

Лабораторная работа №4 «Цифровой осциллограф»

Модуль 1. Оценка спектра сигнала с помощью ДПФ

- Вычисление спектра дискретизованного сигнала с помощью ДПФ
- Интерполяция ДВПФ добавлением нулевых отсчетов в сигнал (Zero Padding)
- Оценка спектра исходного сигнала с помощью ДПФ
- Этапы обработки непрерывного сигнала при Фурье-анализе методом ДПФ.
- Эффект наложения спектров («aliasing»)
- Шум квантования АЦП
- Эффекты растекания спектральных компонент («leakage») и утечки спектра через боковые лепестки окна
- Паразитная амплитудная модуляция спектра.
- Прямоугольное окно
- Окно Ханна
- Окно с плоской вершиной
- Работа с цифровым осциллографом PV6501

Вычисление спектра дискретизованного сигнала с помощью ДПФ

Вычисление спектра дискретизованного сигнала с помощью ДПФ

Спектр дискретизованного сигнала $X_d(f)$ определяется с помощью ДВПФ через выборки $x[k]$:

$$X_d(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \exp(-j2\pi f k \Delta t),$$
$$x[k] = \frac{1}{f_d} \int_{-f_d/2}^{f_d/2} X_d(f) \exp(j2\pi f k \Delta t) df.$$

Отметим, что в рассматриваемом нами случае дискретизованной сигнал представлен конечным числом отсчетов $x[k]$, $k = 0, 1, \dots, N-1$.

Как правило, мы можем определить ДВПФ лишь в N точках на оси частот $f_n = n \frac{f_d}{N} = n \Delta f$, $n \in Z$ на одном периоде по оси частот, например на $[0; f_d)$. Тогда мы вычисляем

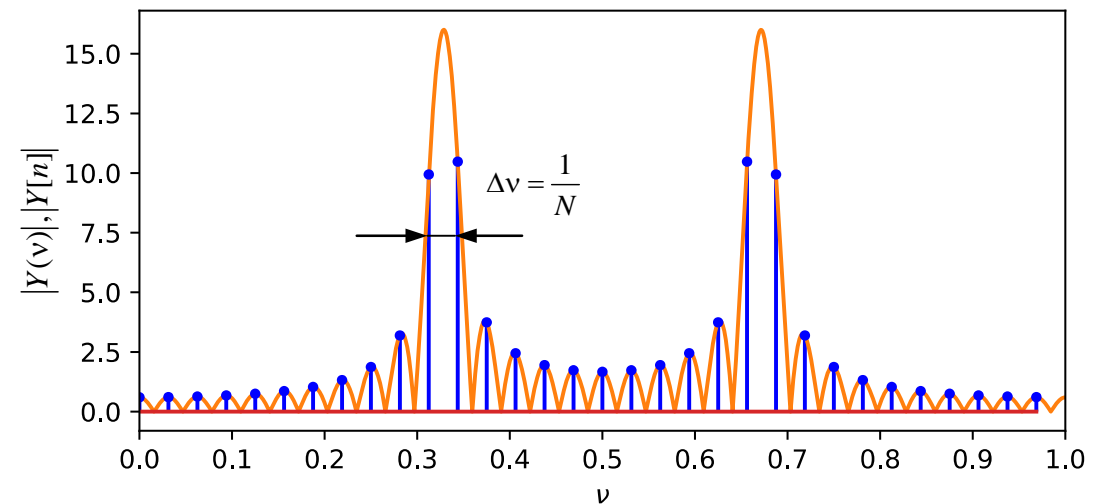
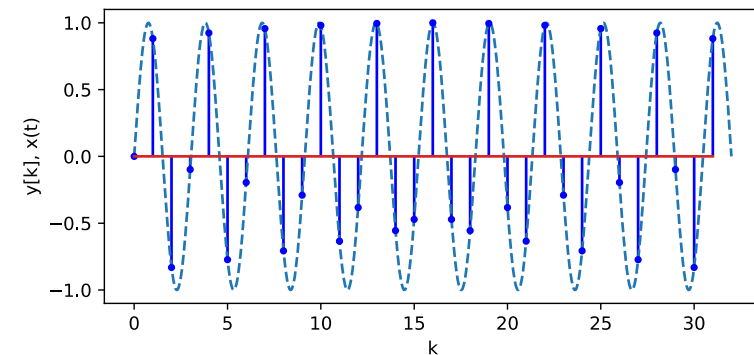
$$X_d(n \Delta f) = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right), \text{ для } n = 0, 1, \dots, N-1.$$

Заметим, что мы получили формулу прямого ДПФ, т.е. $X[n] = X_d(n \Delta f)$. ДПФ представляют собой выборки спектра

дискретизованного сигнала, взятые с шагом $\Delta f = f_d / N$. Шаг по частоте Δf определяет разрешение по частоте.

Пример.

$$y[k] = \sin\left(2\pi \frac{10.5}{32} k\right), k = 0, 1, \dots, N-1, N = 32$$



Zero Padding

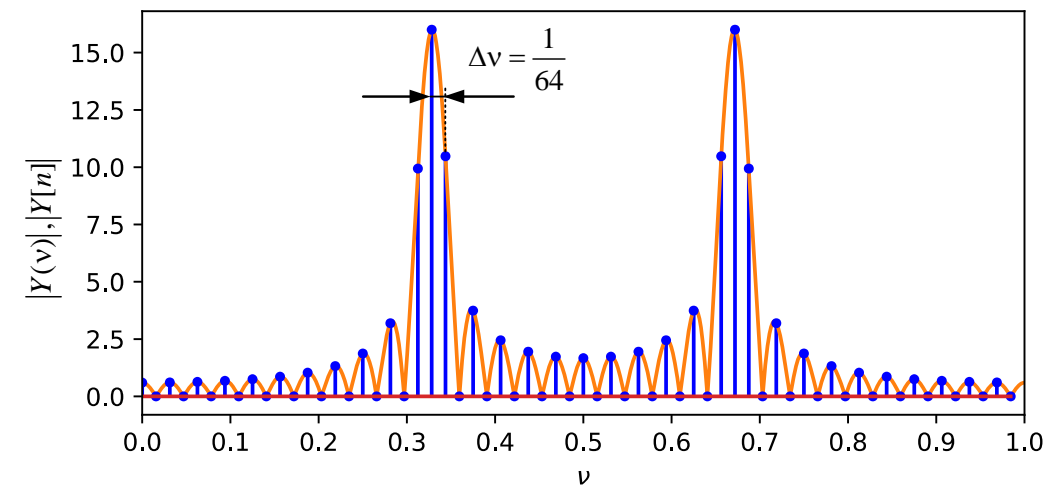
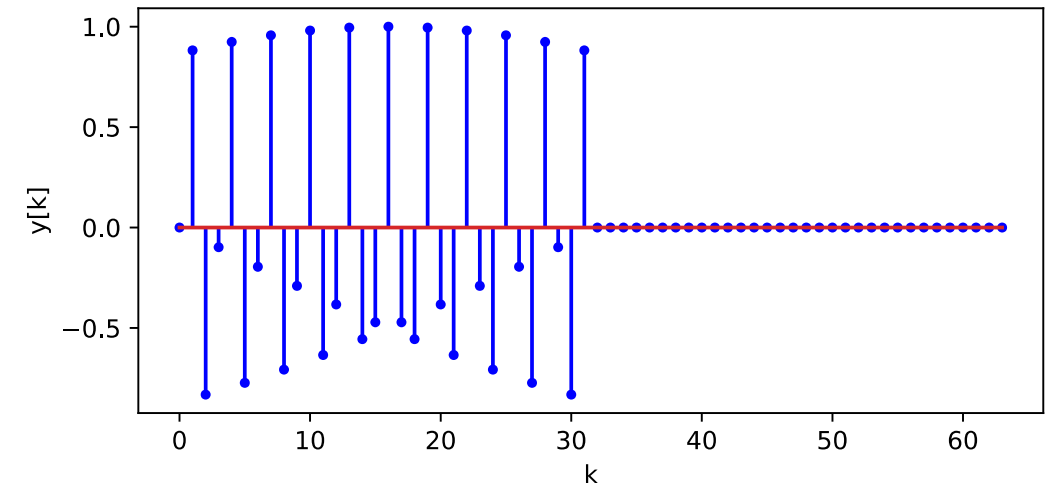
Интерполяция ДВПФ добавлением нулевых отсчетов в сигнал (Zero Padding)

Если частотное разрешение недостаточно для анализа, то мы можем его увеличить дополнив рассматриваемую последовательность нулевыми отсчетами. Добавление нулевых отсчетов никак не изменяет сам дискретный сигнал и его ДВПФ, однако увеличивает размерность ДПФ, а значит и число точек, в которых мы вычисляем спектр. Пусть сигнал дополнен нулями до M отсчетов, $M > N$. Тогда

$$X_d(n\Delta f) = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} nk\right), \text{ для } n = 0, 1, \dots, M-1.$$

Расстояние между соседними отсчетами ДПФ будет уже $\Delta f = f_d / M$ (в нормированных частотах $\Delta \nu = 1 / M$), где M является новой размерностью ДПФ.

Примечание. Управляющая программа осциллограф PV6501 поддерживает длины выборок 1000, 2500, 5000 и 8000 отсчетов. При этом поддерживаемые размерности ДПФ 1024, 2048, 4096 и 8192. Переход к размерности ДПФ, превышающей длину выборки производится путем дополнения нулевыми отсчетами.



Дополнение сигнала нулевыми отсчетами, ДВПФ и 64-точечное ДПФ

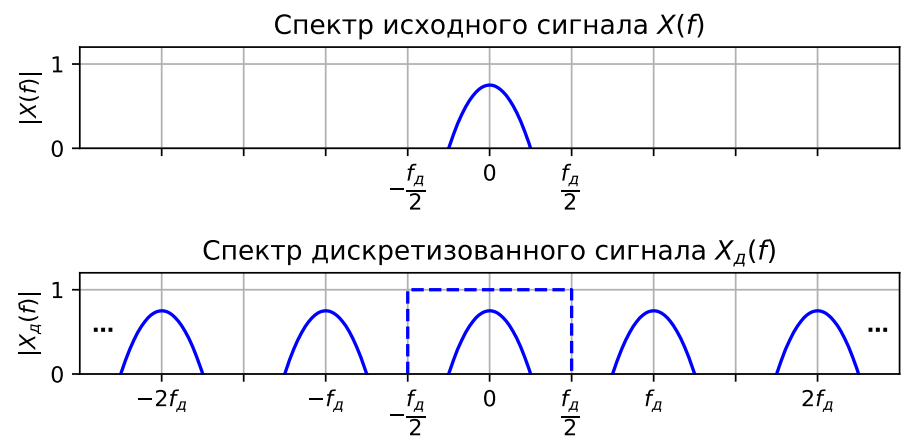
Оценка спектра аналогового сигнала с помощью ДПФ

Оценка спектра аналогового сигнала с помощью ДПФ

Отчету N – точечного ДПФ с номером n в случае сигнала конечной длительности соответствует значение ДВПФ в точке $\nu = n / N$ по оси нормированных частот:

$$X(\nu)\Big|_{\nu=n/N} = X[n].$$

Учитывая, что $\nu = f / f_{\text{д}} = f \Delta t$, где $f_{\text{д}}$ – частота дискретизации, Δt – шаг дискретизации, получаем, что отсчету с номером n соответствует частота $f = n f_{\text{д}} / N = n / (N \Delta t)$ Гц. Разрешение по оси частот при ДПФ анализе составляет $f_{\text{д}} / N$ Гц.



Заметим, что $f = n f_{\text{д}} / N$ Гц – это частота в спектре дискретизованного сигнала, который при отсутствии наложения спектров образуется путем периодического

продолжения (повторения) спектра исходного аналогового сигнала с периодом, равным частоте дискретизации ($f_{\text{д}}$ в случае оси в Гц или 1 в случае оси нормированных частот). Это означает, что отсчет ДПФ с номером n будет соответствовать в спектре аналогового сигнала частоте $f \in [-f_{\text{д}} / 2; f_{\text{д}} / 2]$, такой, что $f = (n + mN) f_{\text{д}} / N$, где m – целое число.

Частотная переменная и ее размерность	Связь частотной переменной с номером отсчета ДПФ	Разрешение по частоте	Диапазон изменения частоты, соответствующий отсчетам $[0, N)$
f , [Гц]	$f = \frac{n f_{\text{д}}}{N}$	$\Delta f = \frac{f_{\text{д}}}{N}$	$[0, f_{\text{д}})$
ω , [рад/с]	$\omega = \frac{n \omega_{\text{д}}}{N}$	$\Delta \omega = \frac{\omega_{\text{д}}}{N}$	$[0, \omega_{\text{д}})$
ν , безразмерная	$\nu = \frac{n}{N}$	$\Delta \nu = \frac{1}{N}$	$[0, 1)$
θ , [рад]	$\theta = 2\pi \frac{n}{N}$	$\Delta \theta = \frac{2\pi}{N}$	$[0, 2\pi)$

Оценка спектра аналогового сигнала с помощью ДПФ

Пример. Рассмотрим синусоидальный сигнал с частотой $f_0 = 5$ Гц и длительностью 1 с

$$x_a(t) = \sin(2\pi f_0 t), \quad 0 \leq t < 1.$$

Выберем частоту дискретизации $f_d = 20$ Гц ($\Delta t = 0,05$ с).

