



# ИМПУЛЬСНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Колпакович Ю.И.<sup>1</sup>, Шит М.Л.<sup>2</sup>, Клейменов В.Г.<sup>1</sup>  
Институт «ELIRI» S.A., Институт энергетики АНМ

**Реферат** – Рассматриваются возможности применения импульсных высокоомных делителей напряжения в системах контроля качества и учета электроэнергии. По сравнению с измерительным трансформатором напряжения резистивный делитель напряжения обладает более широким частотным диапазоном, меньшей потребляемой мощностью, более высокой точностью. Рассмотрены способ нормирования и определения частотной погрешности импульсного резистивного делителя напряжения.

**Ключевые слова:** Импульсный делитель напряжения, частотная погрешность.

## PULSE RESISTIVE VOLTAGE DIVIDERS FOR SYSTEMS OF ELECTRIC ENERGY QUALITY CONTROL AND ACCOUNTING

COLPACOVICH Iulian<sup>1</sup>, SIT Mihail<sup>2</sup>, CLEIMENOV Vladimir<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Institute «ELIRI» S.A., <sup>2</sup>Institute of power engineering of ASM

**Abstract** – The possibilities of application of high resistance pulse voltage dividers in the systems of quality control and commercial energy accounting have considered. In comparison with the voltage transformer the resistive voltage divider has a wider frequency band, lower power consumption, higher accuracy. The ways of valuation and determination of the frequency error of the pulse resistive voltage divider have considered.

**Keywords:** Pulse voltage divider, frequency error.

## DIVIZORI DE TENSIUNE REZISTIVI PRIN IMPULSURI PENTRU SISTEME DE CONTROL DE CALITĂȚII ȘI DE CONTORIZARE

COLPACOVICH Iulian<sup>1</sup>, SIT Mihail<sup>2</sup>, CLEIMENOV Vladimir<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Institutul «ELIRI» S.A., <sup>2</sup>Institutul de energetică al AȘM

**Rezumat** – Se analizează posibilitatea implementării divizoarelor impulsulare de tensiune de rezistență înaltă, în sistemele de control al calității și contorizării energiei electrice. În comparație cu transformatorul de măsurare a tensiunii, divizorul rezistiv de tensiune are o bandă mai largă de frecvență, consum de putere mai mic și precizie înaltă. Sunt revăzute metodele de determinare și normare a erorilor de frecvență a divizoarelor omice de tensiune cu impulsuri.

**Cuvinte cheie** – divizor de tensiune cu impulsuri, eroare de frecvență.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оценка качества электрической энергии и ее учет осуществляется, как правило, на низковольтной стороне. При этом, качество электроэнергии и ее потребляемое количество на низковольтной стороне – у потребителя, отличается от качества электроэнергии и ее отпускаемого количества у поставщика. Дело в том, что при преобразовании электроэнергии, а также ее измерении происходит как изменение ее гармонического состава, так и имеют место потери на преобразование и ее измерение. Под оценкой качества электрической энергии понимают степень соответствия параметров электрической энергии их установленным значениям.

Качество электрической энергии характеризуется отклонением, колебанием, несимметрией напряжения, несинусоидальностью формы кривой напряжения, отклонением частоты и др. Согласно нормативной документации [1] при оценке соответствия формы кривой напряжения необходимо измерение амплитуд гармонических составляющих питающего напряжения вплоть до 40-й включительно.

Измерительные трансформаторы напряжения обладают ограниченными частотными и нагрузочными свойствами, имеют реактивный и резонансный характер нагрузочных свойств. Изменение частоты измеряемого напряжения ведет к появлению дополнительной погрешности преобразования как амплитудной, так и угловой

(фазовой). Наименьшими значениями амплитудных, частотных и угловых погрешностей обладают импульсные высокоомные (более 100 МΩ) резистивные делители напряжения, к тому же свободные от резонансных и реактивных недостатков. Импульсные резистивные делители напряжения к тому же способствуют более точному фиксированию провалов напряжения, временного и импульсного перенапряжений.

В общем случае промышленное напряжение можно рассматривать как периодическое импульсное напряжение, соответствующей частоты (50 Гц) и соответствующим набором гармонических составляющих.

В этой статье делается попытка сформулировать требования к параметрам импульсных делителей напряжения на основе известных параметрах периодических импульсов питающего напряжения применительно к задачам контроля качества электроэнергии.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ

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).

