

Нормирование частотной погрешности импульсных делителей напряжения

Efim BADINTER, Iulian COLPACOVICI, Vladimir CLEIMENOV, Dumitru COJOCARU
 Research Institute "ELIRI" S.A.
 bad@eliri.md

Abstract — This article describes the way of setting of frequency inaccuracy of the resistive high voltage impulse dividers subject to pulse amplitude, pulse duration and interpulse interval. The method of measuring of the inaccuracy of the impulse voltage dividers and practical results are discussed.

Index Terms — high voltage divider, impulse voltage divider, frequency inaccuracy (error), frequency band, metrology.

I. ВВЕДЕНИЕ

Для установления и наблюдения формы импульсов на нагрузке высоковольтных источников напряжения применяют импульсные делители напряжения, осуществляющих функцию масштабного преобразования. Точное соответствие формы импульсов высокого напряжения на нагрузке (выходе высоковольтного источника напряжения) и сигнала на низкоомном выходе делителя напряжения, предназначенного для осуществления обратной связи для регулирования амплитуды и формы импульсного напряжения, зависит от параметров делителя напряжения, в том его числе частотных параметров. Сложность непосредственной оценки точности преобразования высокого импульсного напряжения заключается в отсутствии специализированного измерительного оборудования, таких как высоковольтный калибратор импульсов заданной формы, амплитуды и периода, а также из-за сложности нормирования параметров делителя в зависимости от параметров исследуемых импульсов высокого напряжения. Зачастую известно, какие импульсы нужно получить и с какой точностью, и в то же время затруднительно сформулировать требования к делителю напряжения, с помощью которого должны эти импульсы получать и оценивать. Параметры, которыми описываются импульсы, не могут быть непосредственно перенесены на требования к параметрам делителя напряжения. В этой статье делается попытка сформулировать требования к параметрам делителей напряжения на основе известных параметрах исследуемого (генерируемого) импульса.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Прежде всего необходимо рассмотреть вопрос о характеристиках импульсного напряжения, которые предстоит измерять, и результаты, которые надеются при этом получить. В качестве примера можно привести импульсное напряжение - измерительный сигнал - в виде последовательности прямоугольных

импульсов длительностью $2\cdot\tau$ с заданным периодом повторения T или частотой повторения F (рис.1).

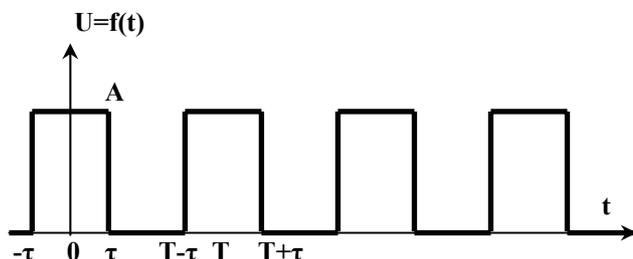


Рис.1. Последовательность импульсов напряжения

Реальный импульс напряжения, как на входе делителя напряжения, так и на его выходе, имеет форму отличающуюся от прямоугольной (рис.2).