Последовательность отсчетов дискретизованного сигнала

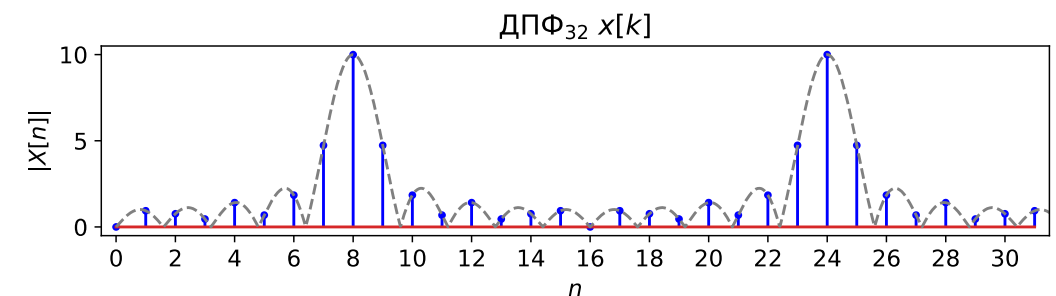
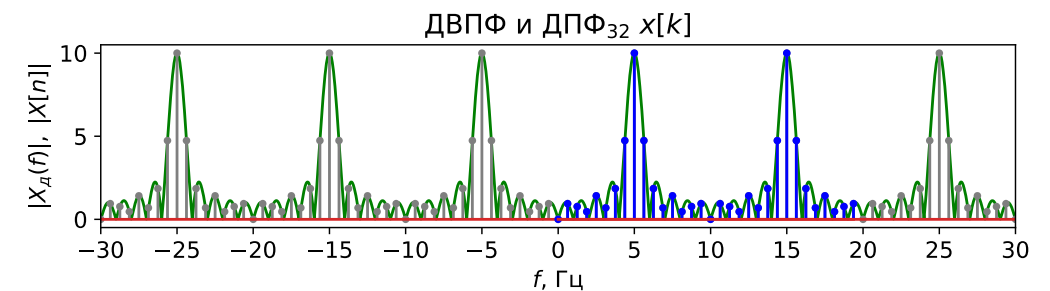
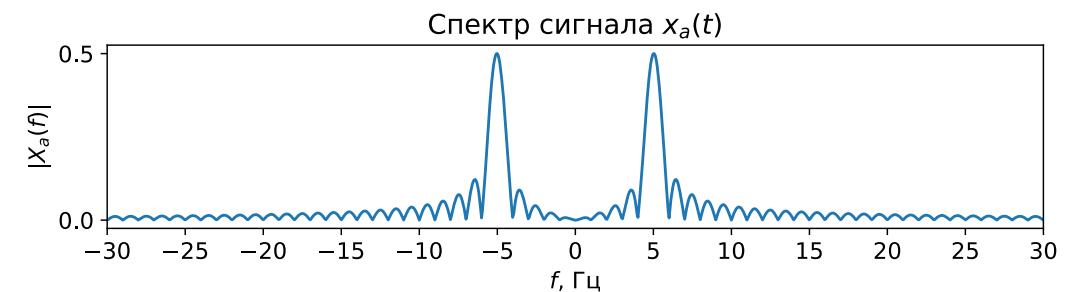
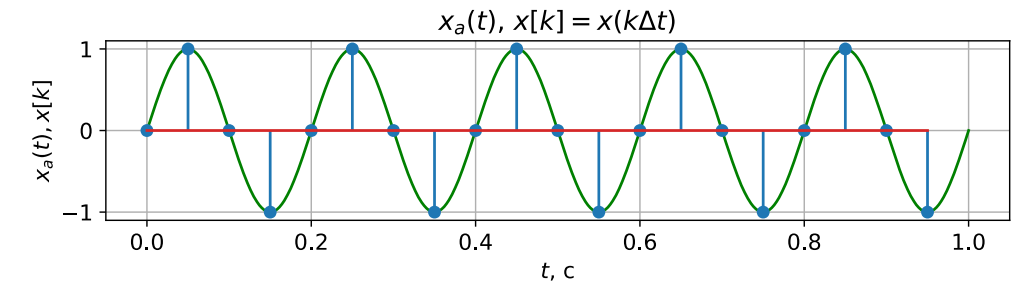
$$x[k] = x_a(k\Delta t) = \sin\left(2\pi \frac{f_0}{f_d} k\right).$$

Спектр $X_d(f)$ дискретизованного сигнала связан со спектром $X_a(f)$ аналогового сигнала соотношением

$$X_d(f) = \frac{T}{\Delta t} \sum_{m=-\infty}^{\infty} X_a(f - mf_d).$$

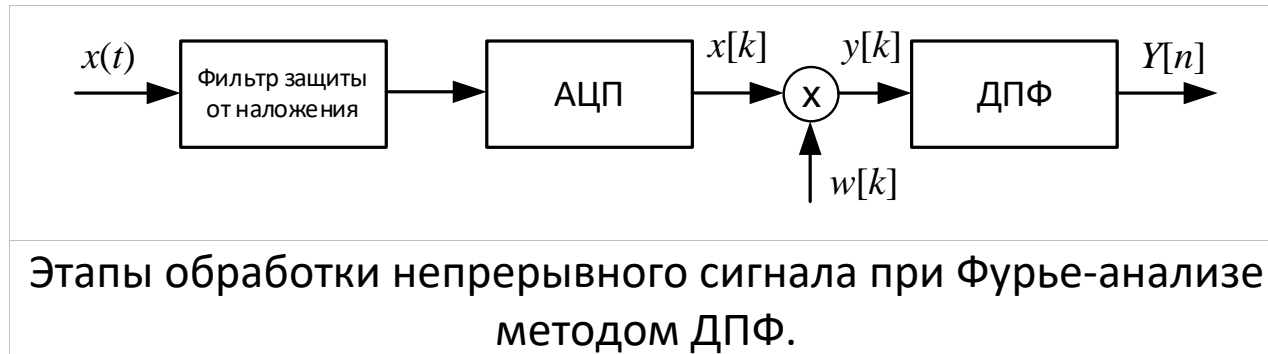
где T определено соотношением $x[k] = Tx_a(k\Delta t)$. Если бы эффекта наложения не было, то $X_d(f)$ и $X_a(f)$ совпадали бы на интервале $[-f_d/2, f_d/2]$, т.е. от -10 Гц до 10 Гц.

Заметим, что отсчеты ДПФ размерности $N = 32$ для $n = 0, 1, \dots, N-1$ находятся на полуинтервале $[0, f_d)$.



Этапы обработки непрерывного сигнала при Фурье-анализе методом ДПФ

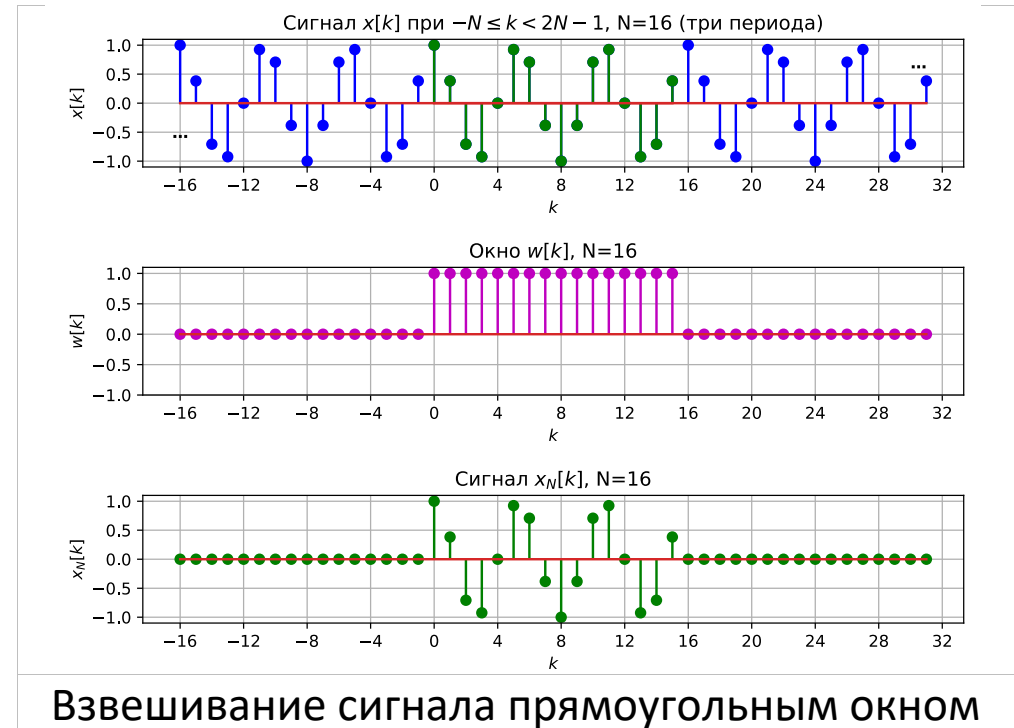
Этапы обработки непрерывного сигнала при Фурье-анализе методом ДПФ.



Аналоговый фильтр защиты от наложения ослабляет компоненты сигнала $x(t)$ выше частоты Найквиста $f_d / 2$.

Следующий за ним аналого-цифровой преобразователь (АЦП) выполняет операции дискретизации по времени и квантования выборок сигнала по уровню. На выходе АЦП будет цифровой сигнал $x[k]$, представленный последовательностью отсчетов.

Во многих случаях длительность сигнала $x(t)$ велика, поэтому перед вычислением ДПФ последовательность отсчетов $x[k]$ умножается на временное окно $w[k]$ длительностью N .



В результате получается конечная последовательность $y[k] = x[k]w[k]$, которой в частотной области соответствует периодическая свёртка

$$Y(v) = \int_{-1/2}^{1/2} X(\tilde{v})W(v - \tilde{v})d\tilde{v}.$$

Здесь $v = f \Delta t = f / f_d$ – нормированная частота (доли частоты дискретизации), $X(v)$ – ДВПФ (спектр) сигнала $x[k]$, $W(v)$ – ДВПФ оконной функции $w[k]$.

Эффект наложения спектров («aliasing»)

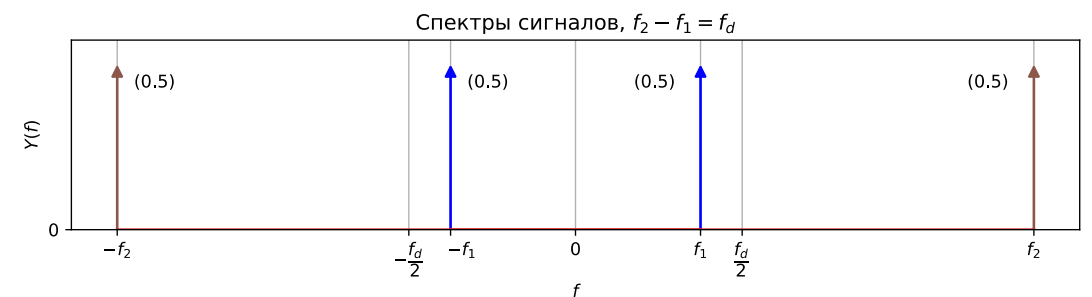
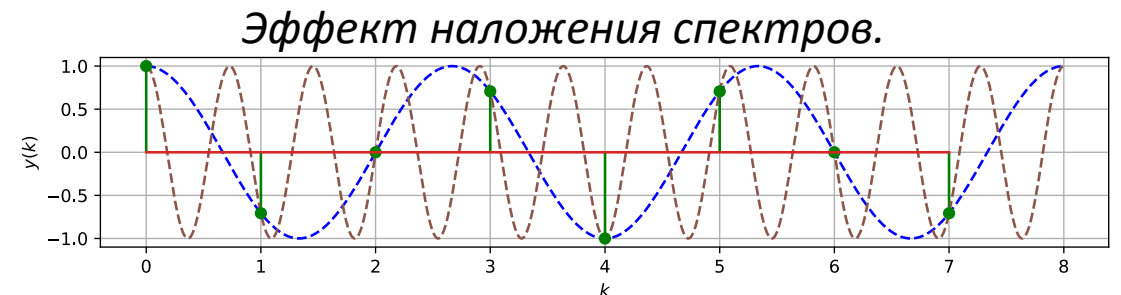
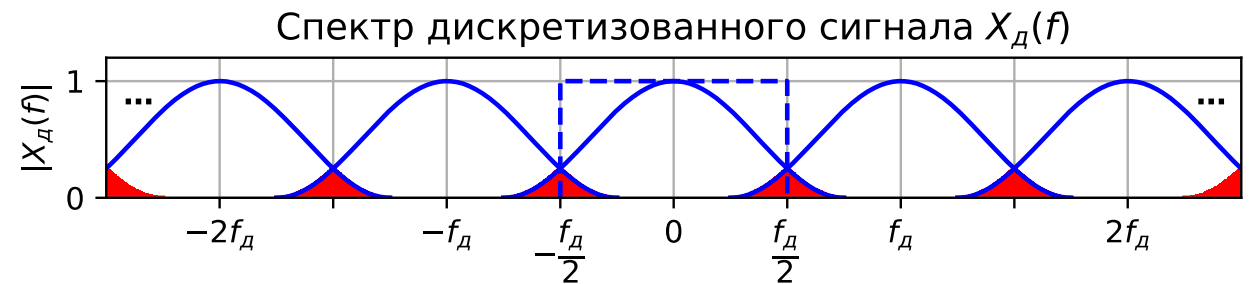
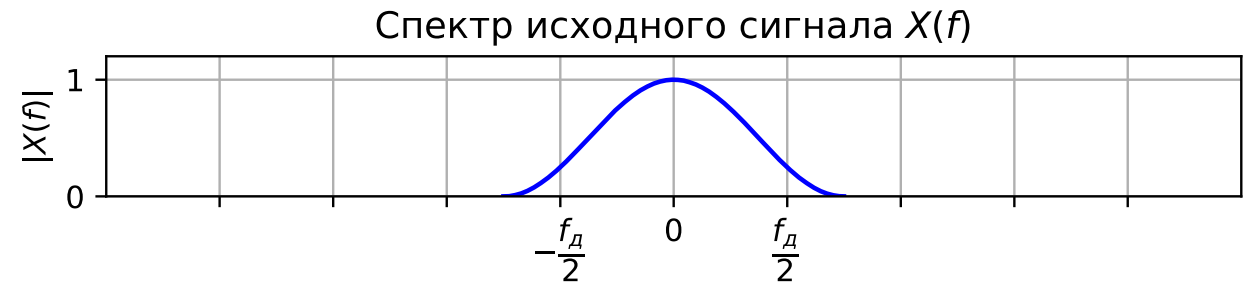
Эффект наложения спектров («aliasing»)

Дискретизация сигнала $x(t)$ по времени с шагом Δt приводит к периодическому повторению исходного спектра $X(f)$ с периодом, равным частоте дискретизации $f_d = 1 / \Delta t$.

Полезная информация содержится в полосе $[-f_d / 2, f_d / 2]$.

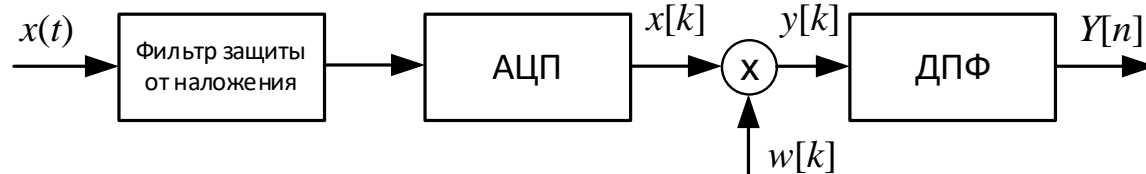
Если не принять специальных мер, возникает эффект наложения, в результате которого все частоты в спектре сигнала, превышающие половинную частоту дискретизации, как бы отражаются от этой частоты и переносятся на более низкие частоты, искажая исходный спектр.

Для устранения этого эффекта сигнал перед дискретизацией предварительно пропускают через низкочастотный фильтр, частота среза которого равна $f_c \leq f_d / 2$. Частота $f_d / 2$ в зарубежной литературе называется частотой Найквиста.



Эффект наложения при дискретизации синусоид

Шум квантования АЦП



Шумы квантования неизбежно проявляются, поскольку, как правило, разрядность чисел для представления отсчетов, ограничена.

Процесс преобразования аналогового сигнала в цифровой состоит из дискретизации и квантования, которые осуществляются аналого-цифровым преобразователем (АЦП). В результате дискретизации взятием отсчетов мы получаем выборки аналогового сигнала $x_a(t)$:

$$x[k] = x_a(k\Delta t),$$

где Δt – шаг дискретизации.