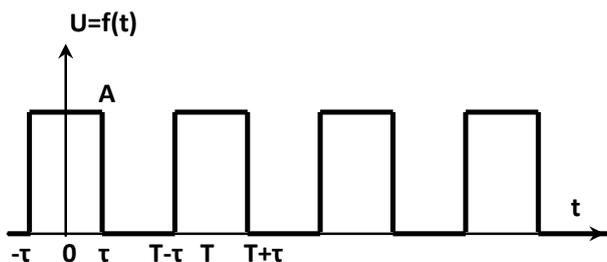


Рис.1. Последовательность импульсов напряжения

За неискаженное масштабное преобразование импульсного напряжения принимается преобразование его вершины с погрешностью не более заданной.

Промышленное напряжение имеет форму близкую к синусоидальной. Если делитель напряжения будет без искажений преобразовывать импульсную последовательность, изображенную на рис.1, в выходное контролируемое напряжение, тем более он будет точно, с минимальной погрешностью, преобразовывать промышленной напряжение и его гармонические составляющие. Параметров отклонения кривой формы напряжение рассмотрим на основе реального импульса напряжения.

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

Начало импульса считается с момента, когда значение напряжения достигло 0,1 номинальной амплитуды импульсного напряжения, время нарастания считается время  $t_H$ , в течение которого импульсное напряжение нарастает от 0,1 до 0,9 от амплитудного значения. Для частоты  $f=50$  Гц это время составляет:

$$t_H = \frac{1}{2f} - \frac{\arcsin(0,1) + \arcsin(0,9)}{2\pi f} \quad (1)$$

т.е.  $t_H = 0,0061s$ .

При этом, время установления  $t_y$ , в течение которого импульсное напряжение установится по величине, с погрешностью не более заданной  $\Delta A_H$ , может существенно превышать время нарастания  $t_H$ . Аналогично времени нарастания определяется и время среза (спада) импульса.

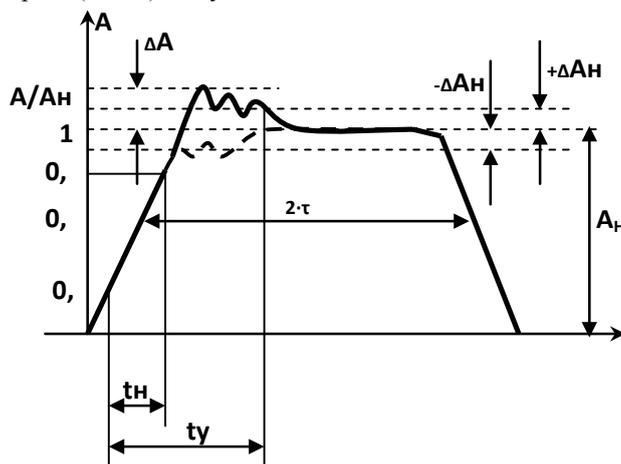


Рис.2. Форма реального импульса напряжения

Нам необходимо сопоставить параметры импульса с параметрами делителя напряжения.

Периодическая последовательность импульсов характеризуется частотой повторения импульсов - частотой сигнала (частотой питающей сети), 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 [2] приводится формула (2), определяющая условие "неискаженной" передачи фронта (среза) импульса:

$$F_B = \frac{0,35}{t_H} \quad (2)$$

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  $t_H = 0,0061\text{ s}$  (для синусоидального сигнала частотой  $50\text{ Гц}$ ), погрешность  $\delta_U = \frac{\Delta A_H}{A_H}$  делителя напряжения не должна превышать  $\delta_{FB}(\%) = 29,3\%$  ( $0,707$  по напряжению) на частоте  $F_B = 49,1\text{ Hz}$ .

Таким образом, формула, приведенная в [2, 3] приводит к основной частоте сигнала, без учета его гармонических составляющих. Также, при этом, не установлено, с какой погрешностью будет передаваться вершина импульса.

Предложим другой подход к определению частотного диапазона делителя напряжения с точки зрения передачи вершины импульсного сигнала с установленной погрешностью.

Все сложные периодические сигналы (в том числе прямоугольные) 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  $\delta_U$  положим, что погрешность, вносимая каждой гармонической составляющей, не должна превышать заданной погрешности  $\delta_U$ .

Разложение сигнала, изображенного на рис.1, в ряд Фурье описывается следующей формулой [4, 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  $\delta_U$ . Поскольку амплитуда каждой последующей гармоники в  $k$  раз меньше (согласно (4)), то, и погрешность  $\delta_{Uk}$ , вносимая  $k$  гармоникой соответственно в  $k$  раз меньше  $\delta_U$ .

