Измерение временных интервалов импульсов при помощи аналогового осциллографа.

В заметке рассказывается об измерении длительности импульсов при помощи аналогового электронно-лучевого осциллографа и дается оценка точности этих измерений. В последнее время есть много хороших цифровых осциллографов, запоминающих форму сигнала и рассчитывающих его параметры, но их частотный диапазон пока ограничен. Поэтому заметка может пригодится при измерении длительности быстропротекающих процессов.

Способ №1 — по калиброванной развертке.

- Проверяют развертку по калибратору частоты
- Развертку регулируют так, чтобы возможно больше растянуть наблюдаемый импульс (от левой до правой границы шкалы)
- Измеряя длину импульса l на экране определяют длительность импульса $\tau_И$

Погрешности:
а) погрешность меры, σ_0 - нестабильность частоты калибратора $\sigma_0 \leq 10^{-3}$ (т.е менее 0,1%)
б) погрешность калибровки шкалы по мере, σ_K - визуальная субъективная
в) погрешность коэффициента развертки на разных множителях развертки, σ_P - систематическая
г) нелинейность напряжения развертки, σ_H - систематическая
д) погрешность преобразования — искажение формы импульса в канале осциллографа, $\sigma_П$ - объективная, случайная
е) погрешность сравнения по шкале - σ_C - визуальная субъективная

Все погрешности статистически независимы, поэтому общая погрешность:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_K^2 + \sigma_P^2 + \sigma_H^2 + \sigma_П^2 + \sigma_C^2}$$

Погрешность σ_0 пренебрежимо мала, погрешности σ_K и σ_C зависят от экспериментатора, погрешности σ_P , σ_H и $\sigma_П$ зависят от качества прибора.

Для того, чтобы погрешность преобразования — т. е. погрешность передачи фронта импульса не превышала 2% [Tektronics Products US, Tektronics Inc. 1975 336р.] необходимо, чтобы время нарастания переходной характеристики t_H было бы в 5 раз меньше длительности фронта импульса. $t_Ф$, т. е.

$$t_H \leq \frac{t_Ф}{5}$$

Время нарастания определяется шириной полосы пропускания осциллографа по уровню -3дБ

$$t_H \approx \frac{0{,}35}{\Delta F}$$

Таким образом ширина полосы пропускания должна быть:

$$\Delta F \approx \frac{1{,}75}{t_{\Phi}}$$

где ΔF выражена в МГц если время нарастания выражено в мкс или
ΔF выражена в ГГц если время нарастания выражено в нс.

Коэффициент нелинейности развертки σ_H лежит в пределах от 3% для осциллографов 1-го класса и до 20% для осциллографов 4-го класса.

<u>Пример1.</u> Оценить погрешность измерения длительности импульса для осциллографа 1-го класса с размером шкалы 10см и ценой деления 1мм.

а) $\sigma_0 \approx 10^{-3}$

б) погрешность калибровки $\sigma_K = \frac{цена\,деления}{размер\,шкалы} = \frac{1}{100} = 10^{-2}$

в) погрешность преобразования $\sigma_П = 2 \cdot 10^{-2}$

г) погрешность сравнения в идеальном случае (импульс занимает всю шкалу) $\sigma_C = 10^{-2}$

Итого в идеальном случае: $\sigma_\Sigma = \sqrt{10^{-6} + 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 10^{-4} + 10^{-4}} = 0{,}0387$ или 3,9%

В реальном случае импульс может занимать лишь часть шкалы, например 1см. Поскольку цена деления 1 мм, то погрешность сравнения будет равна $\sigma_C = \frac{0{,}1\,см}{1\text{см}} = 10^{-1}$

Тогда погрешность равна: $\sigma_\Sigma = \sqrt{10^{-6} + 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 10^{-4} + 10^{-2}} = 0{,}107$ или 11%

<u>Пример2.</u> Оценить, какое время нарастания и полоса пропускания должны быть у осциллографа, чтобы наблюдать импульс с длительностью фронта 0,5нс.

Время нарастания $t_H \le t_\Phi / 5 = 0{,}1\,нс$ Полоса пропускания $\Delta F \ge 0{,}35 / t_H = 3{,}5\,ГГц$

Способ №2 — Метод Мэрфи.

Этот способ придуман для того, чтобы исключить погрешность временной развертки осциллографа. Недостаток метода — требуется двухканальный или двухлучевой осциллограф, в котором предусмотрены две развертки — основная и задержанная. [Мэрфи Дж. Исключение погрешностей временной развертки при осциллографических измерениях - Электроника 1978 №13 с.59-67].

Блок схема осциллографа, предложенная Мэрфи показана на рис.1, а на рис.2 показана временная диаграмма его работы.

Исследуемый импульс подается на входы Y1 и Y2 каналов вертикального отклонения лучей осциллографа, а также на вход синхронизации генератора основной развертки и запускает его. Пилообразное напряжение генератора основной развертки отклоняет луч 1-го канала осциллографа по горизонтали. Также пилообразное напряжение основной развертки подается на

компаратор. Как только это напряжение превысит напряжение, установленное регулятором задержки, запускается генератор задержанной развертки, который отклоняет по горизонтали луч 2-го канала осциллографа.

