

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА π -ТОЧЕК В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

В. В. Молебный

При измерении группового времени запаздывания по методу π -точек [1] на вход испытуемого четырехполюсника (линии задержки) подается синусоидальное напряжение:

$$u_{\text{вх}}(t) = U_{m \text{ вх}} \cos(\omega t + \varphi_{\text{вх}}). \quad (1)$$

На выходе четырехполюсника

$$u_{\text{вых}}(t) = U_{m \text{ вых}} \cos(\omega t + \varphi_{\text{вых}}). \quad (2)$$

Разность фаз $\varphi(\omega) = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}}$ в общем случае зависит от частоты. Скорость изменения $\varphi(\omega)$ с частотой для согласованного четырехполюсника равна групповому времени запаздывания

$$\tau(\omega) = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}. \quad (3)$$

В ряде случаев эта величина представляет наибольший интерес. Если зависимость $\varphi(\omega)$ линейна, то для определения τ достаточно измерить $\varphi(\omega)$ на двух частотах: ω_1 и ω_2 . Тогда

$$\tau = \frac{\varphi(\omega_2) - \varphi(\omega_1)}{\omega_2 - \omega_1}. \quad (4)$$

Очень удобно выбрать два таких значения частоты ω_1 и ω_2 , на которых соответственно $\varphi(\omega_1) = (2k_1 + 1)\pi$, $\varphi(\omega_2) = (2k_2 + 1)\pi$, где k_1 — некоторое положительное число; $k_2 = k_1 + 1$. Такие частоты называются π -точками. Разность этих частот $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{2\pi}{\tau}$. В π -точках сумма входного и выходного напряжений минимальна ($u_{\text{сум}}(t) = 0$ при $U_{m \text{ вх}} = U_{m \text{ вых}}$). Блок-схема измерений представлена на рис. 1. Назначение attenuатора — выравнивание амплитуд напряжений, поступающих на входы сумматора.

Однако, если учесть, что $\varphi(\omega)$ может лишь приближаться к линейной зависимости в окрестности некоторой частоты ω_0 , лежащей между ω_1 и ω_2 , то станет ясно, что соотношение (4) приближенно. Тем не менее, в ряде случаев, например, при измерениях ультразвуковых линий задержки нелинейностью фазо-частотной характеристики при определенных условиях можно пренебречь.

Для получения минимальной разности между измеренным значением времени запаздывания и значением, соответствующим математическому определению, разность между ω_2 и ω_1 должна быть минимальной. В то же

время с уменьшением интервала между ω_2 и ω_1 растет погрешность измерения времени запаздывания, причиной которой является неидеальность измерительной аппаратуры. В самом деле, нетрудно видеть, что относительная погрешность измерения времени запаздывания в предположении, что точности определения соответствующих координат фазо-частотной характеристики одинаковы, равна

$$\delta\tau = \frac{2\Delta\varphi}{\varphi(\omega_2) - \varphi(\omega_1)} + \frac{2\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} \delta\omega. \quad (5)$$

Здесь $\Delta\varphi$ — абсолютная погрешность измерения разности фаз в точках $\varphi(\omega_1)$ и $\varphi(\omega_2)$; $\delta\omega$ — относительная погрешность измерения частоты в точках ω_1 и ω_2 ; $\omega_0 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$.

Эти два соображения и накладывают ограничения сверху и снизу на диапазон значений времени запаздывания, в котором целесообразны

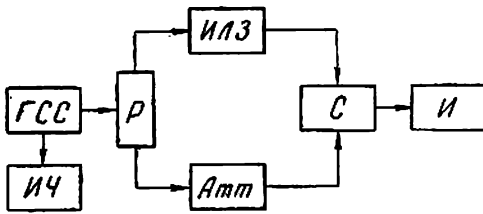


Рис. 1. ГСС — генератор стандартных сигналов, Р — развязывающий элемент, ИЛЗ — испытываемая линия задержки, Атт — аттенюатор, С — суммирующее устройство, И — индикатор нуля, ИЧ — измеритель частоты.

измерения по методу π -точек. Что касается ограничений снизу, то здесь решение определяется видом фазо-частотной характеристики испытуемого объекта [2]. Если задана допустимая частная погрешность измерения частоты за счет неточного измерения значений ω_1 и ω_2 , то при известной точности используемого частотомера может быть определена верхняя граница указанного диапазона измеряемых значений времени запаздывания:

$$\tau_{\text{в}} = \frac{1}{2f_0} \cdot \frac{\delta\tau_{\text{доп}}}{\delta f}, \quad (6)$$

где f_0 — средняя частота диапазона, в котором производится измерение; $\delta\tau_{\text{доп}}$ — допустимая относительная частная погрешность измерения времени запаздывания; δf — относительная погрешность измерения частоты.

