

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ)
ФИЗТЕХ-ШКОЛА ЭЛЕКТРОНИКИ, ФОТОНИКИ
И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

Лабораторная работа 3.6.1

Спектральный анализ электрических сигналов

*выполнил студент 2 курса
группы Б04-006*
Белостоцкий Артемий

Долгопрудный, 2021

1. Цель работы.

Изучить спектральный состав периодических электрических сигналов

2. В работе используются.

Анализатор спектра (аналоговый или цифровой), генератор прямоугольных импульсов и сигналов специальной формы, осциллограф.

3. Теоретические сведения.

В работе изучается спектральный состав периодических электрических сигналов различной формы: последовательности прямоугольных импульсов, последовательности цугов и амплитудно-модулированных гармонических колебаний. Спектры этих сигналов наблюдаются с помощью анализатора спектра и сравниваются с рассчитанными теоретически.

Периодическая функция может быть представлена в виде бесконечного ряда гармонических функций — ряда Фурье:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\omega_0 t} \quad \text{или} \quad f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n)$$

Здесь $\omega_0 = 2\pi/T$, где T — период функции $f(t)$. Коэффициенты $\{c_n\}$ могут быть найдены по формуле

$$c_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-in\omega_0 t} dt$$

Наборы коэффициентов разложения в комплексной $\{c_n\}$ и действительной $\{a_n, \varphi_n\}$ формах связаны соотношением:

$$a_n = 2|c_n| \quad \varphi_n = \arg c_n$$

В качестве простейшего спектрального анализатора можно использовать высокодобротный колебательный контур с подстраиваемой ёмкостью или индуктивностью, рис. 1. Такой контур усиливает те гармоники входного сигнала $f(t)$, частота которых близка к резонансной $\nu_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ и практически не реагирует на частоты, далёкие от ν_0 .

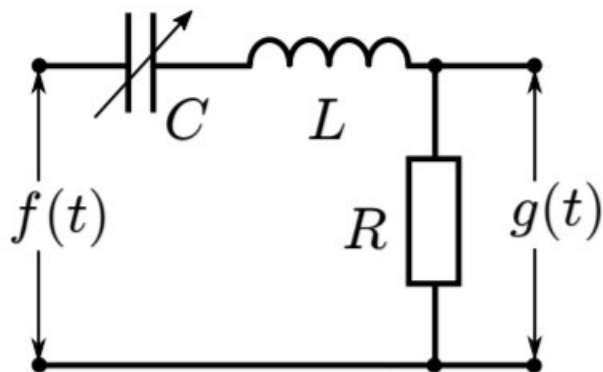


Рис.1.Колебательный контур как узкополосный фильтр

С точки зрения преобразования гармоник колебательный контур является узкополосным ф с шириной полосы пропускания порядка $\Delta\nu \sim \nu_0/Q$, где $Q = 1/R \sqrt{L/C} \gg 1$ — его добротность. Амплитуда колебаний в контуре пропорциональна амплитуде $|c(\nu_0)|$ гармоники в спектре функции $f(t)$, частота которой совпадает с ν_0 . Таким образом, меняя резонансную частоту контура, можно «просканировать» весь спектр входного сигнала.

4. Экспериментальная установка.

У описанной выше схемы есть существенный недостаток: при изменении L или C меняется также и добротность, а значит, и ширина полосы пропускания. Кроме того, проще изготовить высокодобротный контур с фиксированными параметрами, нежели с настраиваемой частотой. В связи с этим, как правило, для фильтрации сигнала применяется другая схема

Исследуемый сигнал $f(t)$ и синусоидальный сигнал от вспомогательного генератора, называемого в таких системах гетеродином, подаются на вход смесителя. Смеситель — элемент, преобразующий колебания с частотами ν_1 и ν_2 в колебания на комбинированных частотах: $\nu_1 + \nu_2$ и $\nu_1 - \nu_2$. «Разностный» сигнал смесителя поступает на фильтр — высокодобротный колебательный контур, настроенный на некоторую фиксированную резонансную частоту ν_0 . Таким образом, если $f(t)$ содержит гармонику $\nu = \nu_{\text{гет}} - \nu_0$ ($\nu_{\text{гет}}$ — частота гетеродина), она будет усилена, а отклик будет пропорционален её амплитуде.