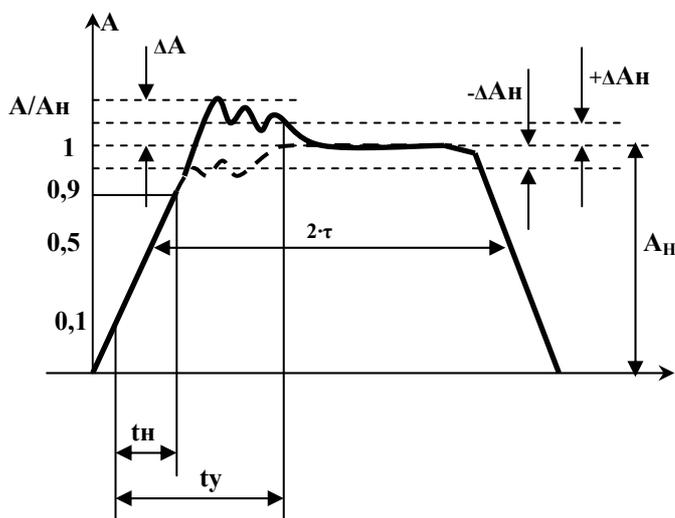


Рис.2. Форма реального импульса напряжения

Начало импульса считается с момента, когда значение напряжения достигло 0,1 номинальной амплитуды импульсного напряжения, время нарастания считается время t_n , в течение которого импульсное напряжение нарастает от 0,1 до 0,9 от амплитудного значения. При этом, время установления t_y , в течение которого импульсное напряжение установится по величине, с погрешностью

не более заданной ΔA_H , может существенно превышать время нарастания t_H . Аналогично времени нарастания определяется и время среза (спада) импульса.

Как видно, для правильного, с погрешностью не более заданной, масштабного преобразования необходимо сопоставить параметры импульса с параметрами делителя напряжения.

Периодическая последовательность импульсов характеризуется частотой повторения импульсов - частотой сигнала, которую должен пропускать делитель напряжения. Но не только основная частота сигнала определяет необходимую полосу пропускания делителя напряжения. Время перехода сигнала из одного состояния в другое (длительность фронта и среза импульса) — вот что имеет значение. Если имеется чисто синусоидальный сигнал с частотой 50 Hz, то эта частота и будет максимальной (и единственной) в его спектральном составе. Но типичные импульсы содержат более высокие частоты.

В литературе [1, 2] приводится формула (1), определяющая условие "неискаженной" передачи фронта (среза) импульса:

$$F_B = \frac{0,35}{t_H} \quad (1)$$

где F_B - необходимая верхняя частота полосы пропускания по уровню 3 dB (0,707 от амплитудного значения).

Согласно этой формуле, при заданном времени нарастания импульса $t_H = 0,5 \text{ ms}$ ($5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$),

погрешность $\delta_U = \frac{\Delta A_H}{A_H}$ делителя напряжения не должна превышать $\delta_{FB}(\%) = 29,3 \%$ (0,707 по напряжению) на частоте $F_B = 700 \text{ Hz}$. Однако, при этом, не будет установлено, с какой погрешностью будет передаваться амплитуда импульса.

Все сложные сигналы (в том числе прямоугольные, случайные и буквально любые) могут быть представлены суммой ряда гармонических составляющих (ряда Фурье) с частотами, кратными основной частоте.

Для определения верхней частоты F_B полосы пропускания делителя напряжения с заданной погрешностью δ_U положим, что погрешность, вносимая каждой гармонической составляющей, не должна превышать заданной погрешности δ_U .

Разложение сигнала, изображенного на рис.1, в ряд Фурье описывается следующей формулой [3, с.315]:

$$f(t) = \frac{2A\tau}{T} + \frac{2A}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\omega_1\tau}{k} \cos k\omega_1\tau \quad (3)$$

где $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ - круговая частота повторения импульсов (круговая частота основной гармоники).

В формуле (3) первое слагаемое определяет постоянную составляющую импульсного сигнала, а второе слагаемое представляет собой сумму гармонических составляющих. Из формулы (3) значение амплитуды k гармоники импульсного сигнала:

$$A_k = \frac{2A}{\pi \cdot k} \quad (4)$$

Погрешность амплитуды основной (первой) гармоники импульсного сигнала не должна превышать основной погрешности делителя δ_U . Поскольку амплитуда каждой последующей гармоники в k раз меньше (согласно (4)), то, и погрешность δ_{Uk} , вносимая k гармоникой соответственно в k раз меньше δ_U .