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  $\delta_{FB}$ . 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  $3\text{ dB}$  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 измерительного сигнала до  $F_B$  погрешность делителя напряжения  $\delta_{Uk}$  для этого сигнала будет возрастать вплоть до значения  $\delta_{FB} = 29,3\%$ . Это свойство положено в основу принципа оценки частотной погрешности импульсного делителя напряжения при измерении погрешности передачи вершины импульса. Оценка погрешности передачи вершины импульса делителем напряжения проводится по результатам измерения верхней частоты, при которой погрешность делителя напряжения не превышает  $\delta_{FB}(\%) = 29,3\%$ . Такая оценка более объективна, поскольку ни одна из составляющих погрешностей амплитуд гармоник не превысит величины  $\delta_U$ , 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  $t_H$ , время установления  $t_U$  и собственно выбросы напряжения  $\Delta A$  (см. рис.2), на выходе делителя напряжения с верхней частотой  $F_B$  по формуле (5) будут меньше, чем у делителя у аналогичного с верхней частотой  $F_B$  по формуле (2). С точки зрения допустимой погрешности измерения гармонических составляющих [1], допустимая погрешность измерения коэффициента 40-й гармонической составляющей напряжения ( $2000\text{ Гц}$ ) не должна превышать  $5\%$ . Таким образом, для определения верхней частоты полосы пропускания по критерию заданной погрешности измерения 40-й

гармонической составляющей, получим выражение:

$$F_B = F_{40} = k \cdot F_{40} = \frac{\delta_{FB}}{\delta_{U40}} F_{40} \quad (6)$$

Приняв, что  $F_{40} = 2000$  Гц и  $\delta_{U40} = 5\%$  по формуле (6) получим  $F_B = 11720$  Гц, что соответствует  $k = 234$  для основной частоты  $F_1 = 50$  Hz. Таким образом, для целей контроля качества напряжения с точки зрения измерения уровня гармонических составляющих, полоса пропускания делителя напряжения должна быть в 4 раза больше, чем для неискаженного измерения вершины (амплитуды) импульсного сигнала. Все эти выводы основаны на представлении сигнала в виде последовательности прямоугольных повторяющихся импульсов, тип меандр.

Стоит отметить, что все другие периодические сигналы с импульсами другой формы, а тем более сигнал промышленной частоты, являются более "гладкими", в отличие от прямоугольных импульсов, содержат гармоники с меньшей амплитудой. Это означает, что делитель напряжения с нормированными характеристиками в соответствии с вышеприведенными соображениями, позволяет масштабно преобразовывать промышленное напряжение и его гармонические составляющие с меньшей погрешностью.

Также увеличение верхней рабочей частоты делителя напряжения пропорционально уменьшит погрешность передачи фронта и среза импульсов напряжения.

Если верхняя частота  $F_B$ , определенная по формуле (6) превышает верхнюю частоту, определенную по формуле (5), то соответственно и погрешность делителя при измерении вершины (амплитуды) импульсов, уменьшится пропорционально отношению  $F_B(5)$  к  $F_B(6)$ .

### 3. МЕТОДИКА ЧАСТОТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

Методика измерения погрешности делителя напряжения заключается в следующем:

- На вход делителя напряжения подается синусоидальное напряжение в диапазоне частот от 0 до 12000 Hz (рис.3) от калибратора переменного напряжения;

- 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  $f_1=10$  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:

$$\Delta f_{ДНВ} = \frac{K \cdot U_{PV2} - U_{PV1}}{U_{PV1}} \cdot 100 \quad (7)$$

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

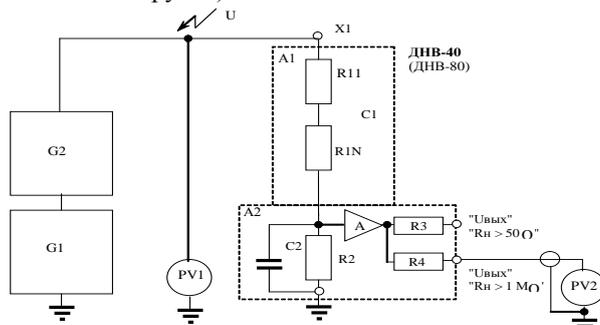


Рис.3. Схема определения погрешности делителя напряжения в диапазоне частот 0-12000 Hz

G1 - калибратор переменного напряжения с выходным напряжением до 100 V в диапазоне частот до 12000 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 МОм 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.

Погрешность коэффициента деления делителя напряжения не должна превышать 0,5 % в диапазоне частот от 0 Hz до  $F_1 = 50$  Hz, и не быть менее минус 29,3 % (уровень минус 3 dB) на верхней частоте

$F_B = 11720$  Hz. При соблюдении этого условия, делитель напряжения будет масштабно преобразовывать сигнал промышленной частоты, при этом погрешность по напряжению не будет более нормируемой (0,5 %), а погрешность измерения коэффициентов гармонических составляющих напряжения не превысит 5 % вплоть до 40-й для гармоники основной частоты.