Отметим, что смещение частот исследуемого сигнала и частоты гетеродина лежит в основе большинства современных радиоприёмных устройств — супергетеродинов.

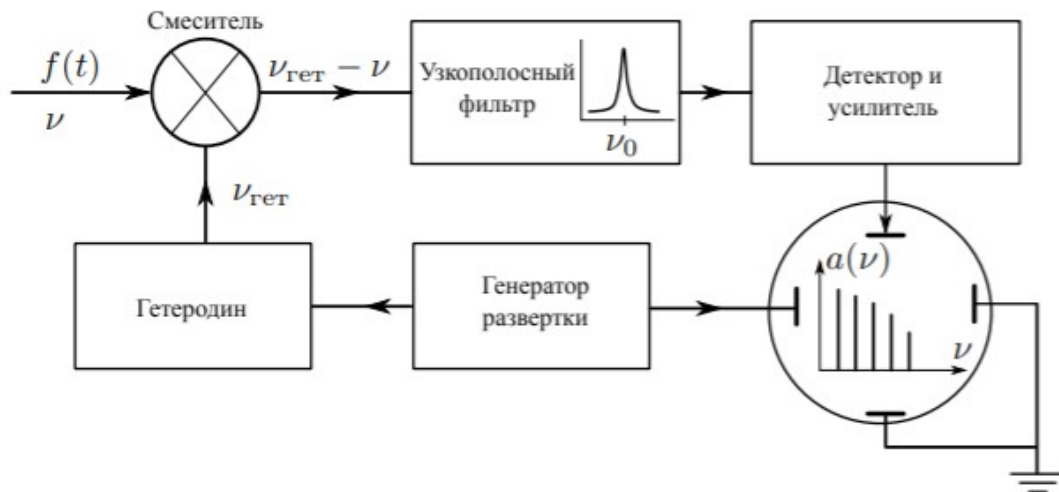


Рис.2. Структурная схема анализатора спектра

5. Исследование спектра периодической последовательности прямоугольных импульсов.

Экспериментальная установка для исследования спектра периодической последовательности прямоугольных импульсов представлена на рис.3. Сигнал в выхода генератора прямоугольных импульсов Г5-54 подается на вход анализатора спектра и одновременно — на вход Y осциллографа. С генератора импульсов на осциллограф подается также сигнал синхронизации, запускающий ждущую развертку осциллографа. При этом на экране осциллографа можно наблюдать саму последовательность прямоугольных импульсов, а на экране ЭЛТ анализатора спектра — распределение амплитуд спектральных составляющих этой последовательности

В наблюдаемом спектре отсутствует информация об амплитуде нулевой гармоники, т.е о величине постоянной составляющей; ее местоположение (начало отсчета шкалы частот) отмечено небольшим вертикальным выбросом

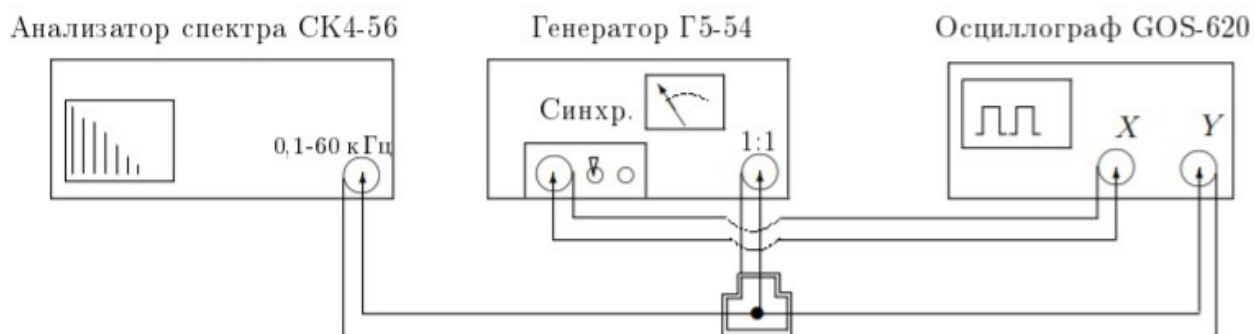


Рис.3. Схема для исследования спектра периодической последовательности
прямоугольных импульсов

Установим на анализаторе спектра режим работы с однократной разверткой и получим на экране спектр импульсов с параметрами $f_{\text{повт}} = 1$ кГц; $\tau = 25$ мкс; частотный масштаб $m_x = 5$ кГц/дел

