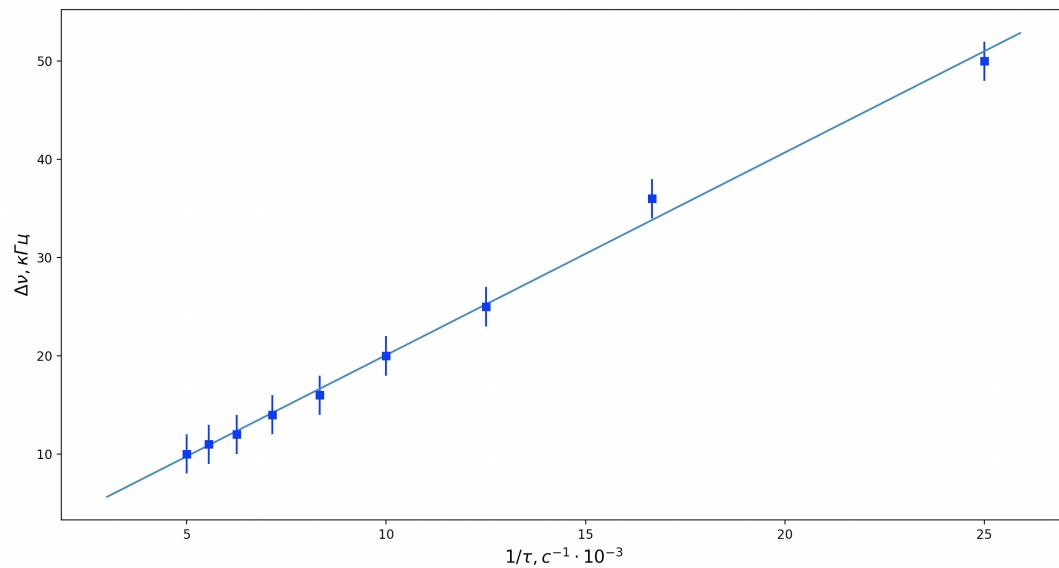


Рис. 8: График  $\Delta\nu(1/\tau)$

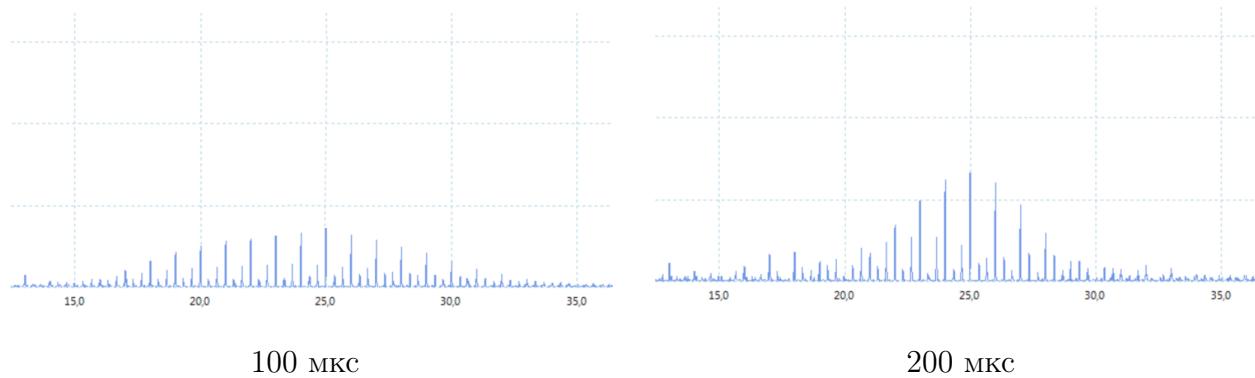


Рис. 9: Спектр цуга волн

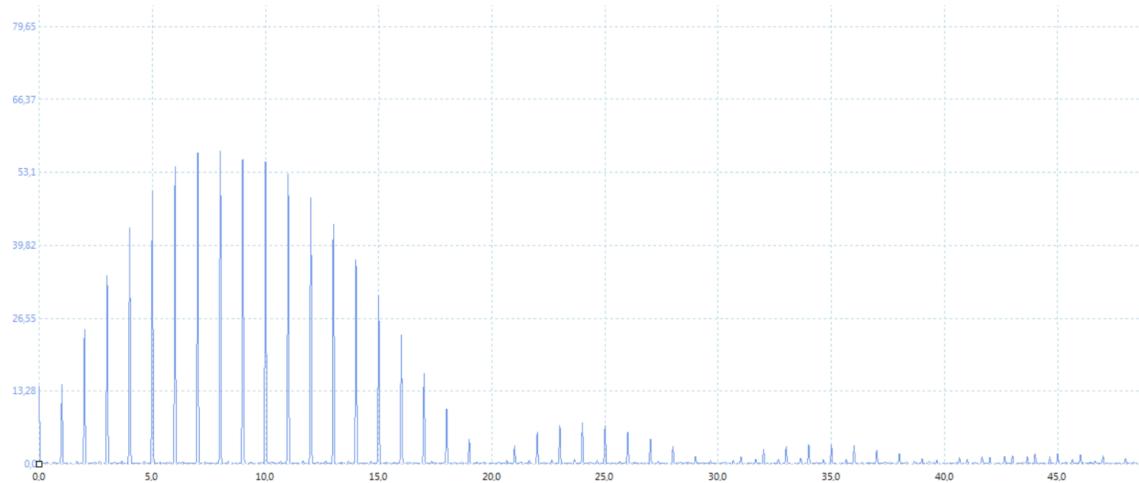