Таким образом, можно определить верхнюю частоту полосы пропускания F_B делителя напряжения по основной погрешности, как частоту F_k , k -ой гармоники, при которой погрешность ее амплитуды достигает величины δ_{FB} . Практически это означает, что верхняя частота F_B делителя напряжения равна той частоте F_k , на которой погрешность k -ой гармоники достигает величины $\delta_{FB}(\%) = 29,3 \%$ или:

$$F_B = F_k = k \cdot F_1 = \frac{\delta_{FB}}{\delta_U} F_1 \quad (5)$$

где $F_1 = \frac{\omega_1}{2\pi}$ - частота основной гармоники (частота повторения импульсов).

Например, при основной погрешности делителя напряжения $\delta_U = 0,5 \%$ ($5 \cdot 10^{-3}$) верхняя рабочая частота делителя напряжения по уровню 3 dB согласно (5) должна быть $F_B = 2930 \text{ Hz}$ ($k = 59$) при частоте основной гармоники $F_1 = 50 \text{ Hz}$.

Таким образом, при подаче на вход делителя напряжения синусоидального сигнала, он будет преобразовывать его с погрешностью не более $\delta_U = 0,5 \%$ для частоты F_1 , и при увеличении частоты сигнала до F_B погрешность δ_U будет возрастать вплоть до значения $\delta_{FB} = 29,3 \%$. Это свойство положено в основу принципа оценки частотной погрешности делителя напряжения. Оценка погрешности импульсного делителя напряжения по результатам измерения верхней частоты, при которой его погрешность не превышает $\delta_{FB}(\%) = 29,3 \%$, более объективна, поскольку ни одна из составляющих погрешностей амплитуд гармоник не превысит величины δ_U , в особенности, если учесть, что в выражение (3), имеются функции \sin и \cos , меньшие единицы, а также то, что суммирование в формуле

производится с разными знаками. При этом, поскольку верхняя частота F_B , определенная по формуле (5) превышает верхнюю частоту, определенную по формуле (1), то соответственно время нарастания сигнала t_n , время установления t_y и собственно выбросы напряжения ΔA (см. рис.2), на выходе делителя напряжения с верхней частотой $F_B(5)$ будут меньше, чем у делителя у аналогичного с верхней частотой $F_B(1)$.

Также, стоит отметить, что все другие периодические сигналы с импульсами другой формы, являются более "гладкими", в отличие от прямоугольных импульсов, содержат гармоники с меньшей амплитудой, что позволяет масштабированно преобразовывать импульсное напряжение с меньшей погрешностью.

Можно также утверждать, что увеличение верхней рабочей частоты делителя напряжения против установленной выражением (1) пропорционально уменьшит погрешность передачи фронта и среза импульсов напряжения.

Если верхняя частота F_B , определенная по формуле (1) превышает верхнюю частоту, определенную по формуле (5) (при задании малого времени нарастания), то соответственно и погрешность делителя при измерении амплитуды импульсов, уменьшится пропорционально отношению $F_B(1)$ к $F_B(5)$.

III. НОРМИРОВАНИЕ ЧАСТОТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ И МЕТОДИКА ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Потребителей импульсных делителей напряжения в первую очередь интересует неискаженная передача импульсов, их "правильное" отображение с заданной погрешностью. При этом под погрешностью понимается погрешность амплитуды импульса, где-то в средней части импульса. Также потребителей интересует небольшое время нарастания импульса, иногда время установления.

Например, заданы следующие параметры делителя напряжения (параметры взяты из реальных технических требований):

- Диапазон рабочих измеряемых значений амплитудных значений величин входных постоянных и импульсных напряжений от 0 до 40 кВ;
- Значение длительности импульсов импульсного входного напряжения не менее 3 мс при фронте импульса до 0,5 мс;
- Предел допускаемого значения систематической составляющей основной погрешности коэффициента деления по напряжению $\pm 0,5\%$ в нормальных условиях применения.

На основании этих параметров устанавливаем:

- Минимальный период повторения импульсов $T = 6\text{ ms}$ (основная частота $F_1 = 167\text{ Hz}$);
- Основная погрешность δ_U (по амплитуде) - не более 0,5 %.