#### 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА

Для практической проверки высказанных предположений, были проведены испытания импульсного делителя напряжения ДНВ-40 [4] по определению частотной погрешности, а также сняты осциллограммы выходного сигнала, при подаче на вход делителя напряжения импульсного сигнала от генератора прецизионных прямоугольных импульсов. Входное сопротивление указанного делителя напряжения 400 МΩ, рабочее напряжение амплитудой до 40 кВ. 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	
		по напряжению, %	угловая, мин
10	± 0,5	- 0,017	-2,64
40	± 0,5	- 0,042	-5,74
60	± 0,5	-0,042	-8,47
80	± 0,5	- 0,065	-10,44
105	± 0,5	-0,056	-11,06
140	± 0,5	+0,002	-11,64
180	± 0,5	+0,140	-21,19
500	± 1,5	+ 0,60	не изм.
1000	± 3,0	-2,80	то же
2000	± 6,0	- 2,40	-/-
4000	± 12,0	-1,90	-/-
6000	± 18,0	+1,14	-/-
8000	± 24,0	+1,34	-/-
10000	± 29,0	+0,07	-/-
15000	не нормировано	-2,73	-/-
20000	то же	-7,41	-/-
25000	-/-	-11,9	-/-
30000	-/-	-18,0	-/-
35000	-/-	-22,8	-/-
40000	-/-	-28,0	-/-

Как видно из таблицы, частотный диапазон делителя напряжения порядка 40 кГц, при этом погрешность измерения в 5 % гармонических составляющих промышленной частоты обеспечивается на частотах вплоть до 15 кГц.

Осциллограмма входного и выходного сигнала делителя напряжения ДНВ-40 приведена на рис.4.

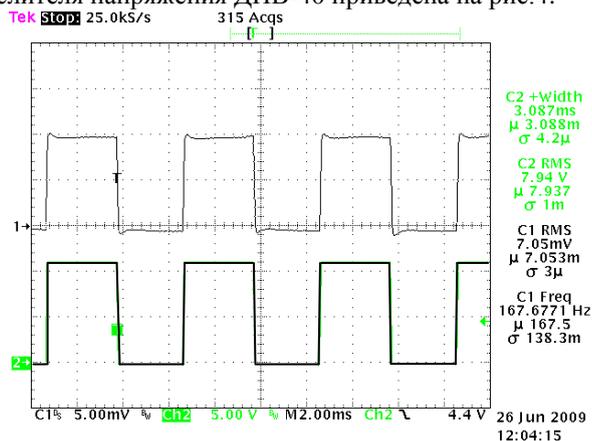


Рис.4. Осциллограмма входного и выходного сигнала делителя напряжения ДНВ-40.

Как видно из приведенной осциллограммы, форма преобразованного напряжения полностью соответствует предъявляемым требованиям к параметрам точности передачи импульсов напряжения. Длительность фронта импульса на выходе делителя напряжения не превышает 0,1 мс.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Импульсные высокоомные делители напряжения могут с успехом применяться для измерения погрешности напряжения переменного тока промышленной и уровня его гармонических составляющих для целей контроля качества и учета.

Поскольку масштабное преобразование гармонических составляющих промышленного напряжения выполняется с высокой точностью, импульсные делители напряжения могут использоваться в цепях обратной связи активных фильтров высокого напряжения, для целей компенсации высших гармоник и улучшения формы питающего напряжения.

Предложено нормирование частотной погрешности импульсного делителя напряжения исходя из допустимой погрешности измерения уровня высшей гармонической составляющей напряжения, что позволяет адекватно оценивать качество питающего напряжения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
- [2] А.Дедюхин, *Цифровые осциллографы*. Компоненты и технологии, 3, 2003.
- [3] А.Ф.Белецкий. *Основы теории линейных электрических цепей*. М.: Связь, 1967.
- [4] *Делитель напряжения высоковольтный ДНВ-40, ДНВ-80*. Паспорт 3АФ.458.023 ПС. Институт "ELIRI" S.A., Кишинев, 2009.

#### Авторы:



**Колпакович Юлиан Иванович**

Доктор наук.

Область научных интересов – системы и средства автоматизации, техника высоких напряжений, метрология.

**Шит Михаил Львович** – к.т.н., зав. Лабораторией «Энергетической эффективности и систем управления» Института энергетики АНМ. Область научных интересов: тепловые насосы на диоксиде углерода, автоматическое управление технологическими процессами в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве. E-mail: [mihail\\_sheet@yahoo.com](mailto:mihail_sheet@yahoo.com)