Проанализируем, как меняется спектр при изменении τ и $f_{\text{повт}}$:

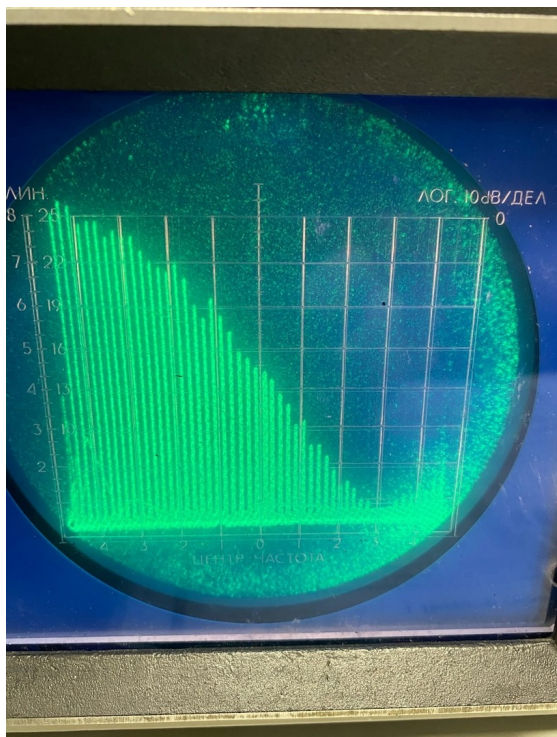


Рис.4. $f_{\text{повт}} = 1$ кГц; $\tau = 25$ мкс

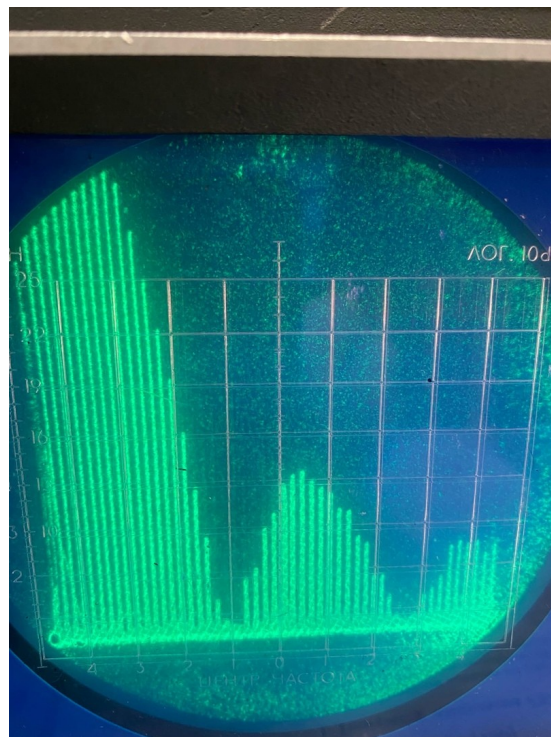


Рис.5. $f_{\text{повт}} = 1$ кГц; $\tau = 50$ мкс

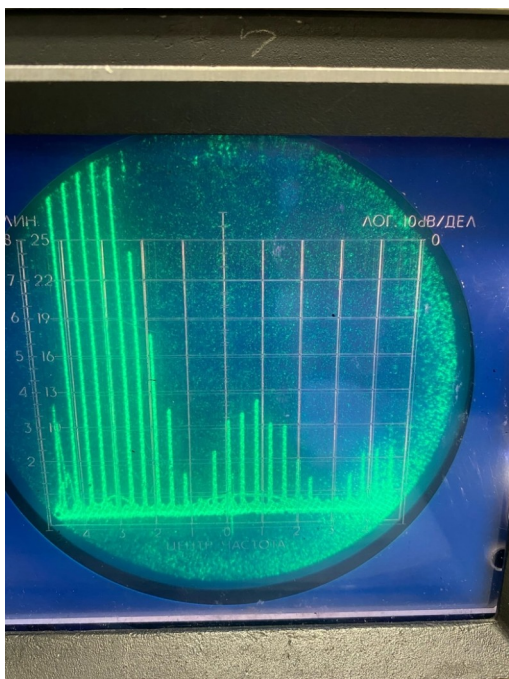


Рис.6. $f_{\text{повт}} = 2 \text{ кГц}$; $\tau = 50 \text{ мкс}$

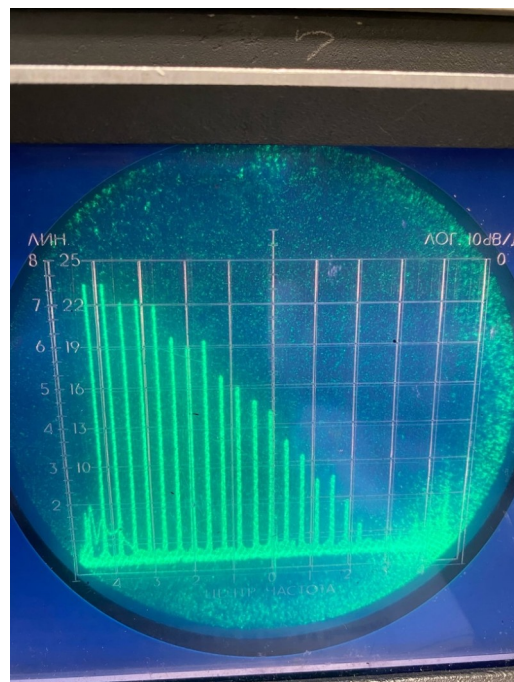


Рис.7. $f_{\text{повт}} = 2 \text{ кГц}$; $\tau = 25 \text{ мкс}$

Проведем измерения зависимости ширины спектра от длительности импульса $\Delta\nu(\tau)$ при увеличении τ от 25 до 200 мкс, данные занесем в Таблицу 1:

Таблица 1