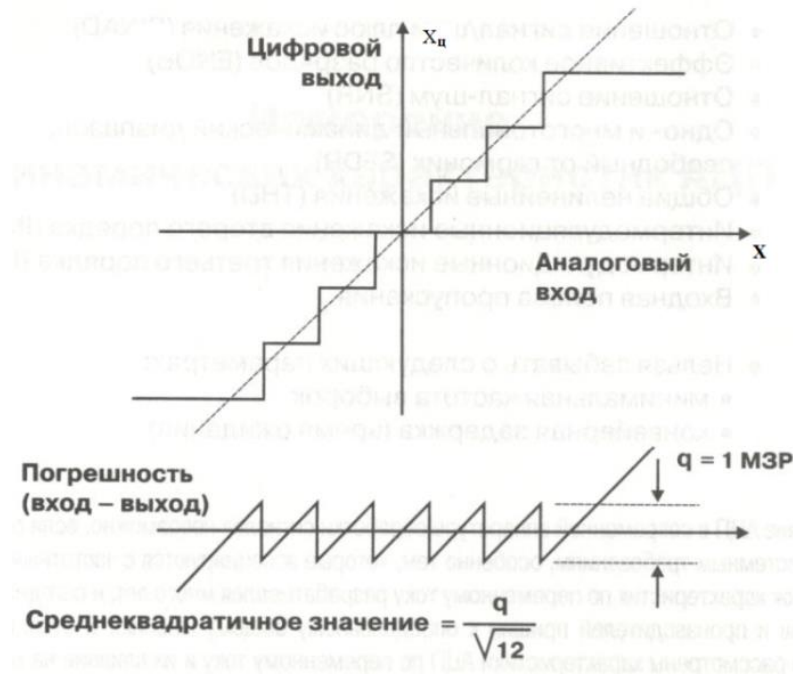
После квантования по уровню, мы получаем цифровой сигнал:

$$x_{\text{ц}}[k] = x[k] - e[k],$$

где $e[k] = x[k] - x_{\text{ц}}[k]$ – это погрешность квантования – некоторая реализацию шума квантования.

Обычно число уровней квантования 2^n , где n – разрядность АЦП. АЦП осциллографа PV6501 8 битное (восьмиразрядное). Каждый отсчет в буфере описывается одним из $2^8 = 256$ состояний.

Шум квантования АЦП



Определим шум квантования стандартного n -разрядного АЦП. Погрешность квантования $e[k] = x[k] - x_{\text{ц}}[k]$.

Максимальная по модулю погрешность квантования составляет половину единицы младшего значащего разряда (шага квантования) q :

$$-\frac{q}{2} \leq e[k] \leq \frac{q}{2}$$

Заметим, что для каждого момента времени все возможные значения погрешности равновероятны.

Шум квантования не коррелирован с входным сигналом и имеет равномерное распределение на отрезке.

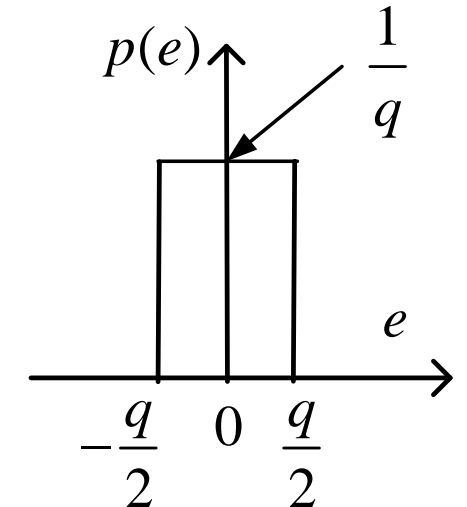
Для плотности вероятности $p(e)$ должно быть выполнено:

$$\int_{-q/2}^{q/2} p(e) de = 1.$$

Ошибка квантования имеет нулевое среднее и дисперсию

$$M[e] = \int_{-q/2}^{q/2} e p(e) de = 0,$$

$$\sigma_e^2 = M[e^2] - (M[e])^2 = \int_{-q/2}^{q/2} e^2 p(e) de = \frac{1}{q} \int_{-q/2}^{q/2} e^2 de = \frac{q^2}{12}.$$



Среднеквадратичное значение шума квантования

$$\sigma_e = \frac{q}{\sqrt{12}} = \frac{q}{2\sqrt{3}}.$$

Шум квантования АЦП

Заметим, что пилообразная погрешность создаёт гармоники, лежащие дальше полосы $[0, f_d/2]$. Однако все высшие гармоники должны переноситься (эффект наложения) в эту полосу и, затем суммируясь, образовать шум с действующим значением $\sigma_e = q / \sqrt{12}$.

Пусть на входе АЦП с диапазоном напряжения входного сигнала $\left[-\frac{q \cdot 2^n}{2}, \frac{q \cdot 2^n}{2}\right]$ действует полномасштабная синусоида

$$x(t) = \frac{q \cdot 2^n}{2} \sin 2\pi f t.$$

Среднеквадратичное значение входного сигнала $\sigma_x = \frac{q \cdot 2^n}{2\sqrt{2}}$.

Отношение «сигнал/шум» (SNR — Signal to Noise Ratio)

$$SNR = 20 \lg \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_e} \right) = 20 \lg \left(\frac{q \cdot 2^n / 2\sqrt{2}}{q / 2\sqrt{3}} \right) = 20 \lg 2^n + 20 \lg \sqrt{2/3}$$
$$SNR = 6,02n + 1,76 \text{ (дБ)}$$

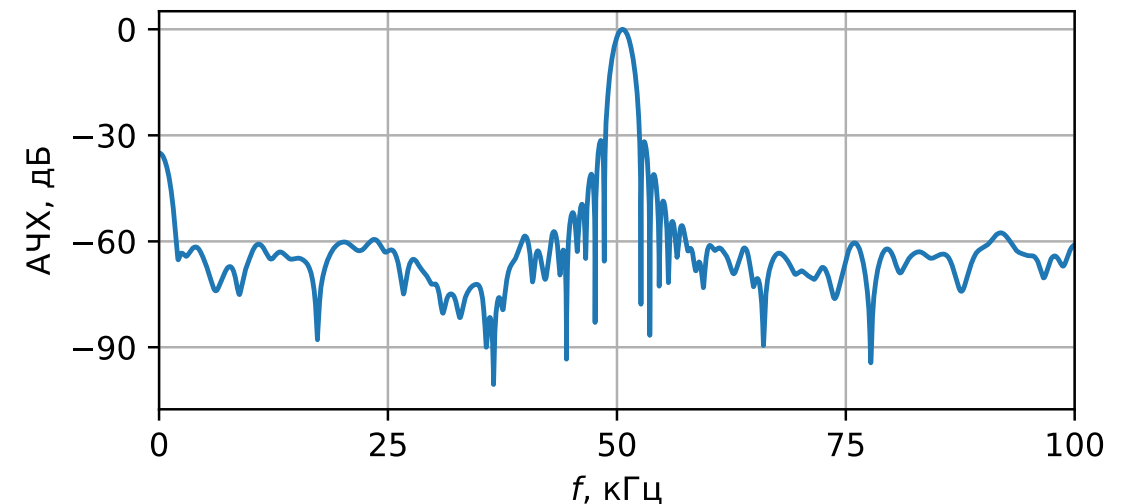
Относительный уровень шума квантования

$$\gamma = 20 \lg \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_x} \right) = 20 \lg \left(\frac{q / 2\sqrt{3}}{q \cdot 2^n / 2\sqrt{2}} \right) = 20 \lg \frac{1}{2^n \sqrt{1,5}}$$
$$\gamma = -6,02n - 1,76 \text{ (дБ)}$$

Пример. На рисунке приведена оценка спектра сигнала, состоящего из отрезка синусоиды, полученная цифровым осциллографом PV6501 с $n=8$ битным АЦП с использованием окна Ханна. Относительный уровень шума квантования в дБ будет

$$\gamma = -(6,02n + 1,76) \text{ дБ} \approx -50 \text{ дБ}.$$

Проводить измерения сигналов и их спектров ниже этого уровня бессмысленно.



Эффекты растекания спектральных компонент («leakage») и утечки спектра

Эффекты растекания спектральных компонент («leakage») и утечки спектра через боковые лепестки окна

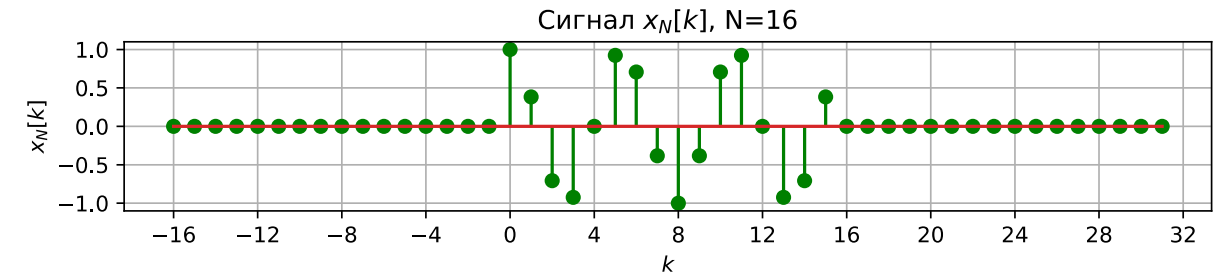
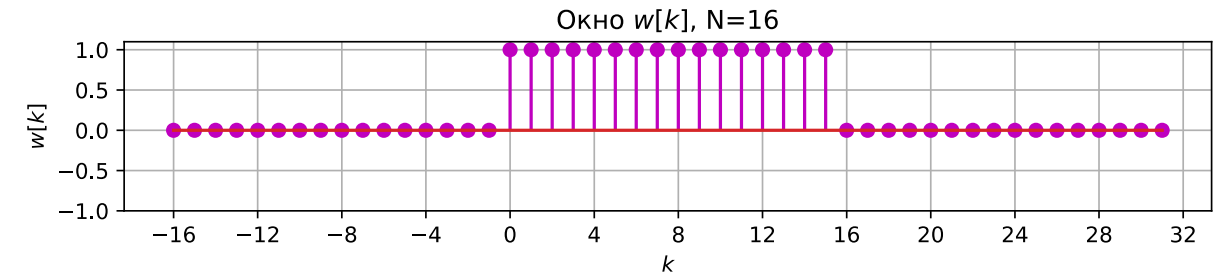
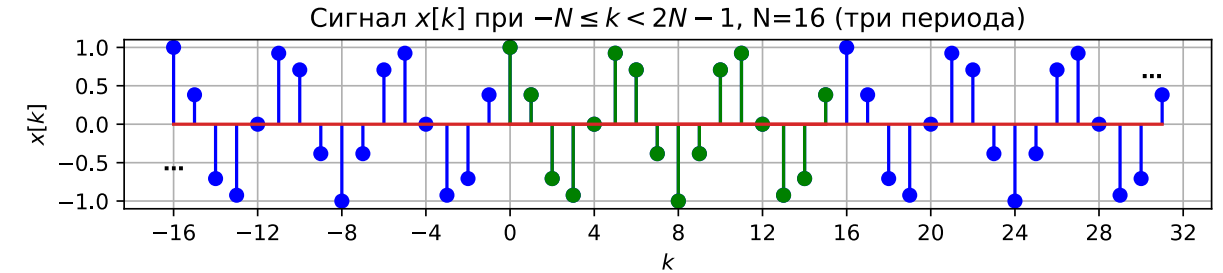
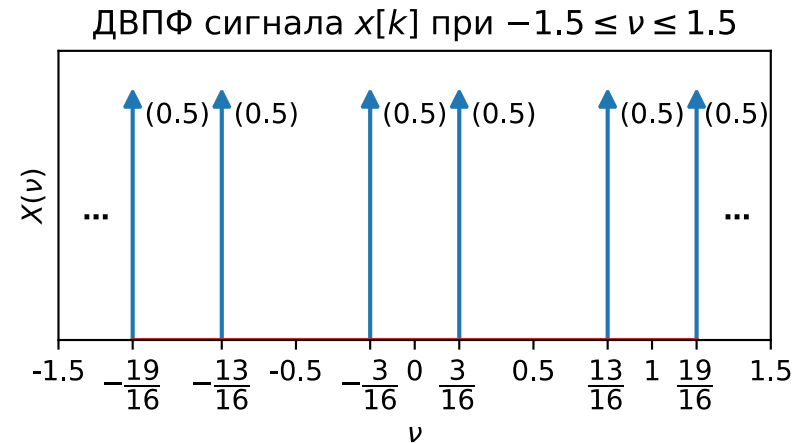
Эффект растекания спектральных компонент неизбежно возникает при умножении последовательности на оконную функцию. Рассмотрим этот эффект на следующем примере. Предположим, что имеется периодическая последовательность

$$x[k] = \cos(2\pi \frac{3}{16} k).$$

ДВПФ этой последовательности

$$X(\nu) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \delta(\nu - \frac{3}{16} - n) + \frac{1}{2} \delta(\nu + \frac{3}{16} - n).$$

$X(\nu)$ содержит по две δ -функции с весами $1/2$ на периоде.

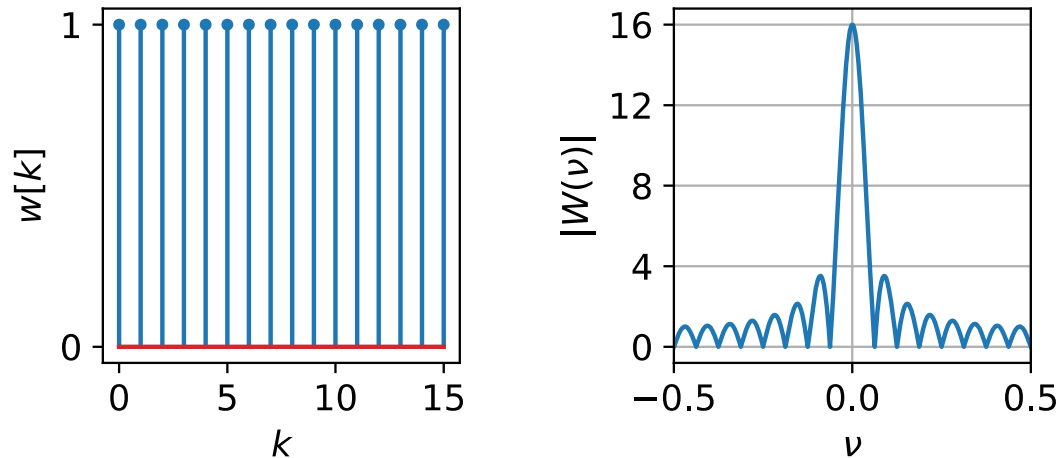


Предположим, что используется прямоугольное окно длиной в $N=15$ отсчетов и для дальнейшего спектрального анализа используется сигнал $y[k] = x[k]w[k]$.