Понятие группового времени запаздывания определено нами в предположении согласования испытуемого объекта. В случае наличия отражений измеренное значение времени запаздывания может отличаться от приведенного математического определения. Этот момент важен с практической точки зрения, так как в последние годы широкое распространение начинают получать линии задержки, имеющие значительный уровень отраженных сигналов, используемые для формирования и оптимальной обработки импульсных сигналов [3]. В этих случаях при измерении группового времени запаздывания должно быть исключено влияние неоднородностей внутри испытуемой линии задержки на результат измерений. Другими словами, необходимо исключить интерференцию основного сигнала и сигналов, образованных из-за отражений в линии задержки. Для этого используется импульсный режим работы, что позволяет разделить во времени указанные сигналы.

Очевидно, что длительность импульсов должна быть меньше времени, необходимого для прохождения сигналом двойного расстояния между двумя ближайшими неоднородностями.

Может быть использована несимметричная схема рис. 2. Амплитудный импульсный модулятор ИМ включается только в канал линии задержки. Осциллограф используется для индикации нуля суммарного напряжения (предполагается, что амплитуды складываемых напряжений равны). Хотя отраженные сигналы и видны на экране осциллографа, но индикация ведется по сумме напряжений основного радиоимпульса и непрерывного колебания (рис. 3).

Описанная схема обладает существенным недостатком: на точность измерения времени запаздывания влияет вид фазо-частотной характеристики модулятора. Выражение для τ в этом случае таково:

$$\tau = \frac{\varphi_1(\omega_2) - \varphi_1(\omega_1)}{\omega_2 - \omega_1}. \quad (7)$$

Здесь $\varphi_1(\omega_1)$ и $\varphi_1(\omega_2)$ — суммарные значения фазовых сдвигов между сравниваемыми напряжениями на соответствующих частотах:

$$\begin{aligned} \varphi_1(\omega_1) &= \varphi(\omega_1) + \varphi_m(\omega_1); \\ \varphi_1(\omega_2) &= \varphi(\omega_2) + \varphi_m(\omega_2), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\varphi_m(\omega_1)$ и $\varphi_m(\omega_2)$ — фазовые сдвиги, вносимые модулятором на частотах ω_1 и ω_2 .

Погрешность измерения времени запаздывания будет равна нулю лишь в случае, если $\varphi_m(\omega_1) = \varphi_m(\omega_2)$. Это условие может быть изменено при использовании двухканальной схемы, когда импульсные модуляторы стоят в обоих каналах. Задержка сигнала в испытуемом объекте компенсируется более поздним запуском модулятора, стоящего в канале

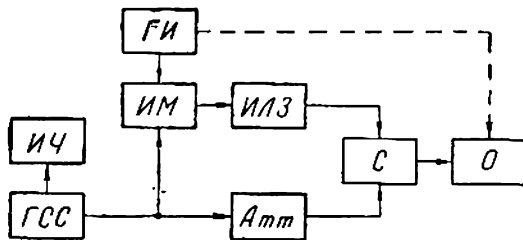


Рис. 2. ГСС — генератор стандартных сигналов, ВИ — генератор видеоимпульсов, ИМ — импульсный амплитудный модулятор, ИЛЗ — испытуемая линия задержки, Атт — аттенюатор, С — суммирующее устройство, О — осциллограф, ИЧ — измеритель частоты.

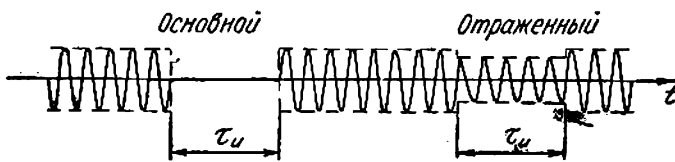


Рис. 3. Осциллограмма суммарного колебания. $\tau_{\text{н}}$ — длительность импульса.

аттенюатора. Задержка запуска может быть осуществлена введением дополнительного фазового сдвига в напряжение, используемое для запуска модулятора в канале аттенюатора. Основным требованием к модуляторам в этом случае является их идентичность.

Этого можно избежать, применив симметричную схему рис. 4. Особенностью ее работы является необходимость подстройки частоты следования импульсов так, чтобы период следования был примерно равен или кратен времени запаздывания. Тогда импульсы, прошедшие через линию задержки, совпадут во времени с импульсами, прошедшими через аттенюатор, со сдвигом во времени на один или несколько импульсов. Ввиду такого подбора частоты следования импульсов необходимо принять меры к тому, чтобы радиоимпульсы, отраженные от концов линии задержки,

не складывались с основными радиоимпульсами. Для этой цели селективируют пару импульсов и подавляют несколько импульсов, следующих за этой парой, чтобы дать отражениям возможность затухнуть. Настройку ведут по нулям амплитуды колебаний среднего суммарного радиоимпульса (рис. 5).

