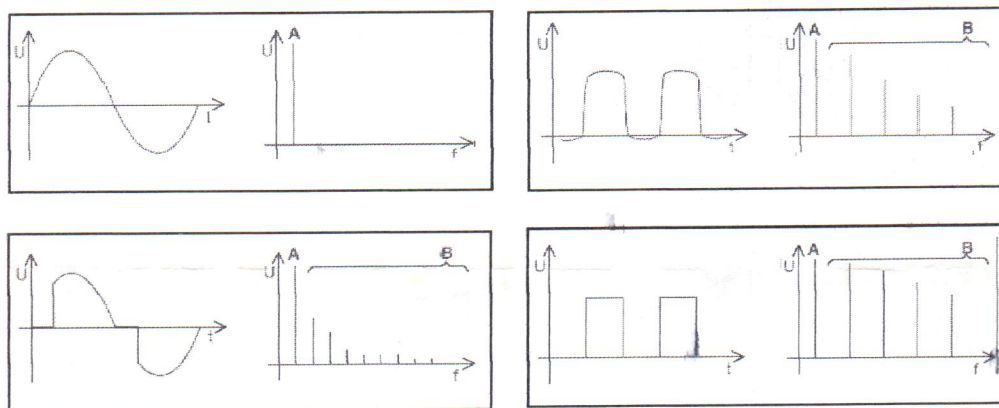


### 3.3.4 Некоторые примеры

На рис. показаны частотные спектры различных форм сигнала. Каждый несинусоидальный сигнал содержит, кроме своей основной частоты, еще и кратные производные основной частоты- гармоника. В общих чертах, чем быстрее изменяется амплитуда сигнала, тем выше высокочастотные гармоники этого сигнала. Это обозначает, что, например, при каждом процессе коммутации возникают высокочастотные сигналы, которые могут стать причиной по-



Формы сигнала и компоненты спектра сигнала, разделенные на основную гармонику А и высшие гармоники В

мех.

Рассмотрим представления в ряд Фурье некоторых часто встречающихся при исследовании ЭМС импульсов. На рис. показаны импульсы прямоугольной формы двух периодически изменяющихся напряжений видеоимпульсов одной и той же основной частоты с известными параметрами  $(U_m, T, \tau)$ , однако различной скважности  $q = T/\tau$ , и относящиеся к ним линейчатые спектры. Из вышесказанного можно установить следующее.

Наименьшая частота  $f_1$  является основной частотой. Ее значение связано со значением периода  $T$ :

$f_1 = 1/T$	(1.7)
-------------	-------

Амплитуды высших гармоник появляются с одинаковым интервалом

$\Delta f = f_1 = 1/T$  их частоты кратны основной частоте:  $f_n = nf_1$

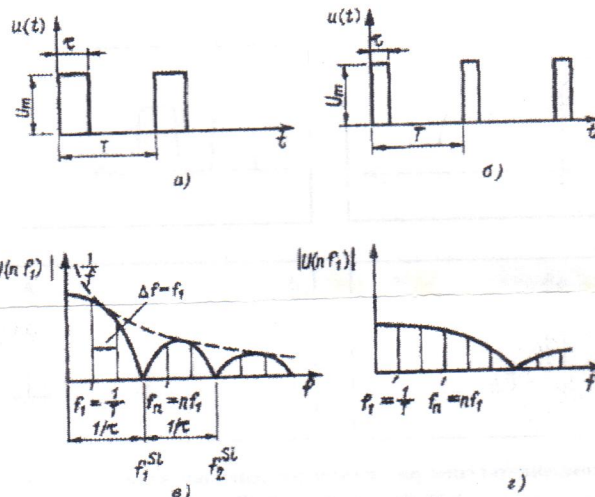
Ряд Фурье для последовательности прямоугольных импульсов, четных относительно точки  $t = 0$ , имеет вид:

$$u(t) = U_m \frac{\tau}{T} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{T}{2n\pi\tau} \left( \sin\left(\frac{2n\pi\tau}{T}\right) \cos n\omega_1 t \right) \right] \quad (1.8)$$