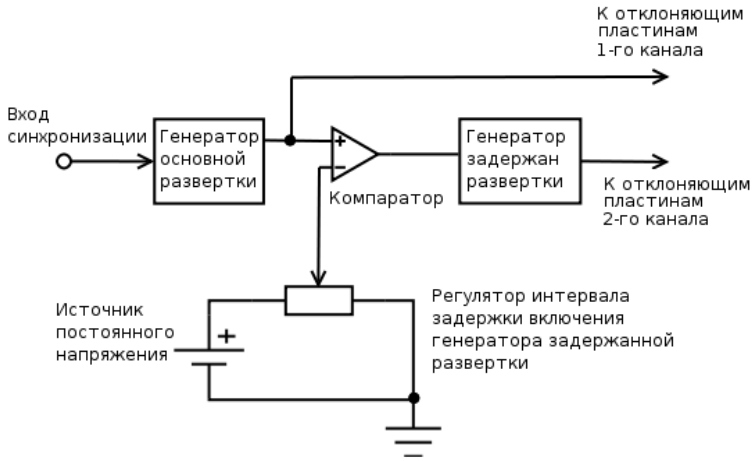

Рис.1 Блок схема 2-х каального осциллографа с возможностью измерения длительности импульса

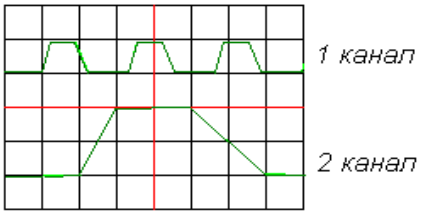

Рис.3 Наблюдаемые импульсы

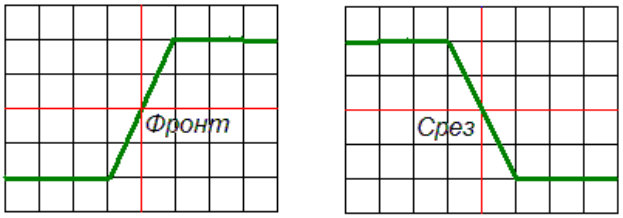

Рис.4

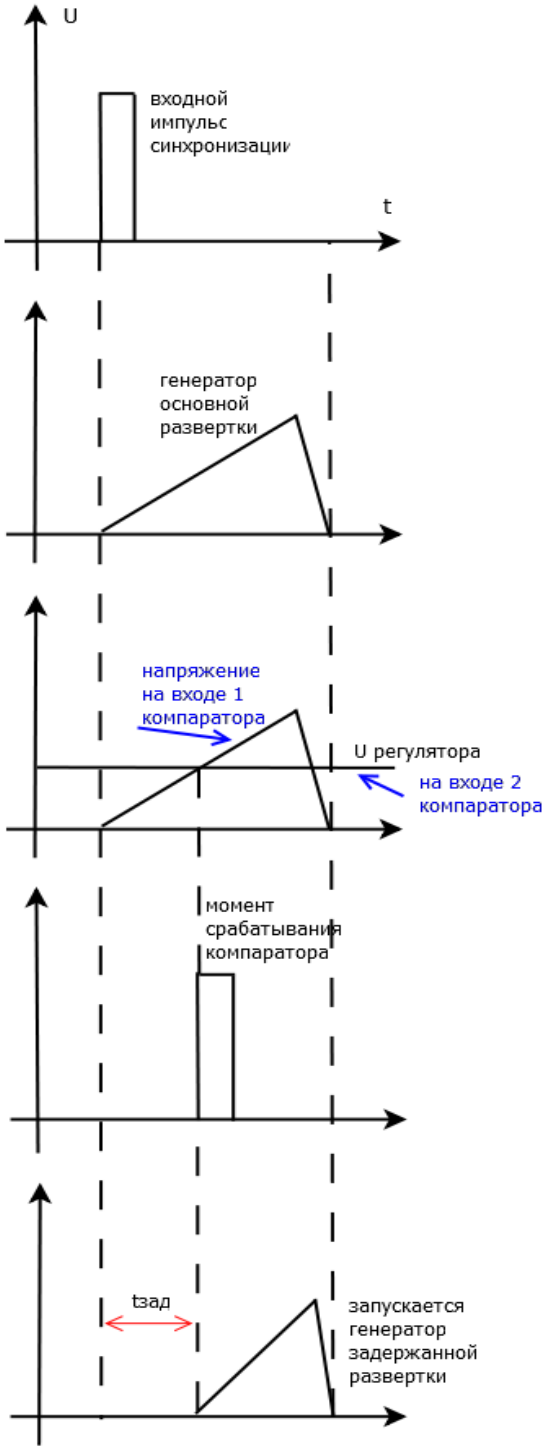

Рис.2

Луч 1-го канала будет высвечивать наблюдаемые импульсы, а во 2-м канале будут эти же импульсы, но задержанные на некоторое время $\tau_{зад}$, которое определяется величиной управляющего напряжения регулятора задержки (см. рис.3).