τ , мкс	25	50	80	120	150	180	200
$1/\tau$, мкс ⁻¹	0,04	0,02	0,0125	0,0083	0,0067	0,0056	0,005
X, дел	8	3,5	2,5	1	0,7	0,5	0,25
$\Delta\nu$, ГГц	0,04	0,0175	0,0125	0,005	0,0035	0,0025	0,00125

Построим график $\Delta\nu(1/\tau)$ по данным Таблицы 1, учитывая что $\sigma(\Delta\nu) = 0,0025 \text{ ГГц}$.

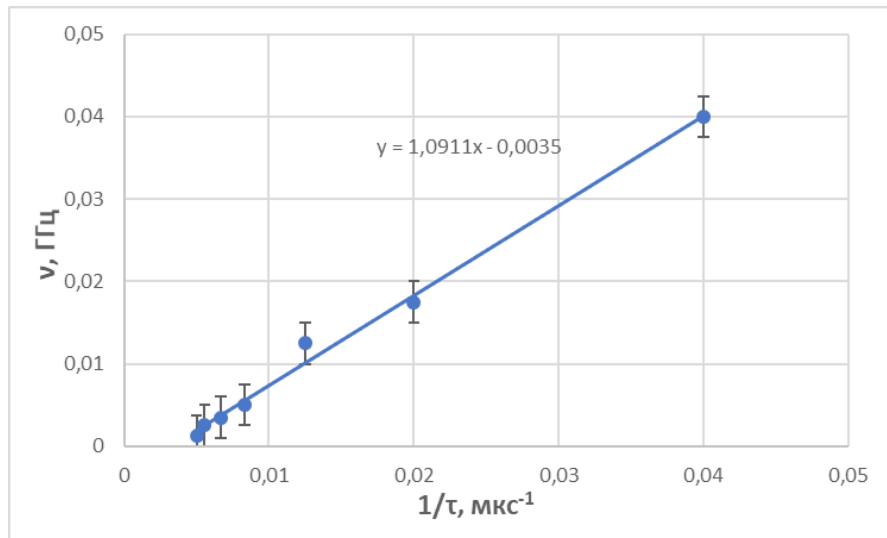


Рис.8.Зависимость $\Delta\nu(1/\tau)$

По МНК найдем коэффициент наклона прямой и оценим его погрешность:

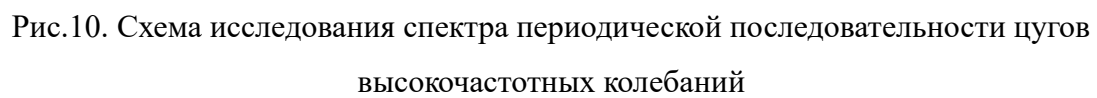
$$k = 1,09 \pm 0,04$$

Следовательно, получили соотношение:

$$\Delta \nu \tau \sim 1$$

6. Исследование спектра периодической последовательности цугов гармонических колебаний.