Эффекты растекания спектральных компонент («leakage») и утечки спектра

Для прямоугольного окна спектр мы ранее вычисляли

$$W(\nu) = e^{-j(N-1)\pi\nu} \frac{\sin(N\pi\nu)}{\sin(\pi\nu)}.$$



ДВПФ последовательности $y[k]$ может быть представлено в виде циклической свертки

$$Y(\nu) = \int_{-1/2}^{1/2} X(\tilde{\nu})W(\nu - \tilde{\nu})d\tilde{\nu} = \int_{-1/2}^{1/2} W(\tilde{\nu})X(\nu - \tilde{\nu})d\tilde{\nu}$$

Используя фильтрующее свойство дельта-функции

$$\int_a^b W(\nu)\delta(\nu - \nu_1)d\nu = \begin{cases} W(\nu_1), & a < \nu_1 < b, \\ 0.5W(\nu_1), & (\nu_1 = a) \cup (\nu_1 = b), \\ 0, & (\nu_1 < a) \cup (\nu_1 > b), \end{cases}$$

получаем, что

$$Y(\nu) = 0.5W(\nu - \frac{3}{16}) + 0.5W(\nu + \frac{3}{16}).$$

Тот же результат можно получить через теорему смещения:

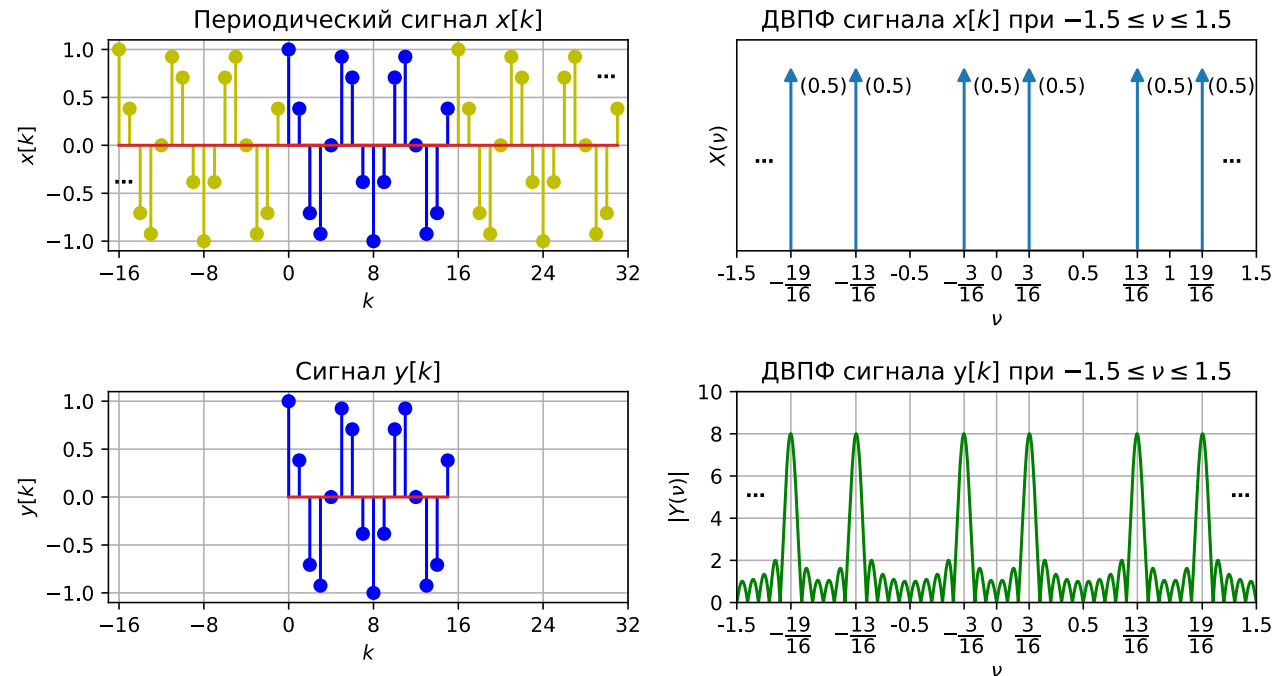
$$y[k] = \left(\frac{1}{2} \exp(j2\pi k \frac{3}{16}) + \frac{1}{2} \exp(-j2\pi k \frac{3}{16}) \right) w[k],$$
$$Y(\nu) = 0.5W(\nu - \frac{3}{16}) + 0.5W(\nu + \frac{3}{16}).$$

В итоге

$$Y(\nu) = \frac{1}{2} \exp\left(-j(N-1)\pi(\nu - \frac{3}{16})\right) \frac{\sin(N\pi(\nu - \frac{3}{16}))}{\sin(\pi(\nu - \frac{3}{16}))} +$$
$$+ \frac{1}{2} \exp\left(-j(N-1)\pi(\nu + \frac{3}{16})\right) \frac{\sin(N\pi(\nu + \frac{3}{16}))}{\sin(\pi(\nu + \frac{3}{16}))}.$$



Эффекты растекания спектральных компонент («leakage») и утечки спектра



Взвешивание прямоугольным окном: интерпретация во временной и в спектральной области

Эффект растекания спектральных компонент заключается в том, что гармоники (дельта-функции) в спектре сигнала «размываются» в спектральные максимумы.

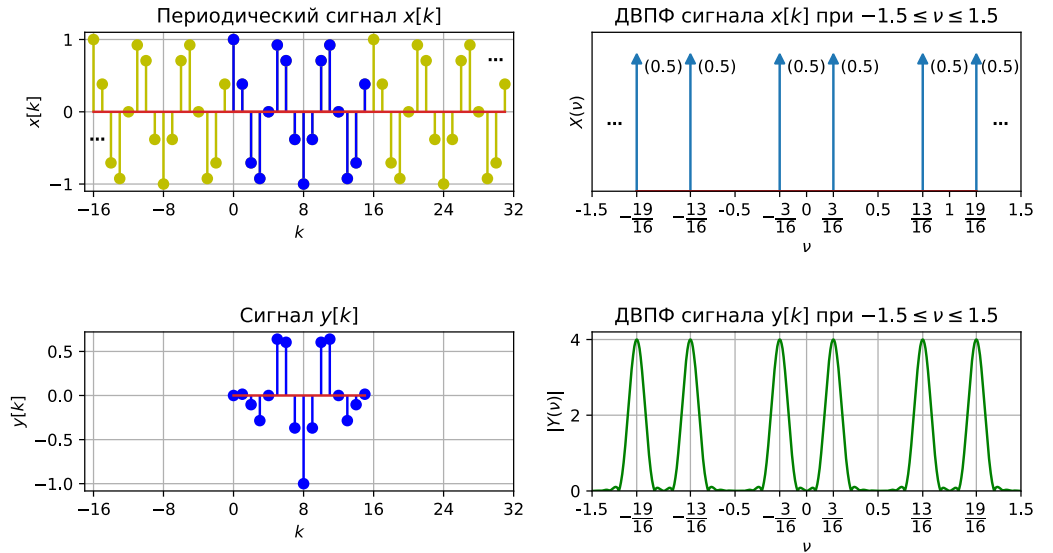
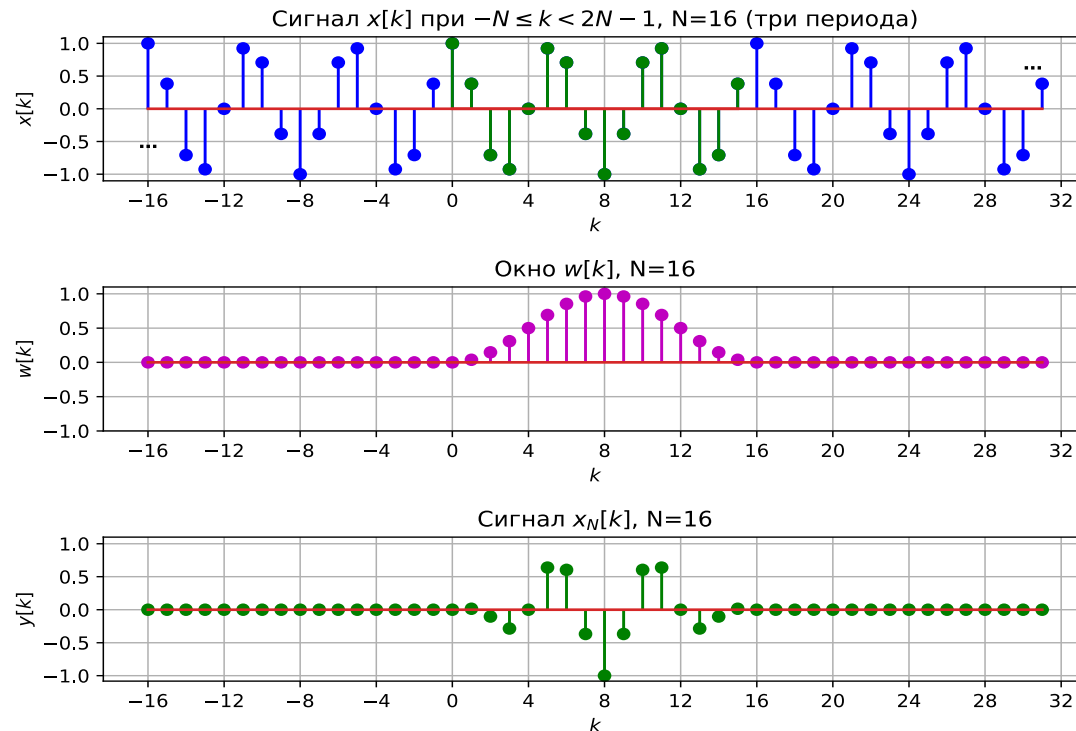
Помимо этого, наблюдается **эффект утечки спектра через боковые лепестки** прямоугольного окна, который приводит к появлению боковых выбросов.

Как видно из приведённого примера, из-за ограничения длительности сигнала мы наблюдаем не только размытые спектральные максимумы, но и боковые выбросы, вызванные влиянием боковых лепестков окна.

Эффекты растекания спектральных компонент («leakage») и утечки спектра

Эффект утечки спектра можно ослабить путем применения оконной функции, отличной от прямоугольной. В качестве примера рассмотрим окно Ханна.

$$w_{\text{Ханна}}[k] = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi k}{N}, & \text{при } 0 \leq k \leq N-1, \\ 0, & \text{при других } k. \end{cases}$$



Предположим, что нужно вычислить ДВПФ для одного периода последовательности $x[k] = \cos\left(2\pi \frac{3}{16}k\right)$, т.е. для последовательности $y[k] = x[k]w_{\text{Ханна}}[k]$, где

Применение окна Ханна позволило снизить уровень боковых лепестков по сравнению с их уровнем в случае прямоугольного окна. Однако это даётся ценой расширения главного лепестка спектрального окна $W(\nu)$, что приводит к ухудшению разрешения. Следовательно, должен выбираться компромисс между шириной главного лепестка и уровнем подавления боковых лепестков

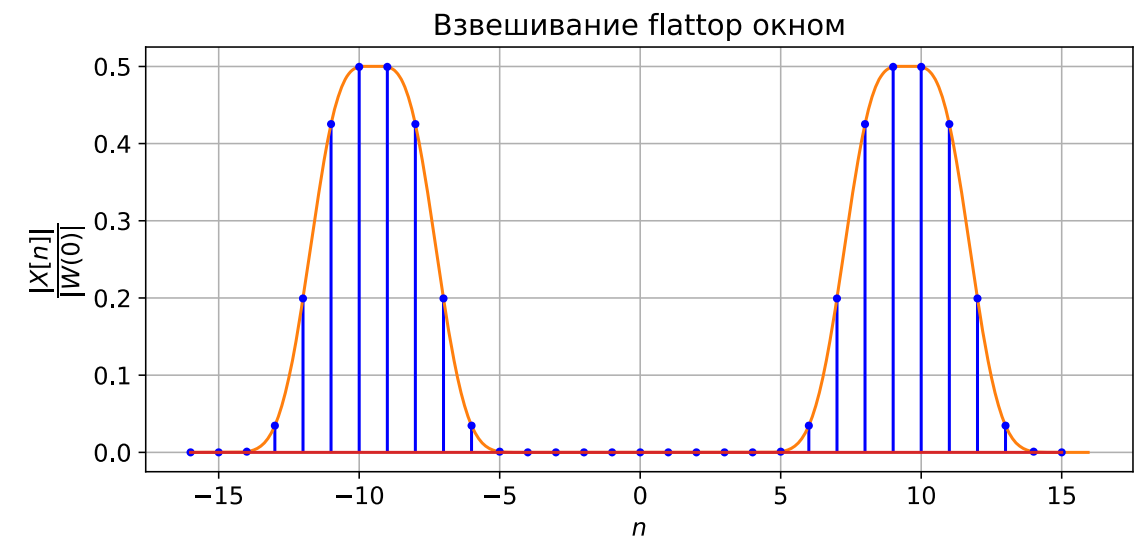
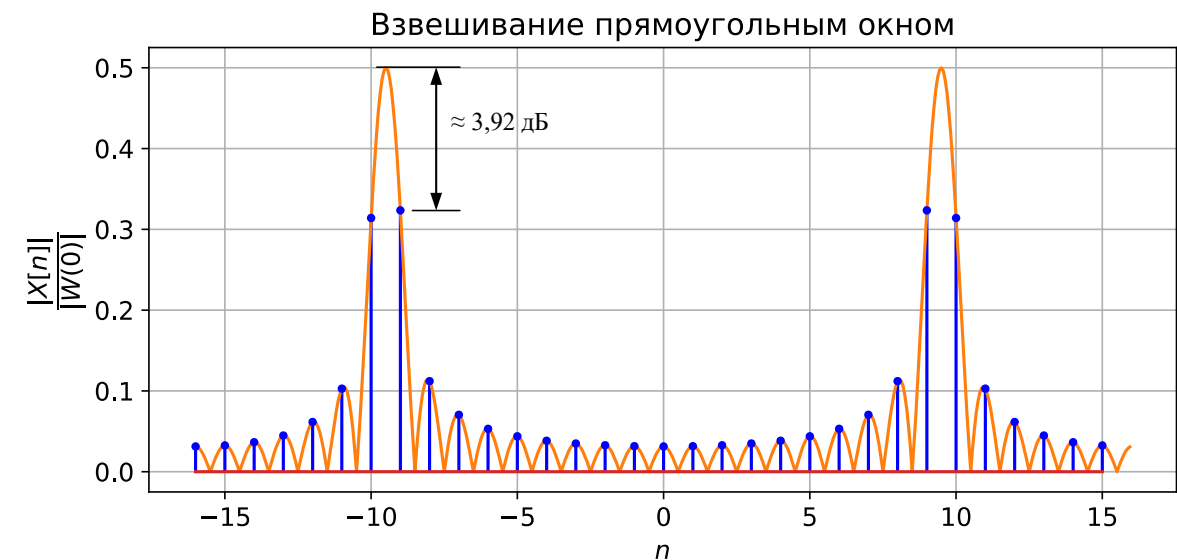
Паразитная амплитудная модуляция спектра

Паразитная амплитудная модуляция спектра.

Паразитная амплитудная модуляция $K_{\text{мод}}$ характеризует амплитуду гармонического сигнала, которую можно оценить с помощью ДПФ анализатора с оконной функцией. В самом неблагоприятном случае частота сигнала находится между соседними бинами ДПФ. Пусть спектр (ДВПФ) оконной функции $W(v)$. Величина $K_{\text{мод}}$, выраженная в децибелах, определяется как

$$K_{\text{мод}} = 20 \lg \left| \frac{W(0,5 / N)}{W(0)} \right|.$$

Для прямоугольной функции $K_{\text{мод}} = -3,92 \text{ дБ}$, для окна Бартлетта $K_{\text{мод}} = -1,82 \text{ дБ}$, для окна Хэмминга $K_{\text{мод}} = -1,78 \text{ дБ}$. При этом для окна с плоской вершиной (flattop) $K_{\text{мод}} = -0,02 \text{ дБ}$. Заметим, что для снижения этой погрешности можно также воспользоваться методом дополнения нулями анализируемой последовательности.