Определяем верхнюю рабочую частоту F_B .

$$F_B(1) = 700\text{ Hz (по формуле (1));}$$

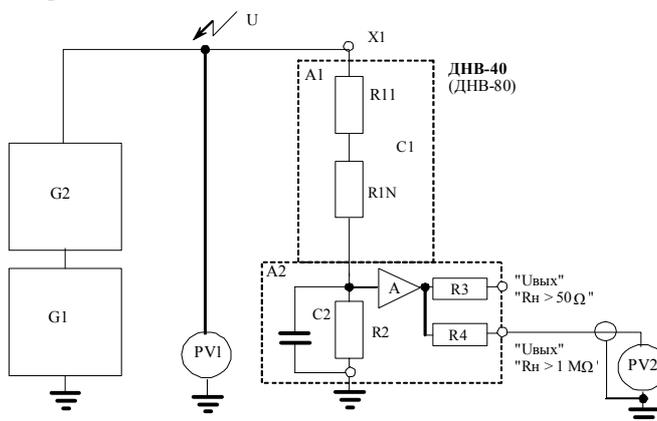
$$F_B(5) = 9790\text{ Hz (по формуле (5)).}$$

За верхнюю рабочую частоту диапазона принимаем частоту $F_B = 10000\text{ Hz}$.

Частотная погрешность делителя напряжения в диапазоне частот от 0 Hz до F_1 (частоты основной гармоники) не должна превышать 0,5 %.

Методика измерения погрешности делителя напряжения заключается в следующем:

- На вход делителя напряжения подается синусоидальное напряжение в диапазоне частот от 0 до 3000 Hz (рис.3) от калибратора переменного напряжения;



$G1$ - калибратор переменного напряжения с выходным напряжением до 100 V в диапазоне частот до 3000 Гц и кратковременной нестабильностью напряжения не хуже 0,05 %,

$G2$ - блок усиления калибратора переменного напряжения с выходным напряжением до 1000 V и кратковременной нестабильностью коэффициента усиления не хуже 0,05 %,

$PV1$ - вольтметр с пределом измерения переменного напряжения до 1000 V, погрешностью не хуже 0,1 % в диапазоне частот от 10 до 200 Hz и не хуже 1 % в диапазоне частот от 200 до 3000 Hz.

$PV2$ - вольтметр с входным сопротивлением не менее 1 MΩ и пределом измерения переменного напряжения до 1 V, погрешностью не хуже 0,05 % в диапазоне частот от 10 до 200 Hz и не хуже 1 % в диапазоне частот от 200 до 3000 Hz.

Рис.3. Схема определения погрешности делителя напряжения в диапазоне частот 0-3000 Hz

- Напряжение на выходе делителя измеряется вольтметром переменного тока;

- Включают калибратор переменного напряжения $G1$, блок усиления калибратора переменного напряжения $G2$ и устанавливают на его выходе значение первичного напряжения U_1 равное в (700-900) V частотой $f_1=10\text{ Hz}$, напряжение контролируют по показаниям вольтметра $PV1$;

- Проводят одновременный отсчет показаний U_{PV1} вольтметра PV1 и U_{PV2} вольтметра PV2 в вольтах;

- Повторяют измерения на других частотах из диапазона рабочих частот (желательно на частотах гармоник сигнала);

- Вычисляют погрешность напряжения делителя напряжения на $\Delta f_{ДНВ}$ на ряде частот из диапазона рабочих частот в процентах по формуле:

$$\Delta f_{ДНВ} = \frac{K \cdot U_{PV2} - U_{PV1}}{U_{PV1}} \cdot 100 \quad (6)$$

где $K=10000$ - номинальное значение коэффициента деления делителя напряжения (коэффициент деления может быть другой).

Погрешность коэффициента деления делителя напряжения не должна превышать 0,5 % в диапазоне частот от 0 Hz до $F_1 = 167$ Hz, и не быть менее минус 29,3 % (уровень минус 3 dB) на верхней частоте

$F_B = 2930$ Hz. При соблюдении этого условия, делитель напряжения будет масштабировать импульсы напряжения с установленной точностью.