Коэффициенты (спектральные амплитуды) (без постоянной составляющей) определяются:

$$U_n = 2U_m \frac{\tau}{T} \frac{\sin(n\pi\tau/T)}{(n\pi\tau)/T} = 2U_m \frac{\tau}{T} Si(x) \quad (1.9)$$

где  $x = n\pi\tau/T$  и  $Si(x) = \sin x/x$



Линейчатые спектры двух периодических прямоугольных импульсов напряжений с различной скважностью(1:2). Огибающая спектральных амплитуд – функция  $Si(x)$ , огибающая функции  $Si(x)$  – функция  $1/T$

Важно отметить, что последовательность коротких импульсов, следующих друг за другом достаточно редко (скважность  $q = T/\tau \gg 1$ ), обладает богатым спектральным составом, т.е., является более широкополосной.

Огибающая спектральных амплитуд следует функции  $Si(x)$  ( $Si(x) = \sin x/x$ ) причем при графическом представлении в большинстве случаев изображается амплитуда этой функции. Нулевое значение этой функции соответствует обратной величине длительности импульса  $\tau$ .



$f_1^{si} = 1/\tau$	(1.9)
---------------------	-------

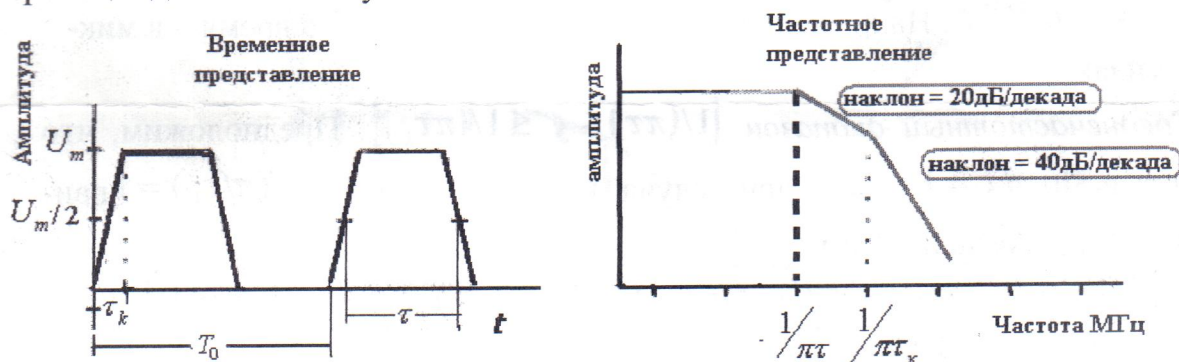
Другие нулевые значения следуют с интервалом  $nf_1^{si}$ .

На практике нулевые значения проявляются не столь явно выраженными, как на рис.4, так как из-за неизбежных асимметрий (например, экспоненциальных нарастаний и спада прямоугольных импульсов) они сглаживаются.

Коэффициент  $2U_m\tau/T$  функции  $Si(x)$  при неизменном периоде пропорционален не амплитуде импульса, а площади импульса  $U_m\tau$ . Таким образом, высокие и узкие импульсы при низких частотах могут иметь такую же огибающую, как импульсы низкие и широкие.

Огибающая амплитуд функции  $Si(x)$  есть функция  $1/x$ . Для прямоугольных импульсов с бесконечно большой длительностью периода  $T$  спектральные линии и максимумы функции  $Si(x)$  бесконечно сближаются.

Рассмотрим трапецеидальный импульс. На рис. 5 приведены параметры симметричного (с одинаковыми временами времени фронта и спада) трапецеидального импульса.



**Трапецеидальный импульс и его огибающая плотности распределения амплитуд**

При помощи преобразования Фурье для трапецеидального импульса плотность распределения амплитуд импульса определяется как:

$U(f) = 2U_m\tau \frac{\sin n\pi f\tau}{n\pi f\tau} \frac{\sin n\pi f\tau_k}{n\pi f\tau_k}$	(1. )
---	-------

При  $\tau_k = 0$  трапецеидальный импульс преобразуется в прямоугольный, при  $\tau = \tau_k$  в треугольный. Таким образом, трапецеидальный импульс включает большую часть встречающихся на практике импульсов помех.