Эффект искажения амплитуд из-за паразитной амплитудной модуляции спектра.

Прямоугольное окно

Прямоугольное окно

Во временной области прямоугольное окно длительностью N задается формулой

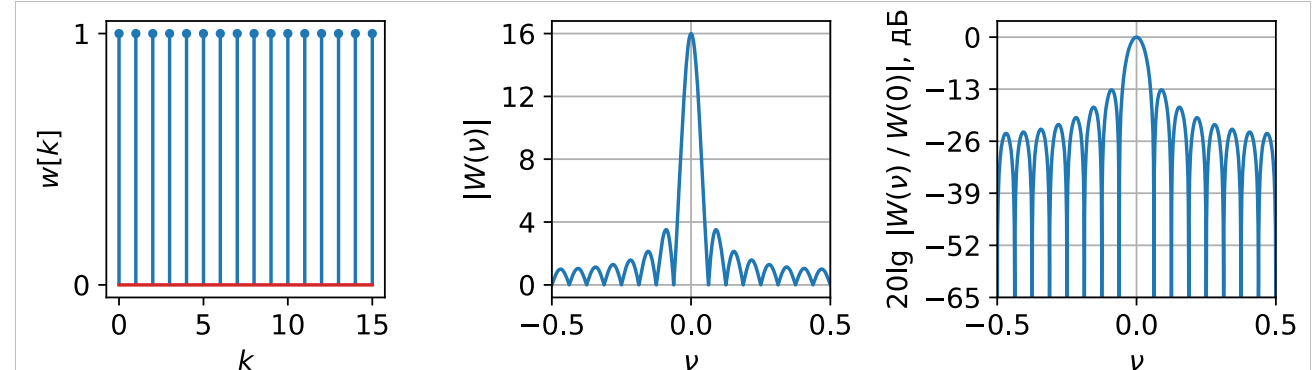
$$w_{\text{пр}}[k] = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 \leq k \leq N-1, \\ 0, & \text{при других } k. \end{cases}$$

Умножение на прямоугольную оконную функцию эквивалентно ограничению сигнала по длительности. Вычислим ДВПФ оконной функции

$$\begin{aligned} W_{\text{пр}}(\nu) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} w[k] \exp(-j2\pi\nu k) = \sum_{k=0}^{N-1} \exp(-j2\pi\nu k) = \\ &= \frac{1 - \exp(-j2\pi\nu N)}{1 - \exp(-j2\pi\nu)} = \frac{2j e^{-j\pi\nu N}}{2j e^{-j\pi\nu}} \frac{(e^{j\pi\nu N} - e^{-j\pi\nu N})}{(e^{j\pi\nu} - e^{-j\pi\nu})} = \\ &= \frac{\sin(N\pi\nu)}{\sin(\pi\nu)} \exp(-j(N-1)\pi\nu). \end{aligned}$$

АЧХ оконной функции

$$|W_{\text{пр}}(\nu)| = \left| \frac{\sin(N\pi\nu)}{\sin(\pi\nu)} \right|.$$



Прямоугольное окно

Основные характеристики прямоугольного окна длиной N :

- ширина главного лепестка на нулевом уровне $\Delta\nu = 2 / N$ (2 бина ДПФ);
- полоса по уровню -3 дБ составляет $\Delta\nu = 0,89 / N$ (0,89 бина ДПФ);
- уровень максимального бокового лепестка относительно главного составляет $-13,3$ дБ;
- скорость спада боковых лепестков 6 дБ / октава,
- коэффициент паразитной амплитудной модуляции $K_{\text{мод}} = -3,92$ дБ

Окно Ханна

Окно Ханна для ДПФ во временной области описывается следующей формулой:

$$w_{\text{Ханна}}[k] = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi k}{N}, & \text{при } 0 \leq k \leq N-1, \\ 0, & \text{при других } k. \end{cases}$$

Для того, чтобы определить это окно в спектральной области, заметим, что

$$\cos \frac{2\pi k}{N} = \frac{1}{2} e^{j \frac{2\pi k}{N}} + \frac{1}{2} e^{-j \frac{2\pi k}{N}}$$

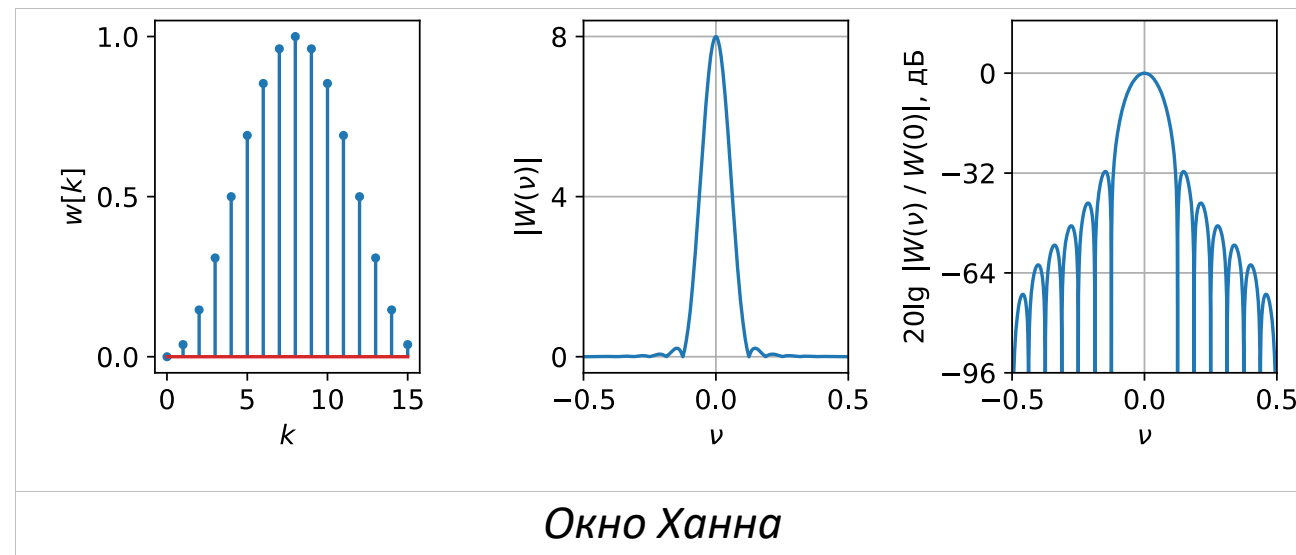
Тогда по теореме смещения для ДВПФ, окно Ханна в спектральной области может быть записано через частотную характеристику прямоугольного окна:

$$W_{\text{Ханна}}(\nu) = \frac{1}{2} W_{\text{пр}}(\nu) - \frac{1}{4} W_{\text{пр}}\left(\nu + \frac{1}{N}\right) - \frac{1}{4} W_{\text{пр}}\left(\nu - \frac{1}{N}\right),$$

где $W_{\text{пр}}(\nu) = \frac{\sin(N\pi\nu)}{\sin(\pi\nu)} \exp(-j(N-1)\pi\nu).$

Как нетрудно видеть, у окна Ханна всего три ненулевых отсчета ДПФ на одном периоде:

$$\tilde{W}_{\text{Ханна}}[n] = \frac{1}{N} W_{\text{Ханна}}[n] = \begin{cases} 0,5, & \text{при } n = mN, m \in \mathbb{Z}, \\ -0,25, & \text{при } n = \pm 1 + mN, m \in \mathbb{Z}, \\ 0, & \text{при других } n. \end{cases}$$



Основные характеристики окна Ханна длиной N :

- ширина главного лепестка на нулевом уровне $\Delta\nu = 4 / N$;
- полоса по уровню -3 дБ составляет $\Delta\nu = 1,44 / N$;
- уровень максимального бокового лепестка относительно главного составляет $-31,5$ дБ;
- скорость спада боковых лепестков 18 дБ / октаву.

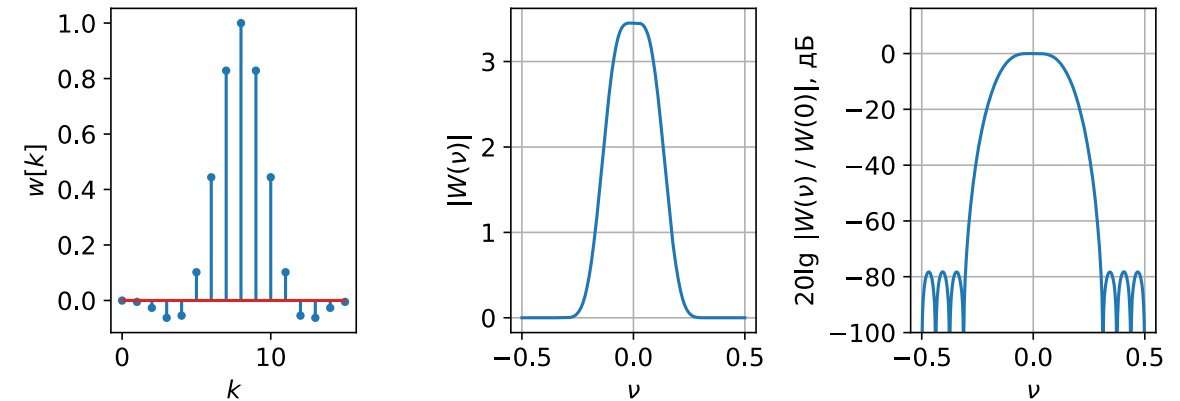
Окно с плоской вершиной

Окно с плоской вершиной

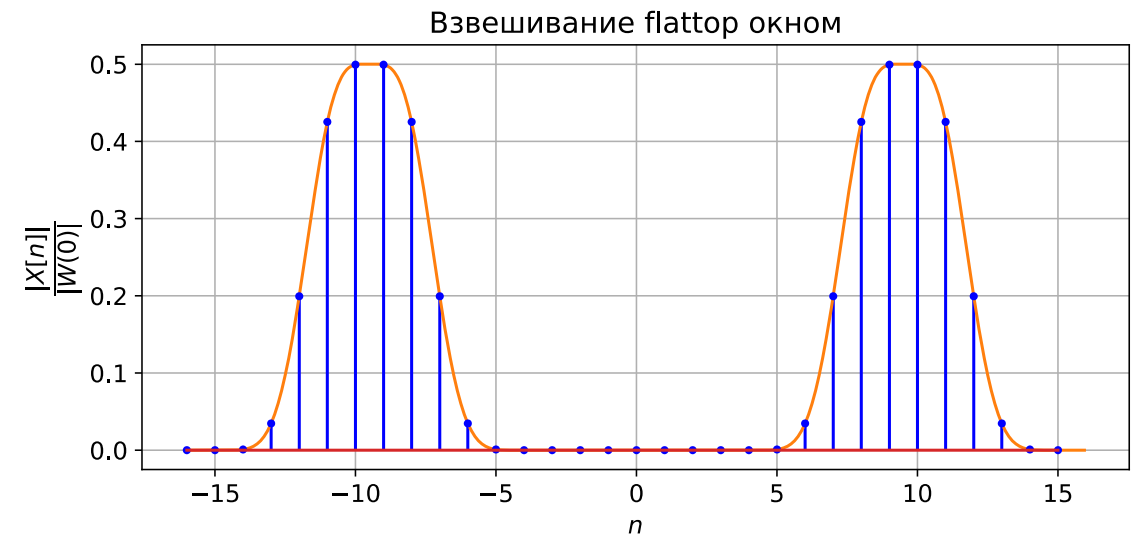
Как было показано ранее, форма главного лепестка оконной функции приводит к искажению амплитуд гармоник, частоты которых не соответствуют бинам ДПФ. Если требуется уменьшить этот эффект, то следует использовать окно с плоской вершиной:

$$w_{flattop}[k] = \begin{cases} \sum_{r=0}^4 (-1)^r a_r \cos\left(\frac{2\pi}{N} rk\right), & \text{при } 0 \leq k \leq N-1, \\ 0, & \text{при других } k, \end{cases}$$

где $a_0 = 0,21557895$, $a_1 = 0,41663158$, $a_2 = 0,277263158$, $a_3 = 0,083578947$, $a_4 = 0,006947368$. Заметим, что временная функция $w_{flattop}[k]$ может принимать отрицательные значения. Как было ранее отмечено, для окна с плоской вершиной $K_{\text{мод}} = -0,02$ дБ. Это означает, что использование этого окна позволяет минимизировать эффект паразитной амплитудной модуляции.

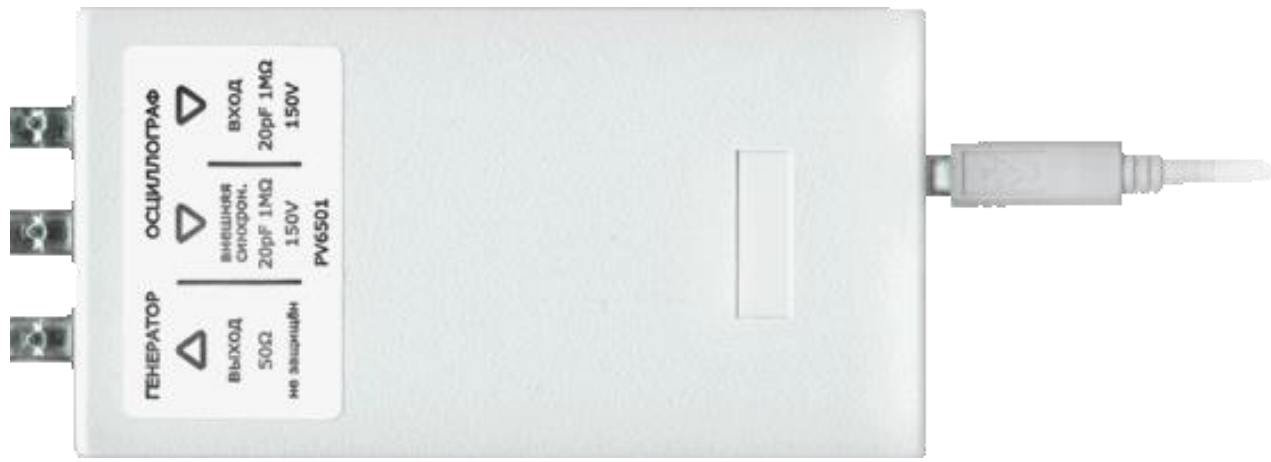


Окно с плоской вершиной



Исключение эффекта искажения амплитуд из-за паразитной амплитудной модуляции спектра.