IV. ПРАКТИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА

Для практической проверки высказанных предположений, были проведены испытания делителя напряжения ДНВ-40 [4] по определению частотной погрешности, а также снятие осциллограммы выходного сигнала, при подаче на вход делителя напряжения импульсного сигнала от генератора прецизионных импульсов.

Результаты измерения частотной погрешности делителя напряжения приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. ЧАСТОТНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДНВ-40

Частота сигнала, Hz	Погрешность нормируемая (максимальная), %	Погрешность измеренная, %
10	± 0,05	+ 0,18
40	± 0,05	+ 0,34
80	± 0,05	+ 0,39
125	± 0,05	+ 0,29
160	± 0,05	+ 0,11
200	± 0,05	- 0,01
500	± 1,5	+ 1,1
1000	± 3,0	+ 1,4
1500	± 4,5	- 2,9
2000	± 6,0	- 4,5
2500	± 7,5	- 7,1
3000	± 9,0	- 9,0
3500	± 10,5	- 10,2
4000	± 12,0	- 12,4
4500	± 13,5	- 13,4
5000	± 15,0	- 15,2
6000	± 18,0	- 18,3
7000	± 21,0	- 19,8
8000	± 24,0	- 24,0
9000	± 27,0	- 26,9
10000	± 30,0	- 30,0

Осциллограмм входного и выходного сигнала делителя напряжения ДНВ-40 приведена на рис.5.

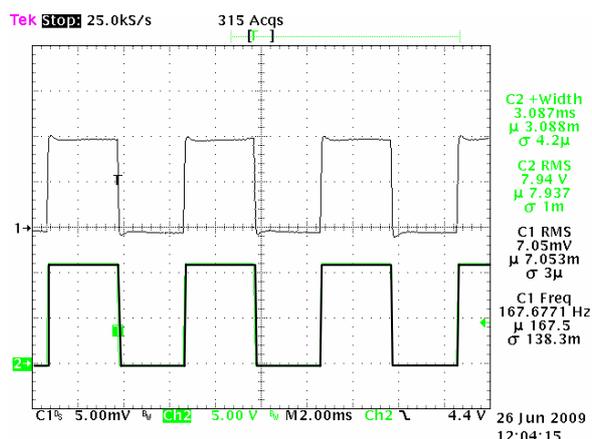


Рис.5. Осциллограмма входного и выходного сигнала делителя напряжения ДНВ-40.

Как видно из приведенной осциллограммы, напряжения полностью соответствуют предъявляемым требованиям к параметрам точности передачи импульсов напряжения. Длительность фронта импульса на выходе делителя напряжения не превышает 0,2 ms.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Непосредственное измерение погрешности делителя напряжения при импульсном входном напряжении затруднено и требует специальной аппаратуры.

Затруднена оценка погрешности импульсного делителя напряжения при нормировании искажения импульса.

Нормирование частотной погрешности импульсного делителя напряжения исходя из допустимого искажения формы выходного импульса позволяет адекватно оценивать его погрешность при применении стандартной контрольно-измерительной аппаратуры.

Данная работа выполнена в рамках Госпрограммы «Ingenieria și tehnologiile electronice în relansarea economiei» по проекту 08.808.05.04A.

В исследованиях использовалось оборудование, полученное по гранту CRDF MR2-1024-CN-03.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- [1] А.Дедюхин, Цифровые осциллографы. Компоненты и технологии, 3, 2003.
- [2] Майк МакТиг (Mike McTigue) Насколько широкая полоса пропускания требуется от осциллографа? Agilent Technologies. http://www.astena.ru/news_osc1.html
- [3] А.Ф.Белецкий. Основы теории линейных электрических цепей. М.: Связь.1967.
- [4] Делитель напряжения высоковольтный ДНВ-40, ДНВ-80. Паспорт ЗАФ.458.023 ПС. Институт "ELIRI" S.A., Кишинев, 2009.