Исследование спектра периодически чередующихся цугов гармонических колебаний проводится по схеме, изображенной на рис.9. Генератор Г6-34 вырабатывает синусоидальные колебания высокой частоты. На вход АМ (амплитудная модуляция) генератора Г6-34 подаются прямоугольные импульсы с генератора Г5-54 и синусоида модулируется - «нарезается» на отдельные куски — *цуги*. Эти цуги с выхода генератора Г6-34 поступают на вход спектроанализатора и одновременно на вход Y осциллографа. Сигнал синхронизации подается на осциллограф с генератора импульсов.



8

При фиксированной длительности импульсов $\tau = 50$ мкс исследуем зависимость расстояния $\delta\nu$ между соседними спектральными компонентами от частоты повторения импульсов $f_{\text{повт}}$, данные занесем в Таблицу 2:

Таблица 2

$\delta\nu$, дел	1	1,7	2	1	3	4	4,2
m_x , кГц/дел	2	2	2	5	2	2	2
$\delta\nu$, кГц	2	3,4	4	5	6	8	8,4
$f_{\text{повт}}$, кГц	2	3	4	5	6	7	8

По данным Таблицы 2 построим график зависимости $\delta\nu(f_{\text{повт}})$, учитывая что $\sigma(\delta\nu) = 0,5$ дел:

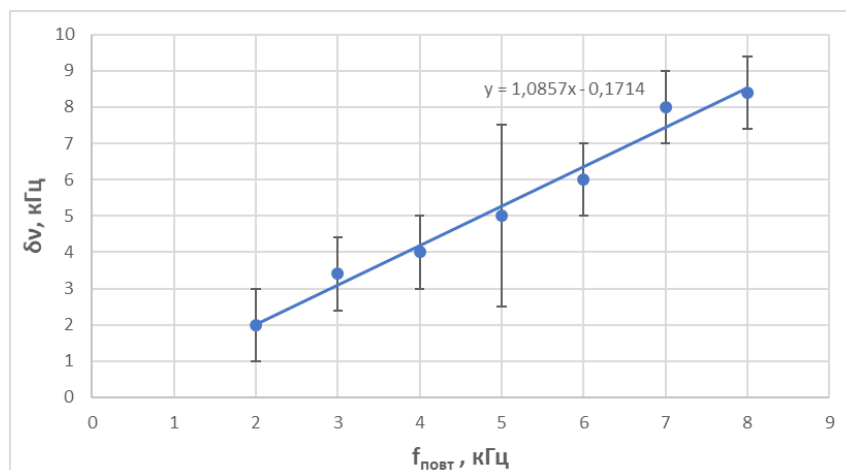


Рис.15. Зависимость $\delta\nu(f_{\text{повт}})$

По МНК найдем коэффициент наклона прямой и оценим его погрешность:

$$k = 1,09 \pm 0,07$$

7. Исследование спектра гармонических сигналов, модулированных по амплитуде.

Схема для исследования амплитудно-модулированного сигнала представлена на рис.16. В генератор сигналов встроен модуляционный генератор, который расположен в левой части Г6-34. Синусоидальный сигнал с частотой модуляции $f_{\text{мод}} = 1$ кГц подается с модуляционного генератора на вход АМ (амплитудная модуляция) генератора, вырабатывающего синусоидальный сигнал высокой частоты (частота несущей $\nu_0 = 25$ кГц). Амплитудно-модулированный сигнал с основного выхода поступает на осциллограф и на анализатор спектра.

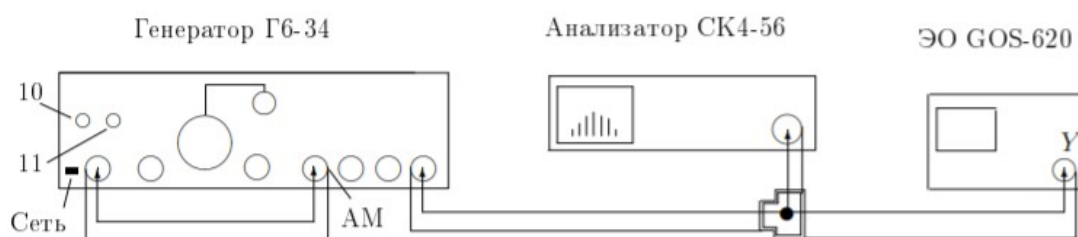


Рис.16.Схема для исследования спектра высокочастотного гармонического сигнала, промодулированного по амплитуде низкочастотным гармоническим сигналом