Работа с цифровым осциллографом PV6501



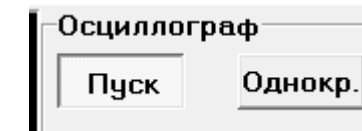
Подготовка прибора к работе

- 1) Подключите осциллограф без щупов с помощью USB кабеля компьютеру.
- 2) Поместите папку с драйвером и управляющей программой устройства в своей рабочей директории: скопировать папку FTDI D2XX Signal2_PV6501 (для компьютера в аудитории) или загрузить с сайта производителя <http://www.pv65.ru/6501/programm/index.html>
- 3) Установка драйвера (не требуется на компьютерах в аудитории). Когда Windows обнаружит устройство, укажите «Установка из указанного места» на директорию

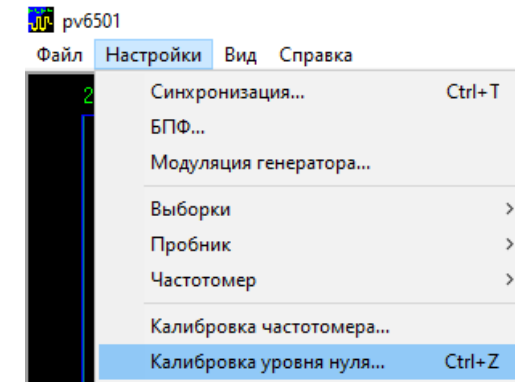
с файлом драйвера. Драйвер FTDI D2XX можно загрузить со страницы <https://ftdichip.com/drivers/d2xx-drivers/>

4) Запустите файл PV6501.exe.

5) Убедитесь, что от осциллографа отключены щупы. Нажмите кнопку “Пуск” в управляющей программе.

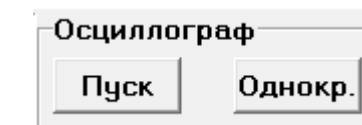


Выполните калибровку нуля устройства.

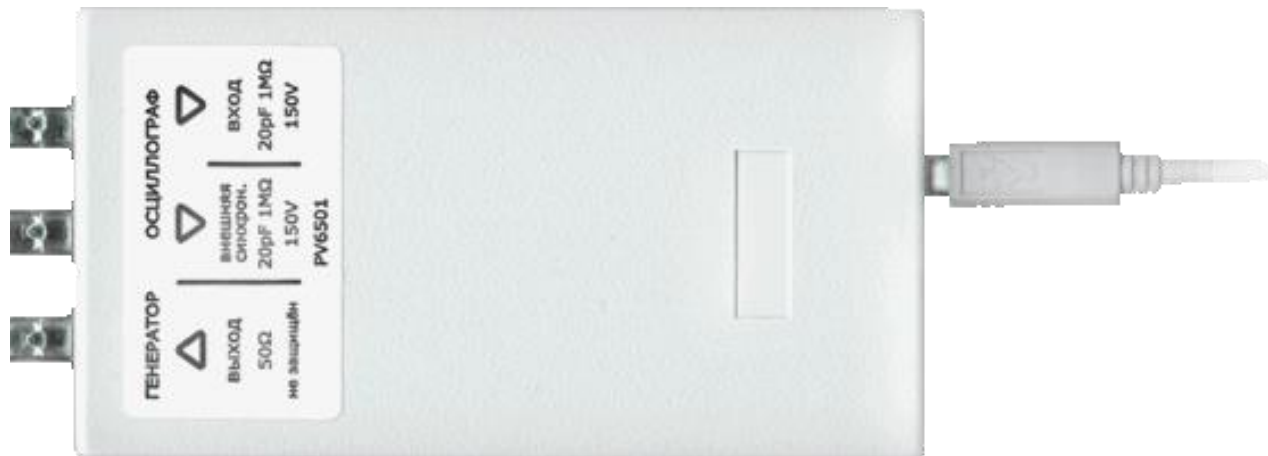


Будет создан файл pv6501.ini с параметрами конфигурации данного устройства.

6) Нажмите кнопку “Пуск” еще раз (чтобы она была не нажата). Отключите осциллограф от компьютера.



Работа с цифровым осциллографом PV6501

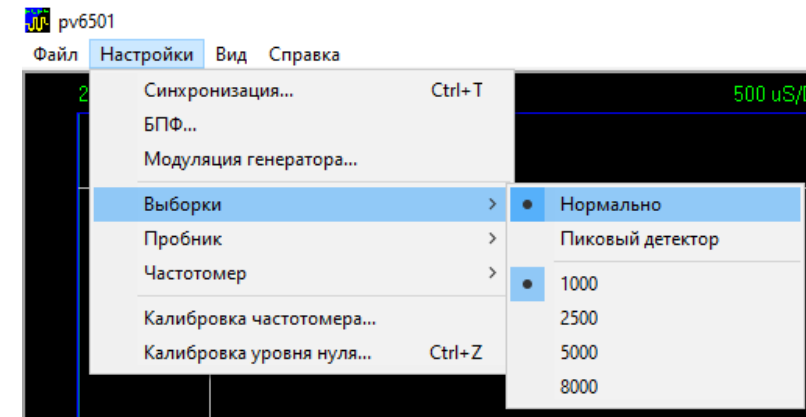


7) Подключите щупы. В данной лабораторной работе сигналы синтезируются встроенным генератором осциллографа. Следует использовать одно из следующих соединений:

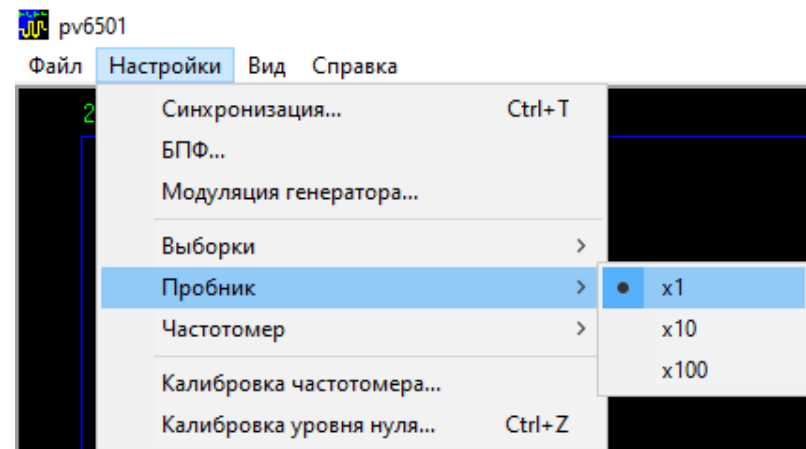
- а) соединить коаксиальным кабелем с BNC разъемами выход генератора с входом осциллографа,
- б) подключить щупы к выходу генератора и входу осциллографа, щупы и «крокодилы» щупов (нуль потенциала) между собой. На щупах-пробниках должен быть уставлен режим «x1» / «1:1».

8) Снова подключите осциллограф к ПК, нажмите кнопку «Пуск» в управляющей программе.

9) Убедитесь, что для выборок установлен режим «Нормально». Число выборок для данной работы рекомендуется установить 1000.



10) Убедитесь, что для пробника выбран режим «x1».



11) *Рекомендация.* В разделе «Синхронизация» включите режим «Авто».

Работа с цифровым осциллографом PV6501

Генерация сигналов заданной формы



Панель управления встроенным генератором сигналов находится в нижней части управляющей программы.

Для включения генератора сигналов следует нажать «Вкл.»
Если «АМ/ЧМ», «Импульсы», «ГКЧ» не нажаты, то синтезируется сигнал заданной формы:



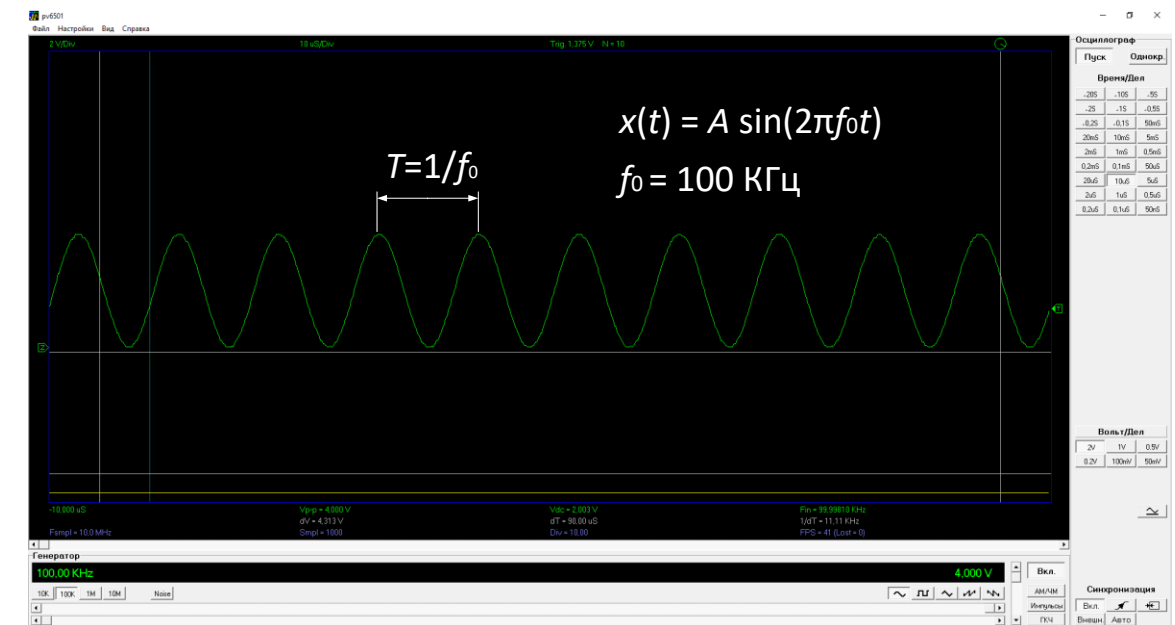
Заметим, что первая кнопка соответствует синусоидальной форме сигнала; вторая — прямоугольным импульсам со скважностью 50%. Генерация импульсов с другой скважностью доступна в режиме «Импульсы».

Размах колебания (двойная амплитуда) устанавливается с помощью вертикальной полосы прокрутки. В примере на слайде он составляет 4В, амплитуда — 2В.

Для выбора частоты сигнала сначала выбирается один из частотных диапазонов (в Гц).



Затем с помощью двух горизонтальных полос прокрутки панели управления генератором реализуется точная и грубая настройка частоты.



Работа с цифровым осциллографом PV6501

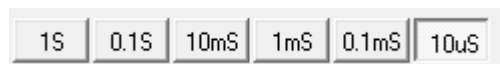
Генерация импульсов заданной скважностью



Для переключения в режим генерации импульсов нужно нажать на кнопку «Импульсы».

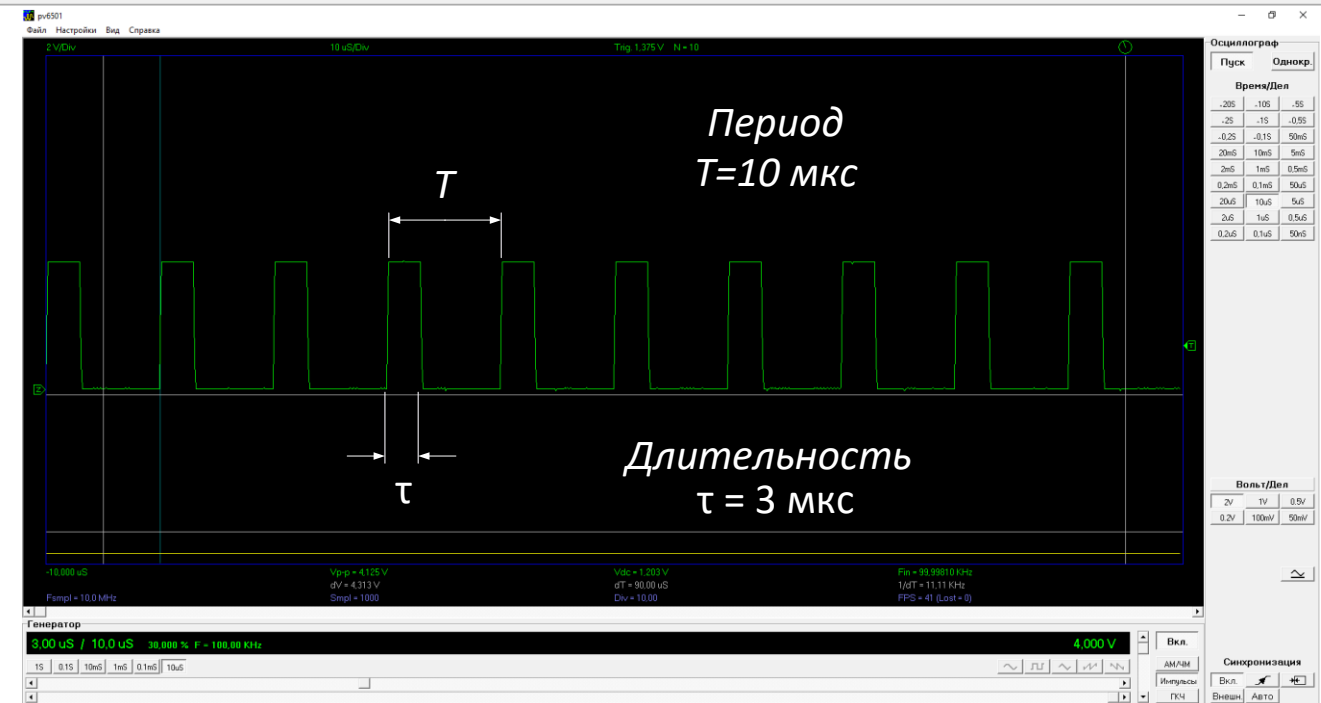
Уровень импульса в вольтах устанавливается с помощью вертикальной полосы прокрутки. В примере на слайде он составляет 4В.

Сначала необходимо выбрать диапазон.



Здесь S – секунды, mS – миллисекунды, uS – микросекунды.

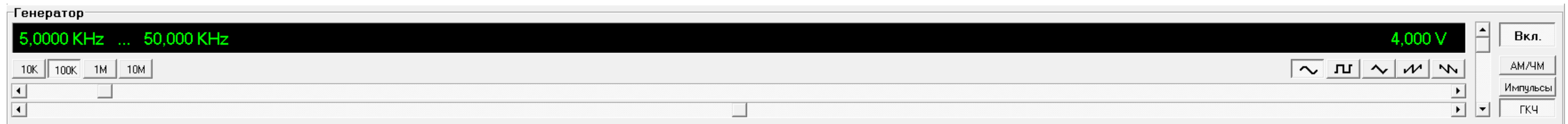
Затем с помощью нижней полосы прокрутки выбирается период следования (в данном примере $T = 10$ мкс) и с помощью верхней полосы прокрутки — длительность импульсов (в данном примере $\tau = 3$ мкс).



В примере скважность импульса (отношение T / τ) составляет 10/3. Коэффициент заполнения 3/10 (отношение τ / T), т.е. 30% заполнение.

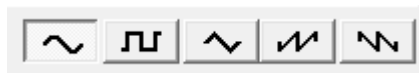
Работа с цифровым осциллографом PV6501

Генератор качающейся частоты (ГКЧ)



Для переключения в режим генератора качающейся частоты нужно нажать на кнопку «ГКЧ».

Форма сигнала выбирается с помощью следующих кнопок.