Обычно рассмотрение основывается на аппроксимации огибающей плотности распределения амплитудной плотности трапецеидального импульса

са тремя отрезками прямой (рис. . ). Аппроксимация зависимости амплитуды гармоник от частоты определяется угловыми точками  $f_n = 1/\pi\tau$  нижняя и  $f_e = 1/\pi\tau_k$  - верхняя сопрягающая частота.

Низкочастотный диапазон  $f \leq f_n$ . При низких частотах функции синуса приблизительно равна своему аргументу, так что огибающая оказывается параллельной оси абсцисс:

$U(f) = 2U_m\tau = const$	(1.15)
---------------------------	--------

Плотность распределения амплитуд гармоник, в дБ, зависит исключительно от площади импульса, а не от его формы, амплитуды или выбранной частоты:

$U(f)_{дБ} \approx 20 \lg(2U_m\tau / A_0)$	(1.16)
--	--------

где  $A_0 = 1 \text{ мкВ} \cdot \text{с}$ . Напряжение  $U_m$  измеряется в Вольтах, а время – в микросекундах.

Среднечастотный диапазон  $[1/(\pi\tau) \leq f \leq 1/(\pi\tau_k)]$ . Предположим, что числитель  $\sin \pi f\tau = 1$  (наихудший случай) и частное  $\sin \pi f\tau_k / (\pi f\tau_k) = 1$  ввиду  $\sin x \approx x$ . Тогда получим:

$U(f) \approx 2U_m\tau / (\pi f\tau) = 2U_m / (\pi f)$	(1.17)
--	--------

Плотность распределения амплитуд гармоник, дБ, пропорциональна  $1/f$  и поэтому спадает прямолинейно с крутизной 20 дБ/декада:

$u(f)_{дБ} = 20 \lg \frac{2U_m / (\pi f)}{A_0}$	(1.18)
---	--------

Здесь частота измеряется в МГц

Высокочастотный диапазон ( $f \geq f_e$ ). Предположим, что  $\sin \pi f\tau = 1$  и  $\sin \pi f\tau_k = 1$  (наихудший случай). Тогда получим

$U(f) = 2U_m\tau \frac{1}{\pi f\tau} \frac{1}{\pi f\tau_k}$	(1.19)
---	--------



Или

$$U(f) = 2U_m / (\pi^2 f^2 \tau_k) \quad (1.20)$$

Плотность распределения амплитуд гармоник, дБ, пропорциональна  $1/f^2$  и поэтому спадает прямолинейно с крутизной 40 дБ/декада:

$$U(f)_{\text{дБ}} \approx 20 \lg \frac{2U_m}{\pi^2 f^2 \tau_k A_0} \quad (1.21)$$

В качестве конкретного примера рассмотрим трапециидальный импульс с  $T_0 = 40 \text{ нс}$  и  $\tau_k = 2 \text{ нс}$ . Поскольку почти 95% энергии периодического трапециидального сигнала содержится в первых десяти гармониках, большинство специалистов в области ЭМС *определяет минимальное значение полосы частот импульса как 10-ти кратное значение основной частоты*