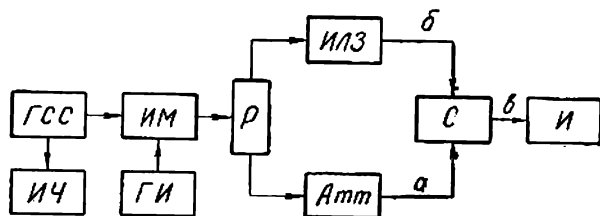


Рис. 4. ГСС — генератор стандартных сигналов, ГИ — генератор видеоимпульсов, ИМ — импульсный амплитудный модулятор, Р — развязывающий элемент, ИЛЗ — испытываемая линия задержки, Атт — аттенюатор, С — суммирующее устройство, И — индикатор, ИЧ — измеритель частоты.

Недостаток описанной симметричной схемы состоит в трудности измерения малых времен запаздывания (порядка нескольких микросекунд и меньше), что объясняется трудностью получения коротких импульсов с высокой частотой следования. Это ограничение снимается, если требуется измерить малую разность времен запаздывания, например для двух

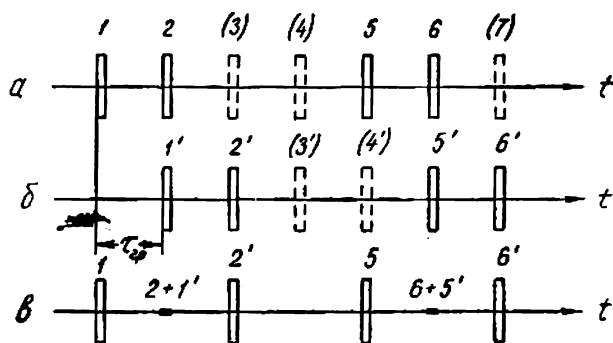


Рис. 5. α — радиоимпульсы на выходе аттенюатора (рис. 4), β — радиоимпульсы на выходе линии задержки, γ — радиоимпульсы после суммирующего устройства. Пунктиром изображены подавляемые радиоимпульсы.

линий задержки. Тогда вместо аттенюатора включается одна из линий. При этом не следует заботиться о частоте следования импульсов, так как предполагается, что часть импульса n , задержанного на более длительное время, перекрывается частью менее задержанного импульса m (рис. 6). Отпадает также необходимость в схеме формирования пары импульсов.

Такое включение может быть также использовано для повышения точности измерения больших значений времени запаздывания, если име-

ются образцовые линии, время запаздывания которых близко к измеряемому. Разность времен запаздывания испытуемой и образцовой линий не должна превышать длительности используемых импульсов. Схема такого типа может быть применена также для измерения времени запаздывания сигнала между двумя отводами одной и той же линии задержки.

Во всех описанных выше схемах, использующих метод π -точек в импульсном режиме, индикация π -точек производится с помощью осцилло-

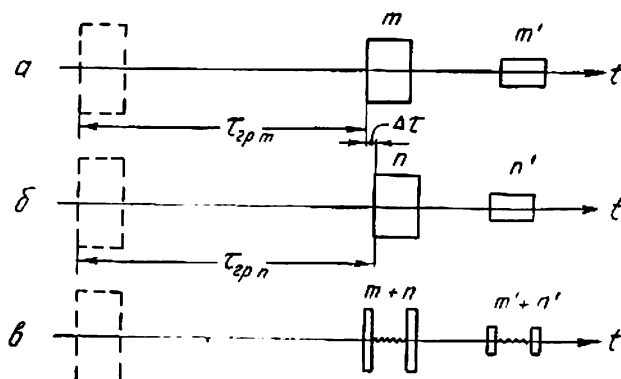


Рис. 6. m — радиоимпульс, прошедший через линию с меньшим временем запаздывания τ_m , n — более задержанный радиоимпульс (на время τ_n), m' и n' — соответствующие радиоимпульсы, отраженные от концов линии задержки. $\Delta\tau = \tau_n - \tau_m$.

графа. Это позволяет визуально контролировать отсутствие интерференции полезных и мешающих сигналов. Для повышения точности индикации π -точек могут быть использованы стрелочные приборы, но при этом обязательным является селектирование полезного суммарного радиоимпульса, так как в противном случае использование импульсного режима лишается смысла. Весьма перспективным представляется также введение возмущения в фазовую структуру измерительного сигнала в виде частотной модуляции или смещения частоты [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Ф. Маер. Die Messung des Übertragungsmaßes von Vierpolen nach der Kompensationsmethode. Elektrotechnische Nachrichten — Technik. Apr. 1926, Bd. 3, H. 4, S. 141—149.
2. В. В. Молебный. Влияние характеристик измеряемого объекта на результат измерения группового времени запаздывания. «Вести. Киевск. политехн. ин-та», серия радиотехническая, вып. 1, К., 1965.
3. Ю. С. Лезин. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов, М., изд-во «Сов. радио», 1963.
4. В. В. Молебный. Преобразование частоты при измерении времени запаздывания методом π -точек. Изв. вузов — «Радиотехника», 1965, № 6.