Если теперь уменьшать период генератора задержанной развертки, то изображение импульсов во 2-канале будет «растягиваться» и можно подобрать такой период развертки, когда изображение одного импульса займет всю шкалу.

Для повышения точности целесообразно в качестве опорной точки выбрать центр шкалы, а

фронт и срез импульса «растягивать» на всю шкалу осциллографа (см. рис.4).
Сначала, регулируя $\tau_{зад}$ совмещают точку переднего фронта импульса по уровню половины его амплитуды с центром экрана (см рис). Снимают отсчет по лимбу шкалы регулятора задержки $\tau_{зад1}$. Затем, регулируя $\tau_{зад}$ совмещают точку заднего фронта импульса по уровню половины его амплитуды с центром экрана (см рис). Снимают отсчет по лимбу шкалы регулятора задержки $\tau_{зад2}$. Длительность импульса равна разности отсчетов

$$\tau_и = \tau_{зад2} - \tau_{зад1}$$

Для первоначальной калибровки шкалы регулятора задержки можно применить генератор синусоидального сигнала и частотомер. Задавая различный период синусоидального сигнала и вычислив его период, и проводя выше описанные измерения наносят основные и промежуточные точки на лимб шкалы задержки.

Найдем погрешности, связанные с неточностью отсчета по шкале осциллографа и регулятора задержки.
Абсолютная погрешность отсчета равна: $\Delta = \sigma_{C1} \cdot \tau + \sigma_{C2} \cdot \tau_{max}$

где τ -длительность измеряемого импульса, τ_{max} - максимальная задержка на лимбе шкалы регулятора задержки.

σ_{C1} - это субъективная погрешность, характеризует неточность установки фронта и среза импульса в центр шкалы. Если фронт (или срез) занимают всю шкалу, то

$\sigma_{C1} = \dfrac{цена\,деления}{размер\,шкалы}$, например, если размер шкалы 10см, а цена деления 1мм, то $\sigma_{C1} = 10^{-2}$

σ_{C2} - это субъективная погрешность, характеризует погрешность отсчета по лимбу шкалы регулятора задержки. Если, лимб содержит 200 делений, то $\sigma_{C2} = \dfrac{1}{200} = 5 \cdot 10^{-3}$

Следовательно, относительная субъективная погрешность отсчета равна:

$$\sigma_c = \frac{\Delta}{\tau} = \left(10^{-2} + 5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\tau_{max}}{\tau}\right)$$

Если $\dfrac{\tau_{max}}{\tau} \le 5$ то относительная субъективная погрешность σ_c не превышает 3,5%

<u>Пример 3.</u> Оценим общую погрешность метода Мэрфи.
Она дается формулой $\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_K^2 + \sigma_П^2 + \sigma_C^2}$
Здесь
а) $\sigma_K = 10^{-3}$ - погрешность калибровки шкалы временной задержки по измерению частоты образцового генератора, случайная
б) $\sigma_П \approx 2 \cdot 10^{-2}$ - погрешность преобразования осциллографа, систематическая
в) $\sigma_C \le 3{,}5 \cdot 10^{-2}$ - погрешность отсчета, субъективная и случайная
Общая погрешность получается менее 4,1%

Вывод.
В методе Мэрфи исключена значительная погрешность нелинейности развертки 3-20%, но взамен требуется осциллограф специальной конструкции.

Способ 3. Применение импульсного генератора с регулируемой задержкой.

Некоторые промышленные генераторы импульсов, например Г5-54, имеют точную регулируемую задержку между импульсным сигналом и сигналом синхронизации.
В СВЧ технике существуют линии с регулируемой задержкой.
Это позволяет использовать метод Мэрфи с обычным одно канальным осциллографом.
Метод измерения проиллюстрирован на рис.5.

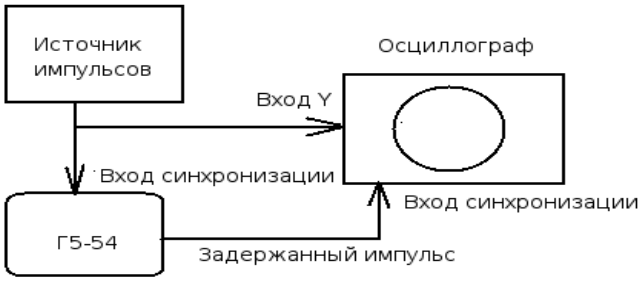

Рис. 5

Осциллограф и генератор импульсов работают в ждущем режиме с внешней синхронизацией.
Регулируя период развертки осциллографа «растягиваем» изображение импульса на всю шкалу.
Далее действуем как в методе Мэрфи.

Выводы:

- Предлагаемый метод позволяет обойтись стандартными приборами.
- Вся точность определяется точностью задержки импульса $\tau_{зад}$, поэтому метод имеет смысл применять, если точность регулирования $\tau_{зад}$ выше нелинейности развертки осциллографа.