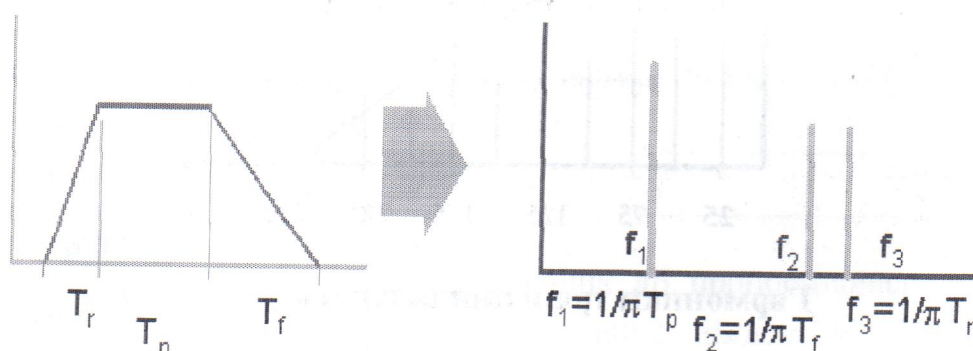
. В нашем примере, если тактовая частота равна 25 МГц, то полоса частот принимается равной 250 МГц. Однако такие оценки справедливы только тогда, когда время фронта/спада не выше 2 наносекунд. Как видно из рис. максимальные значения амплитуд гармоник сигнала приходятся на первые 10 частот спектра.

Ширина полосы частот спектра импульса определяется скоростью его нарастания или спада и *определяется как диапазон частот, в котором сконцентрирована практически вся энергия импульса сигнала или помехи.* Полоса частот обратно пропорциональна времени фронта и времени спада импульса, а также периоду повторения импульса, т.е. параметрам импульса,

используемым при временном представлении сигнала. Увеличение времени нарастания импульса (его замедление) ведет к значительному снижению амплитуд высших гармоник. Тогда, если приемное устройство имеет определенную полосу пропускания, то замедление скорости нарастания или спада импульса помехи приводит к снижению уровня высокочастотных помех. Однако, если время фронта или спада очень мало, то ширина спектра импульса нарастает и доля высокочастотных гармоник увеличивается.

Если времена фронта и спада не равны друг другу, то в частотном спектре, в соответствии с приведенными выше Фурье – представлениями, имеются гармоники с частотами, обратными временам фронта и спада. И если, например, тактовая частота только 5 МГц, а время фронта 1 нс, то появится гармоника с частотой  $f = 1 / \pi * \tau_{\phi}$ , что составит 318 МГц. Т.е. с точки зрения ширины спектра важным окажется не период импульсов, а времена спада или фронта.

При помощи вышеприведенных уравнений может быть представлена огибающая плотности распределения амплитуд для любых трапецидальных и треугольных импульсов с параметрами  $U_m$ ,  $\tau$  и  $\tau_k$ .



### Несимметричный трапецидальный импульс

Ни рис. она приведена в двойном логарифмическом масштабе. Сопрягающие или угловые частоты получаются путем приравнивания значений функции в точках пересечения отрезков прямых.

Первая сопрягающая частота определяется из уравнения

$$2U_m \tau = 2U_m / (\pi f_i)$$

как

$$f_i = 1 / (\pi \tau)$$

(1.22)

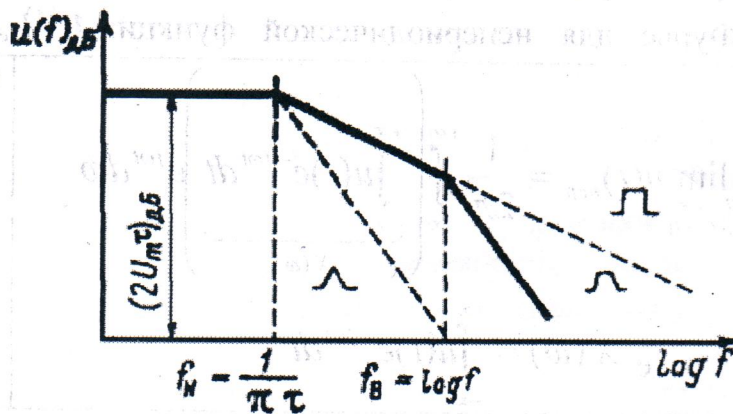
Вторая сопрягающая частота определяется из уравнения



$$2U_m / (\pi f_e) = 2U_m / (\pi^2 f_e^2 \tau_k)$$

как

$$f_e = 1/(\pi \tau_k) \quad (1.23)$$



**Амплитудные плотности прямоугольного, трапецидального и  
треугольного импульсов (для последнего  $f_i = f_e$ )**