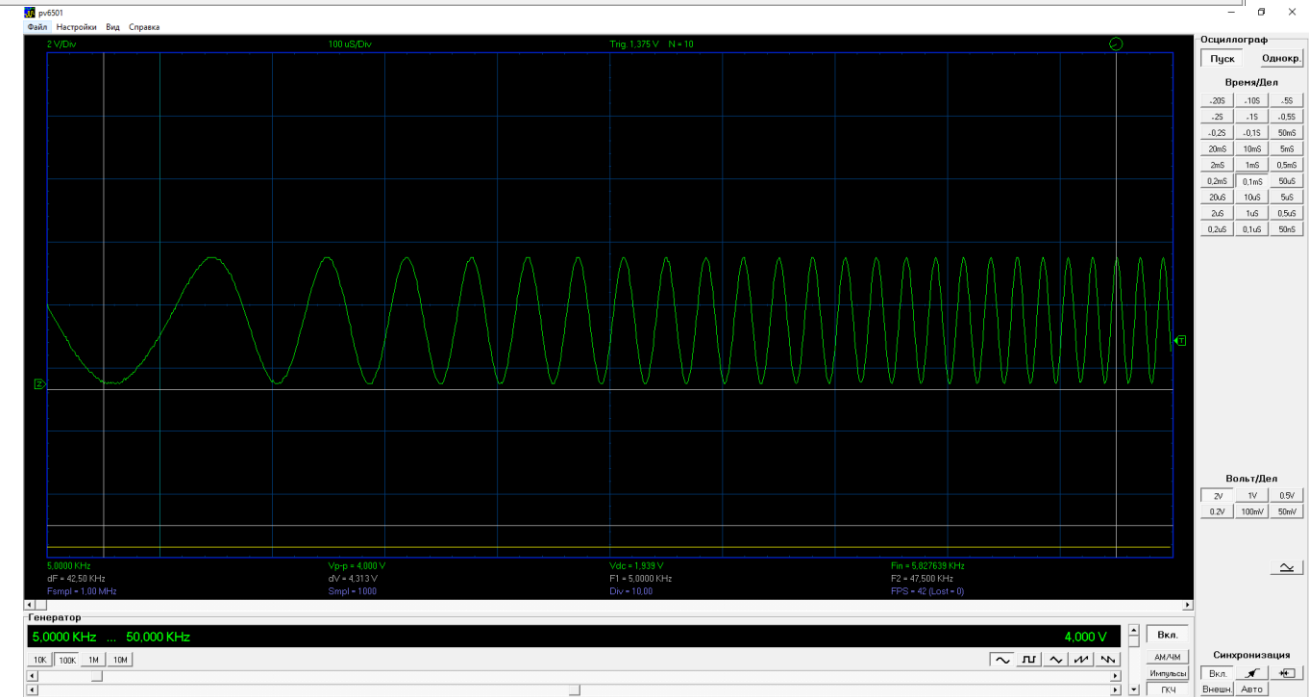


Для интервала изменения частоты сначала выбирается один из частотных диапазонов (в Гц).



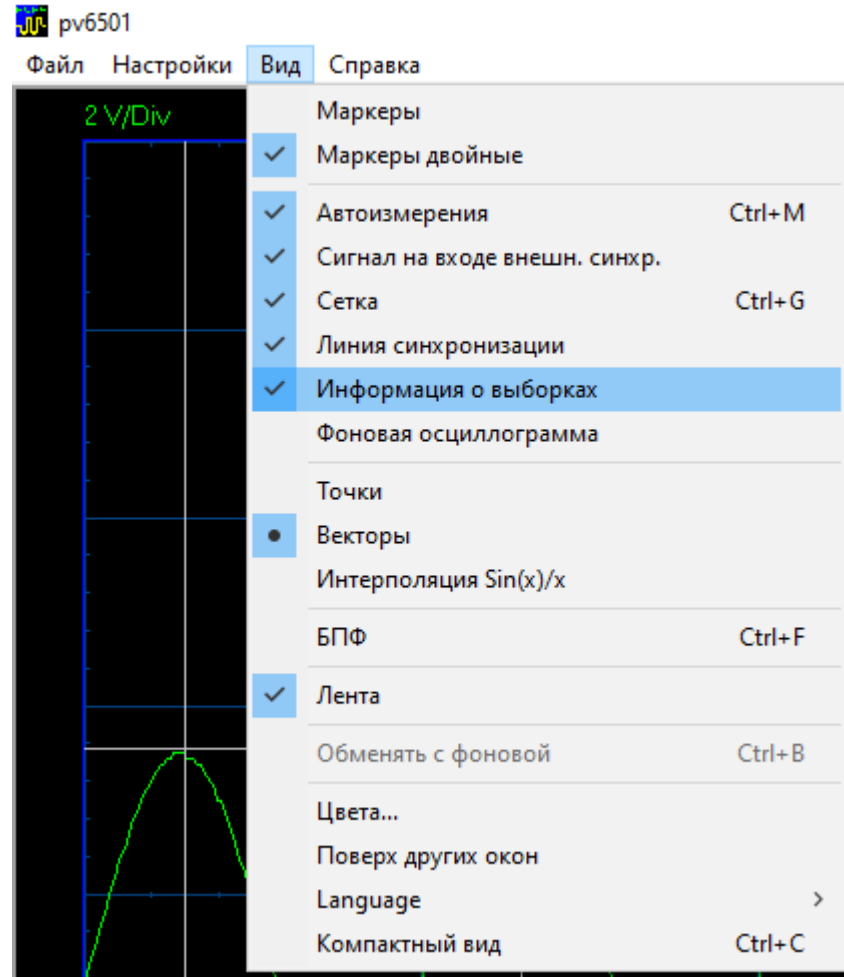
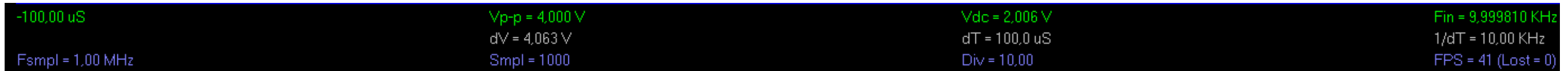
Затем с помощью двух горизонтальных полос прокрутки панели управления генератором выбираются нижняя и верхняя граница диапазона изменения частоты.

Размах колебания (двойная амплитуда) устанавливается с помощью вертикальной полосы прокрутки. В примере на слайде он составляет 4В, амплитуда — 2В.



Работа с цифровым осциллографом PV6501

Информация о выборках.



Состав строки информации о выборках:

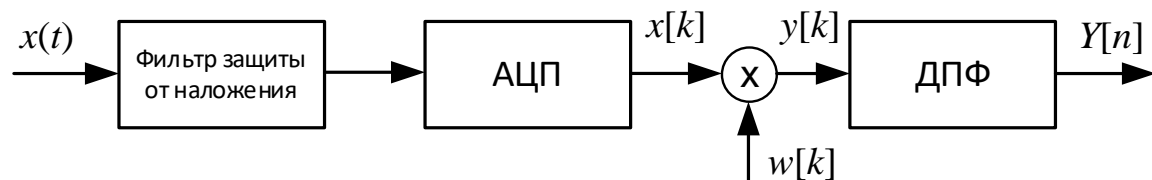
- о F_{smpl} – частота дискретизации снятого сигнала;
- о Smpl – количество набранных отсчетов на одну осциллограмму;
- о Div – количество клеток сетки по горизонтали, на которых отображается осциллограмма;
- о FPS – скорость обновления экрана (осциллограмм в секунду).

Примечание. Цвет строки можно настроить в меню «Вид» — «Цвета...» — «Инф. о выб.»

Работа с цифровым осциллографом PV6501

Выбор частоты дискретизации.

Отличие данного цифрового осциллографа от аналогового в том, что обрабатываемый сигнал представлен с помощью квантованных выборок исходного сигнала $x[k]$.



У осциллографа PV6501 максимальная частота дискретизации в реальном времени – 100 МГц. Полоса пропускания усилителя вертикального отклонения – 20 МГц.

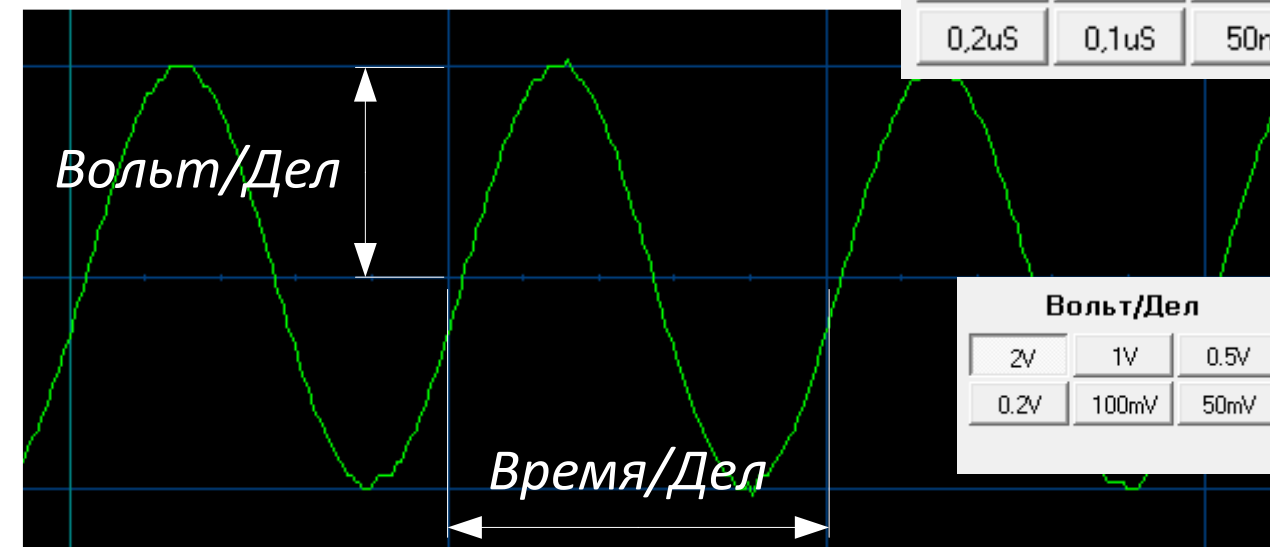
Выбор меньшей частоты дискретизации осуществляется путем прореживания выборок. При этом условие отсутствия **эффекта наложения** может быть нарушено. Значение текущей частоты дискретизации отображается в поле Fsmpl строки информации о выборках.

При этом значение Fsmpl определяется исходя из числа выборок на осциллограмму, числа делений (значения Div) и значения «Время/Дел».

Например, при Smpl = 1000 выборках, значении время/деление 0,1 мс, Div=10, частота дискретизации будет

$$F_{smpl} = \text{Smpl} / \text{Div} / 0,1 \text{ мс} = 1 \text{ МГц}$$

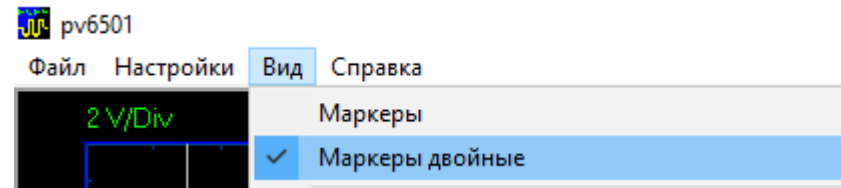
Время/Дел		
20S	10S	5S
2S	1S	0,5S
0,2S	0,1S	50mS
20mS	10mS	5mS
2mS	1mS	0,5mS
0,2mS	0,1mS	50uS
20uS	10uS	5uS
2uS	1uS	0,5uS
0,2uS	0,1uS	50nS



Сетка включается меню «Вид»-«Сетка». Пример приведен для сигнала с амплитудой 2 В и периодом 0,1 мс.

Работа с цифровым осциллографом PV6501

Работа с маркерами сигнала.

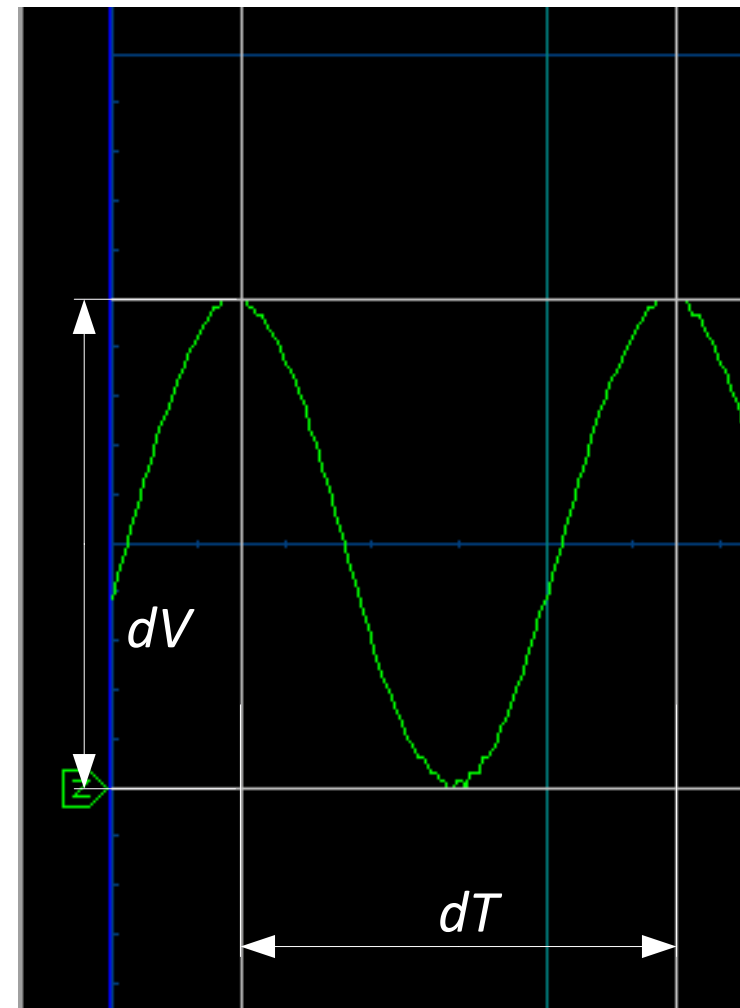


Управляющая программа осциллографа поддерживает двойные и одинарные маркеры

Маркеры представляют собой передвижаемые горизонтальные и вертикальные полосы на осциллограмме, которые позволяют, например, измерить ширину диапазонов времени и значений сигнала.

Значения отображаются в строке, которая располагается над информацией о выборках.

В примере сигнал с амплитудой 2 В и периодом 100 мкс. С помощью маркеров измерены значения $dT=100$ мкс и $dV=4$ В.