Рис. 10: Спектр цуга волн  $\nu_0 = 10$  Гц

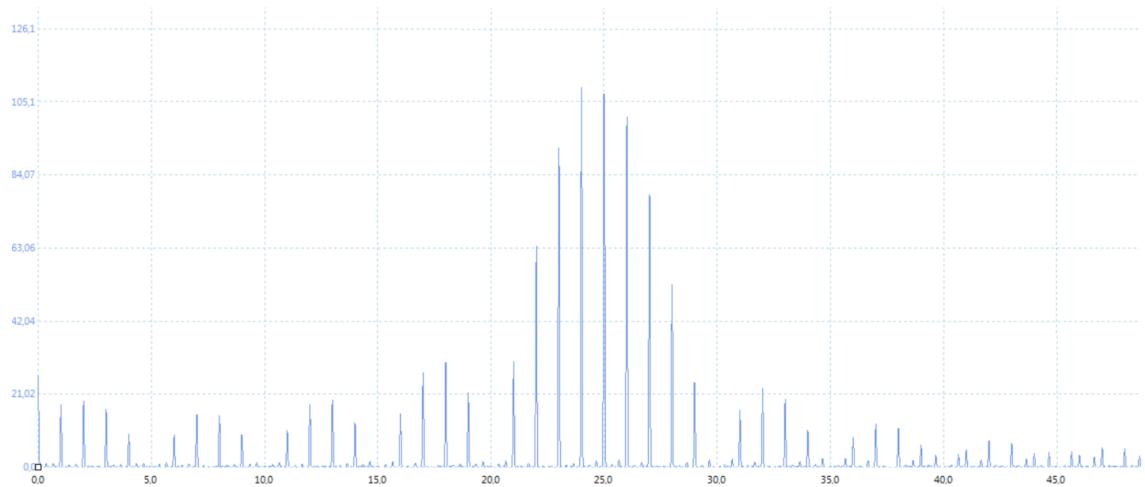


Рис. 11: Спектр цуга волн  $\nu_0 = 25$  Гц

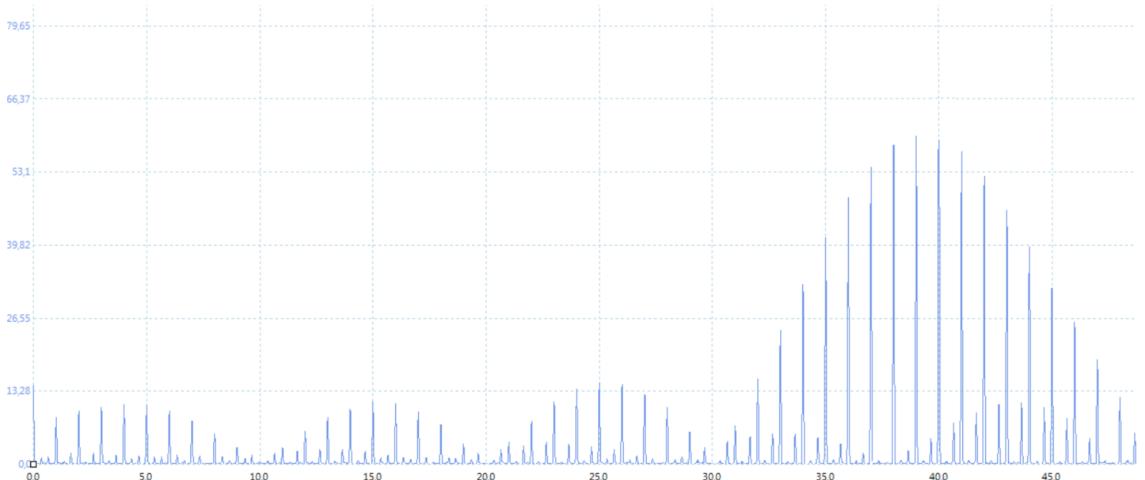