Изменяя глубину модуляции, исследуем зависимость отношения амплитуды боковой линии спектра к амплитуде основной линии ($a_{\text{бок}}/a_{\text{осн}}$) от глубины модуляции m , для расчета глубины модуляции будем измерять максимальную и минимальную амплитуды на экране осциллографа, данные занесем в Таблицу 3:

Таблица 3

$a_{\text{бок}}, \text{ дел}$	11	7	0	8	8	10
$a_{\text{осн}}, \text{ дел}$	18	18	19	19	18	18
$A_{\text{max}}, \text{ дел}$	17	12,5	4	5	14	15
$A_{\text{min}}, \text{ дел}$	0	4	4	1,5	2	1
m	1	0,515	0	0,538	0,75	0,875
$a_{\text{бок}} / a_{\text{осн}}$	0,611	0,389	0	0,421	0,444	0,556
$\sigma(m)$	0,05	0,03	0	0,079	0,043	0,048
$\sigma(a_{\text{бок}} / a_{\text{осн}})$	0,098	0,089	0	0,086	0,091	0,095

, где $\sigma(a_{\text{бок}}) = \sigma(a_{\text{осн}}) = 0,5 \text{ дел} = \sigma(A_{\text{max}}) = \sigma(A_{\text{min}})$.

$$\sigma(m) = m \sqrt{\frac{\sigma(A_{max})^2}{A_{max}^2} + \frac{2\sigma(A_{max})^2}{A_{min} + A_{max}}}$$

$$\sigma(a_{бок}/a_{осн}) = \frac{a_{бок}}{a_{осн}} \sqrt{\frac{\sigma(a_{бок})^2}{a_{бок}^2} + \frac{\sigma(a_{осн})^2}{a_{осн}^2}}$$

По данным Таблицы 3 построим график зависимости $a_{бок}/a_{осн}(m)$:

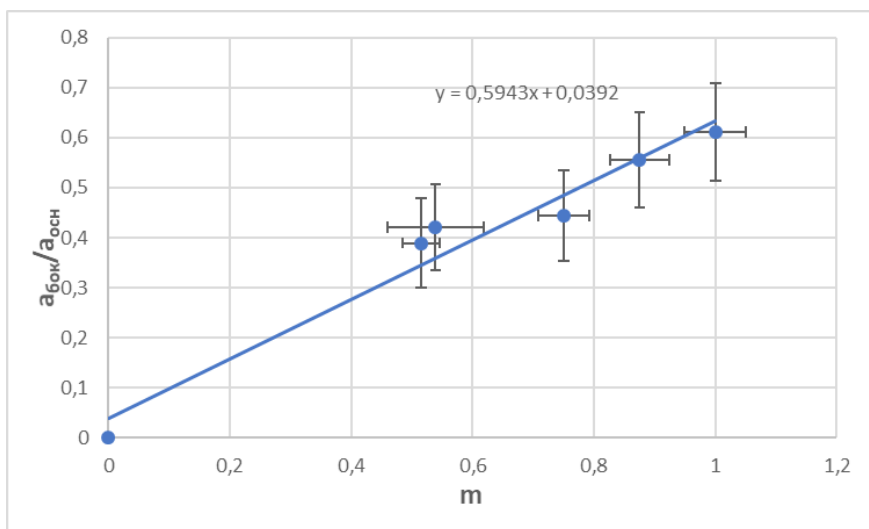


Рис.17.График зависимости $a_{бок}/a_{осн}(m)$

По МНК найдем коэффициент наклона прямой и оценим его погрешность:

$$k = 0,59 \pm 0,06$$

, что на 6% отличается от рассчитанного теоретически значения

8. Выводы.

- 1.Изучили возможности синтеза периодических электрических сигналов при ограниченном наборе спектральных компонент.
- 2.Убедились в справедливости соотношения неопределенности
- 3.Вычислили коэффициент линейной зависимости $a_{бок}/a_{осн}(m)$, который отличается от теоретического на 6%