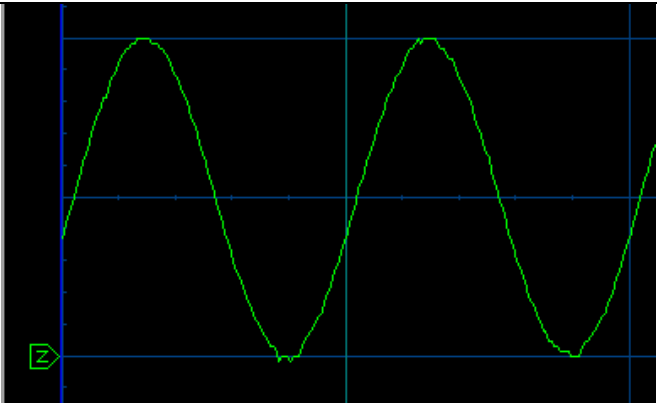

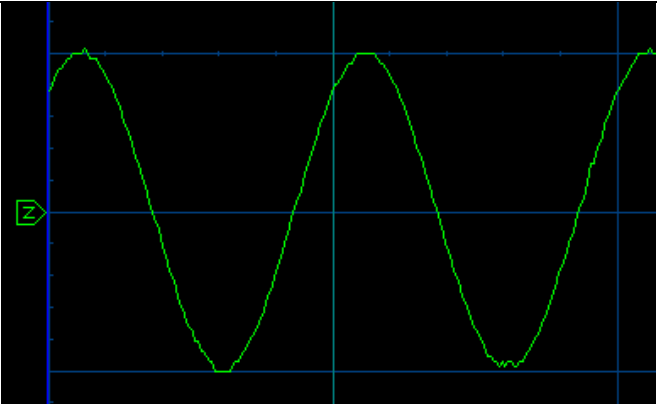
$V_{p-p} = 4.125 \text{ V}$	$V_{dc} = 2.007 \text{ V}$	$F_{in} = 9.999811 \text{ KHz}$
$dV = 4.000 \text{ V}$	$dT = 100.0 \text{ uS}$	$1/dT = 10.00 \text{ KHz}$
$Smpl = 1000$	$Div = 10.00$	$FPS = 41 \text{ (Lost = 0)}$

Работа с цифровым осциллографом PV6501

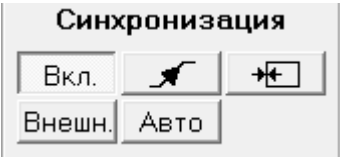
Режимы открытого и закрытого входа. Уровень нуля.

Уровень нуля устанавливается с помощью ползунка .

Уровень нуля и масштаб (Вольт/Дел) должны быть такими, чтобы сигнал не выходил за пределы осциллограммы.

 Открытый вход (пропускаем постоянную составляющую сигнала)	
 Закрытый вход (отбрасываем постоянную составляющую сигнала)	

Синхронизация

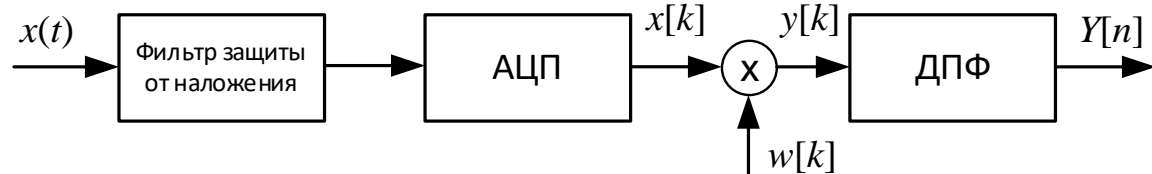


	Включение синхронизации
 	По фронту/по срезу
	Ждущая/автоматическая синхронизация
	Синхронизация по внешнему сигналу (используется в л/р 337н)
	Установка нуля времени в начале осциллограммы
	Уровень триггера синхронизации

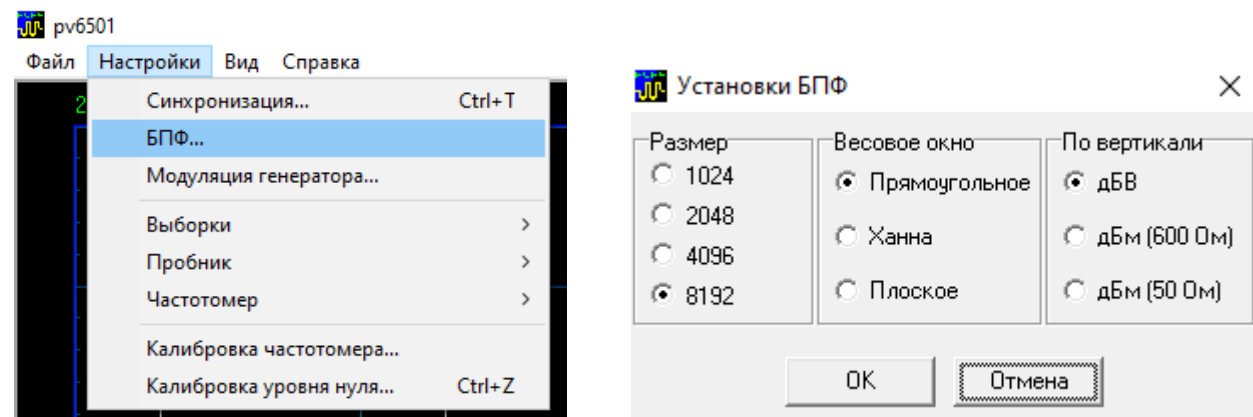
При ждущей синхронизации запуск развертки производится при выполнении условия синхронизации, а для автоматической синхронизации запуск развертки производится автоматически независимо от условия синхронизации.

Работа с цифровым осциллографом PV6501

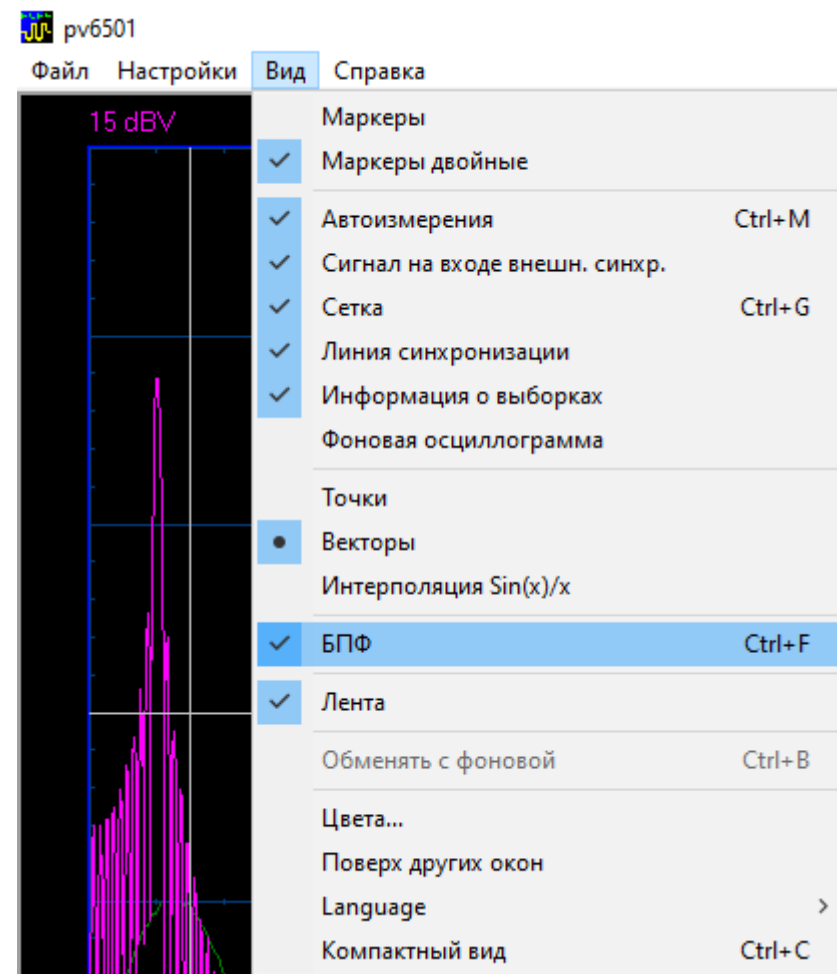
Режим спектроанализатора



В режиме спектроанализатора отображается оценка спектра, получаемая с помощью ДПФ анализа по выборкам сигнала. Вычисление ДПФ производится по алгоритму быстрого преобразования Фурье (БПФ).



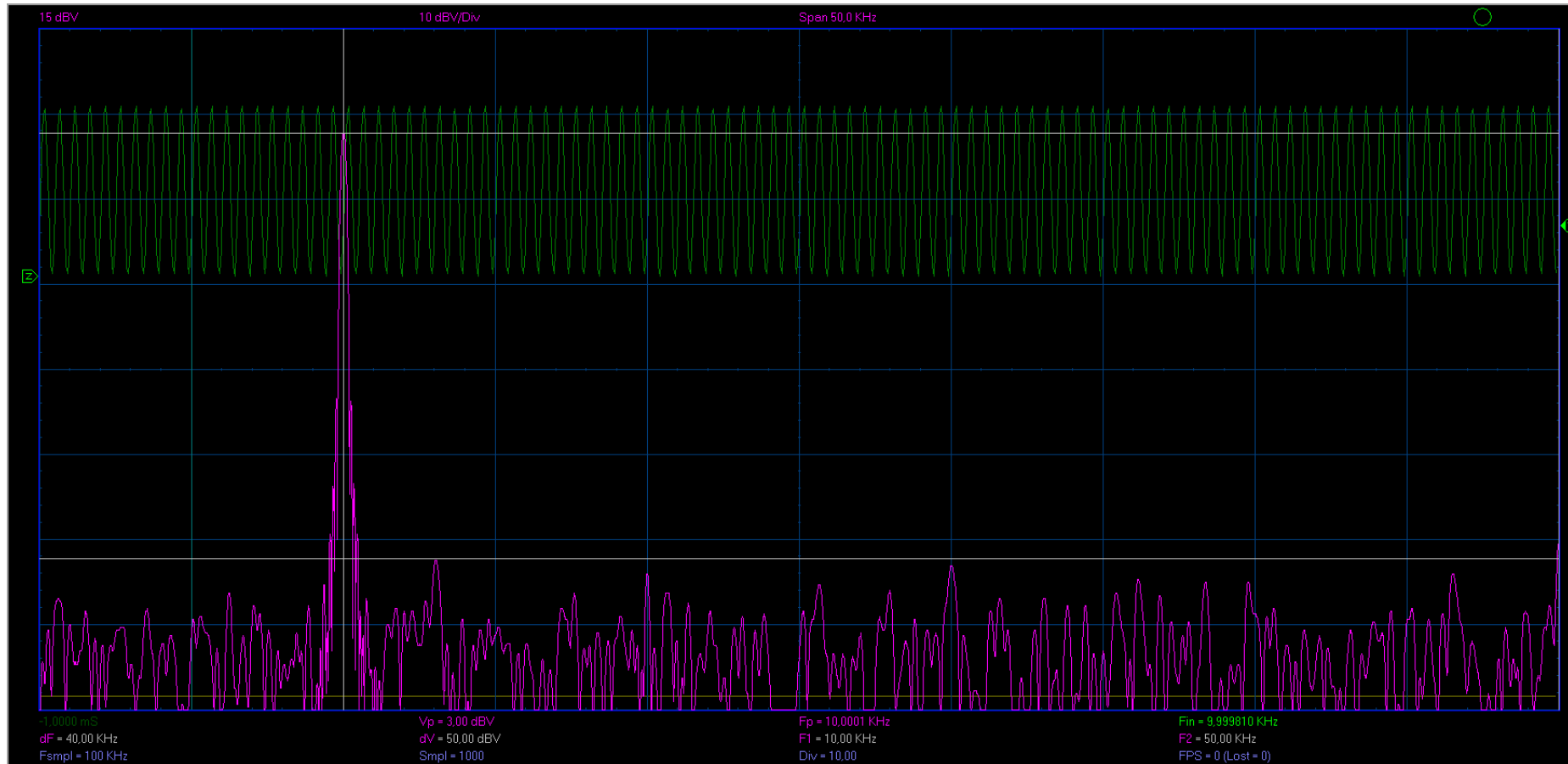
Размерность ДПФ может быть выбрана 1024, 2048, 4096 или 8192. Весовое окно $w[k]$ — прямоугольное, Ханна или с плоской вершиной.



Настройка ДПФ: «Настройки» - «БПФ...».

Включение режима спектроанализатора: «Вид» - «БПФ».

Работа с цифровым осциллографом PV6501



Масштаб по оси ординат логарифмический, например, в дБВ (децибел вольты):

$$20\lg \frac{|X(f)|}{1 \text{ В}}$$

Отображается диапазон частот от 0 до $f_d / 2$.

Разрядность АЦП – $n = 8$ бит (256 уровней квантования).

Ниже уровня шумов квантования

$$\gamma = -(6,02n + 1,76) \text{ дБ} \approx -50 \text{ дБ}$$

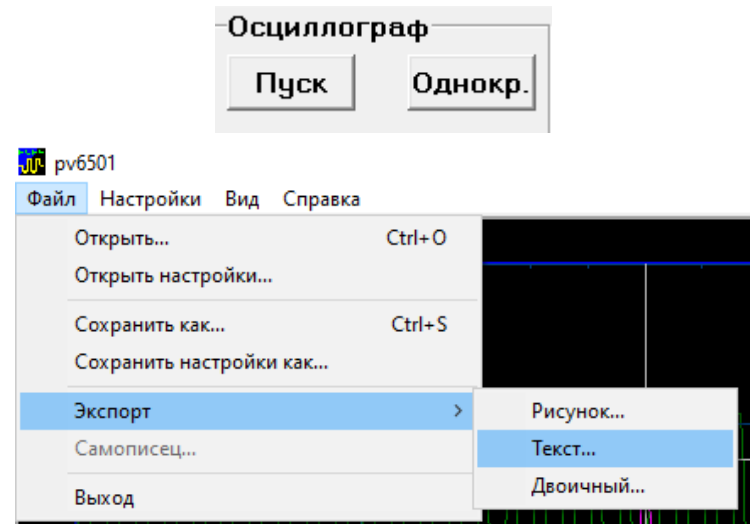
проводить анализ бессмысленно.

Маркеры используются для анализа спектра (dF, dV, F1, F2).

Работа с цифровым осциллографом PV6501

Сохранение осциллограммы в файл

Сначала нужно выбрать однократную развертку



- Возможны следующие варианты сохранения осциллограммы в файл:
- 1) Файл данных PV6101 *.pvd, позволяющий воспроизвести осциллограмму с помощью управляющей программы. Для записи выбрать «Сохранить как ...».
 - 2) «Экспорт» - «Рисунок». Сохраняется скриншот осциллограммы.
 - 3) «Экспорт» - «Двоичный».
 - 4) «Экспорт» - «Текст ...». Запись в текстовый файл, который можно обработать, например, с помощью Python.

Пример записи в текстовом виде.

Time step – шаг дискретизации Δt	<div>а10.txt – Блокнот</div> <div>Файл Правка Формат Вид Справка</div> <div>Oscilloscope data. Time step = 10,00 uS Voltage step = 62,50 mV Zero level = 162</div>		
Voltage step – шаг квантования q			
Zero level – уровень нуля (номер уровня квантования)			
N – порядковый номер выборки			
Smpl. – номер уровня квантования выборки			
	N	Smpl.	Trig
	0	175	0
	1	195	0
	2	213	0
	3	225	0

Пример обработки текстового файла на Python содержится в .ipynb файле для лабораторной работы.