Рис. 12: Спектр цуга волн  $\nu_0 = 40$  Гц

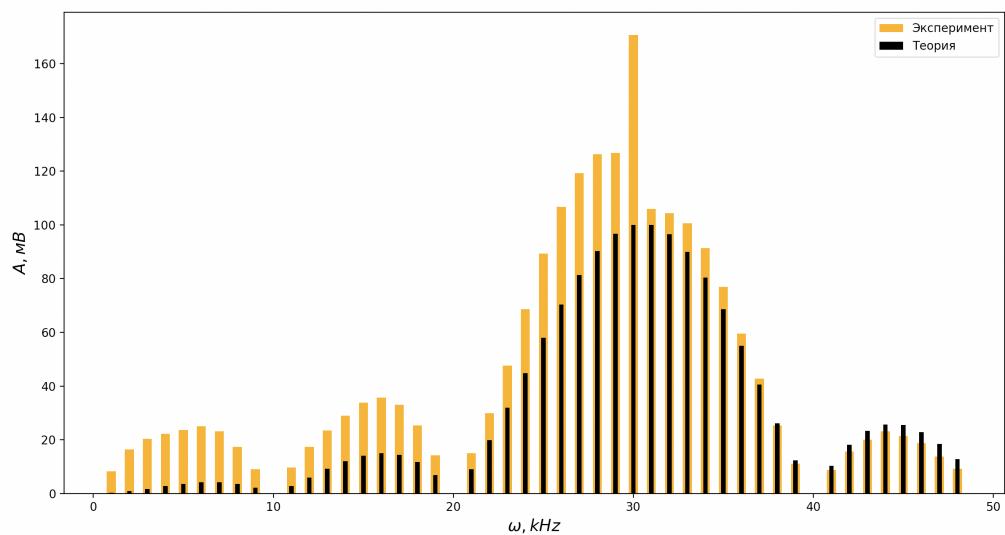


Рис. 13: Спектр цуга волн  $f_{\text{повт}}=1$  Гц

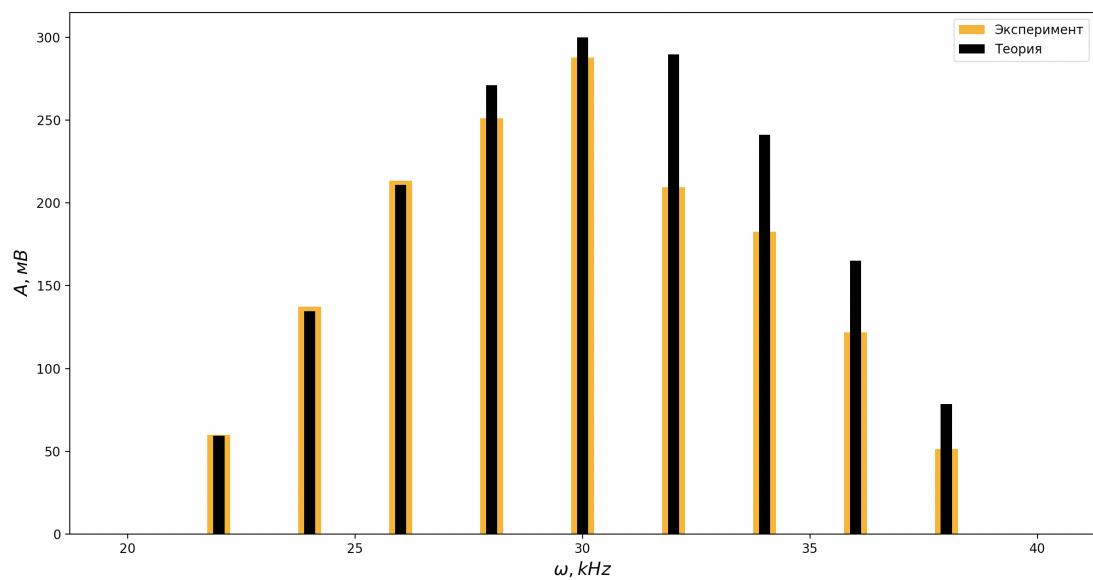


Рис. 14: Спектр цуга волн  $f_{\text{повт}}=2 \text{ Гц}$

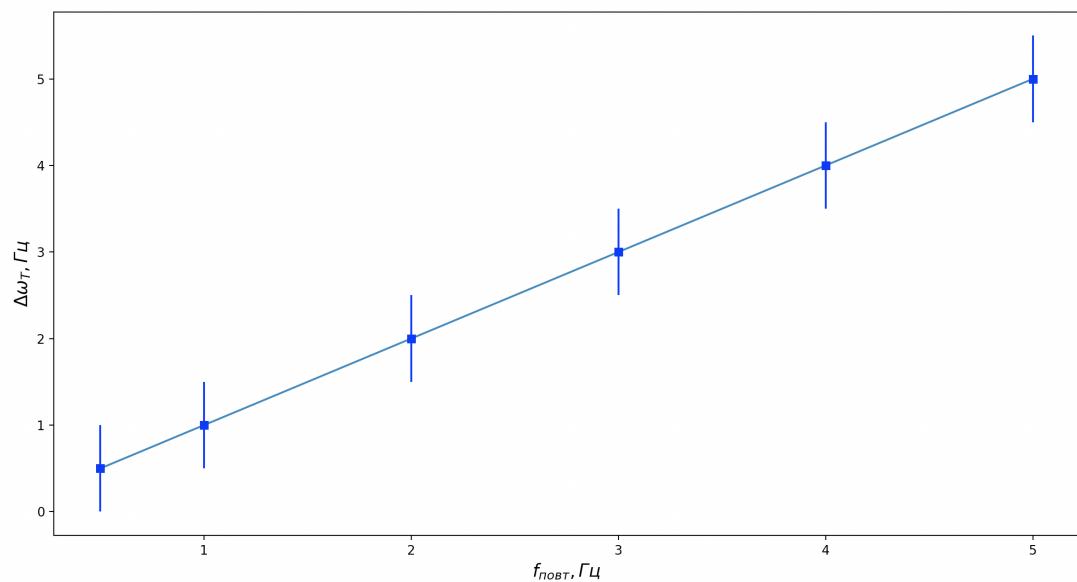


Рис. 15: График  $\Delta\omega_T(f_{\text{повт}})$

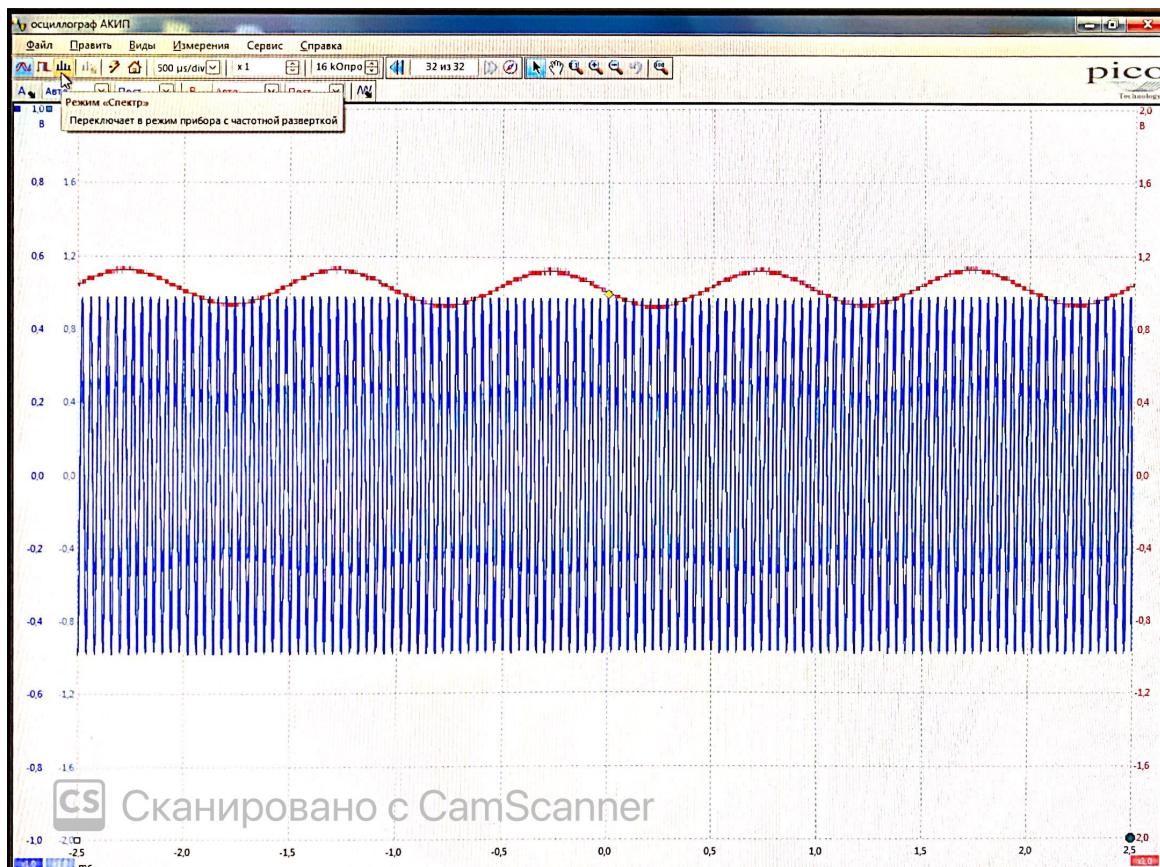


Рис. 16: Модулированный сигнал