

# Измерительный Преобразователь для Контроля Качества Электроэнергии в Высоковольтных Сетях

Colpasovici Iu., Cleimenov V., Ceban V.

Institut ELIRI S.A.  
Chisinau, Moldova  
vceban@eilri.md

**Abstract** — Work deals with the description of the mathematical model and its natural incarnation of high voltage transducer on the base of shielded AC resistive divider to be used for quality control in electric power networks. It is presented the description of the method of shielding and the way of output voltage ratio frequency error minimization.

**Ключевые слова** — Качество электроэнергии, высокое напряжение, измерительный преобразователь, делитель напряжения, частотная погрешность.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отмечается рост требований к качеству электроэнергии, повышению точности измерений высокого напряжения и мощности. По оценке европейских специалистов, снижение качества электрической энергии обходится промышленности Европейского союза в 10 млрд евро в год. Убытки от снижения качества электроэнергии только в телекоммуникационной сфере составляют от 30000 евро/мин.

В настоящее время постоянно растет число электроприемников искажающих параметры качества электроэнергии. Существенно возросла задача по контролю за работой промышленного оборудования и электросетей производственного и бытового назначения, по контролю за качеством электроэнергии, регистрации графиков нагрузки, для выявления причин сбоев в работе оборудования и его некорректного поведения, для экспертиз по решению спорных вопросов между потребителем и поставщиком энергии.

В большинстве случаев в качестве первичных измерительных преобразователей высокого напряжения в цепях учета и контроля качества электроэнергии в основном используются индуктивные преобразователи - измерительные трансформаторы (ИТ) переменного тока, в измерительных поверочных установках высокого напряжения используют крупногабаритные индуктивные и емкостные измерительные преобразователи высокого напряжения.

Схемотехнические, конструктивные и метрологические решения по первичному высоковольтному и вторичному измерительному оборудованию отстают от существующих практических потребностей.

В первую очередь это связано со сложностью реализации преобразователей высокого напряжения.

Основными требованиями преобразования являются высокая точность коэффициента преобразования по напряжению, минимальная фазовая погрешность, широкий диапазон частот, вплоть до 40-й гармоники частоты электрической сети, стабильность во времени, высокая стойкость к воздействию электромагнитных помех.

Высокая стойкость к влиянию электромагнитных полей, уменьшение габаритных размеров, удовлетворение требованиям широкого диапазона частот, точности и стабильности может быть достигнуто за счет измерителей преобразователей высокого напряжения на основе биекранированных резистивных делителей напряжения.

## II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Рассмотрим модель делителя напряжения состоящего из двух последовательно соединенных частей.

В качестве исходной модели, учитывая протяженность высоковольтной части делителя напряжения и распределённость его емкостных параметров, возьмем математическую модель длинной линии.

Делитель напряжения в целом будем представлять длинной линией длиной  $l$ , как показано на рис.1.:

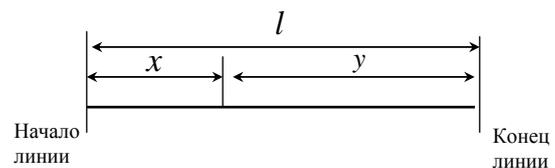


Рис.1. Линия в упрощенном изображении

Первая часть длиной  $x$  представляет собой отрезок длинной линии с потенциальным экраном, т.е. на экран этой части делителя напряжения подается защитное напряжение.

Вторая часть длиной  $y$  представляет собой отрезок длинной линии с экраном, соединенным с нулевым проводом сети или заземленным.

Рассмотрение соединений отрезков длиной линии удобно рассматривать в виде соединений четырехполосников и в матричной форме.

Эквивалентная схема для этого случая приведена на рис.2.

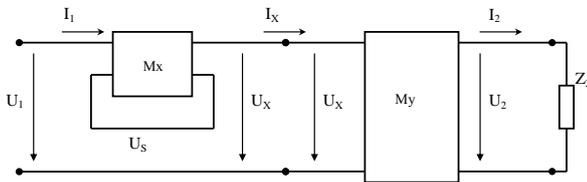


Рис.2. Делитель напряжения с разнопотенциальными экранами в виде соединения четырехполосников.

$$\dot{U}_X = \dot{U}_1 \cdot ch(\gamma_x x) - \dot{I}_1 \cdot Z_x \cdot sh(\gamma_x x) + U_s \cdot (1 - ch(\gamma_x x)); \quad (1)$$

$$\dot{I}_X = -\frac{\dot{U}_1}{Z_x} \cdot sh(\gamma_x x) + \dot{I}_1 \cdot ch(\gamma_x x) + \frac{1}{Z_x} \cdot U_s \cdot sh(\gamma_x x). \quad (2)$$

Основываясь на выражениях, принятых в [1, 2] для второй части делителя напряжения как участка длиной линии длиной  $y$  можно записать

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_X \cdot ch(\gamma_y y) - \dot{I}_X \cdot Z_Y \cdot sh(\gamma_y y); \quad (3)$$

$$\dot{I}_2 = -\frac{\dot{U}_X}{Z_Y} \cdot sh(\gamma_y y) + \dot{I}_X \cdot ch(\gamma_y y), \quad (4)$$

где приняты следующие обозначения:

$\dot{U}_1$  - входное напряжение делителя напряжения,

$\dot{U}_2$  - выходное напряжение делителя напряжения (напряжение на нагрузке  $Z_2$ ),

$\dot{U}_X$  - напряжение на выходе первой и входе второй части делителя напряжения,

$\dot{U}_s$  - напряжение на первом дополнительном экране,

$\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  - ток на входе и выходе делителя напряжения,

$\dot{I}_X$  - ток на выходе первой и входе второй части делителя напряжения,

$x$  - расстояние, отсчитывание от входа делителя напряжения (начала линии),

$y$  - расстояние, отсчитывание от входа второй части делителя напряжения,

$$\gamma_x = \sqrt{Z_0 \cdot Y_x}, \quad \gamma_y = \sqrt{Z_0 \cdot Y_y}, \quad (5)$$

- постоянные распространения в области  $x$  и области  $y$  соответственно,

$$Z_x = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_x}}, \quad Z_Y = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_y}}, \quad (6)$$

- волновые сопротивления области  $x$  и области  $y$  соответственно,

$Z_0$  - продольное реактивное сопротивление линии единицы длины, состоящее из:

$R_0$  - продольного активного сопротивления единицы длины линии,

$L_0$  - продольной индуктивности единицы длины линии,

$Y_X$  и  $Y_Y$  - поперечные реактивные проводимости единицы длины линии участков  $x$  и  $y$ , состоящие из:

$G_X$  и  $G_Y$  - поперечной активной проводимости единицы длины линии,

$C_X$  и  $C_Y$  - поперечной емкости единицы длины линии.

Учитывая (1) и (2) в (3) и (4) получим общие выражения (7) и (8) для входного напряжения и тока в зависимости от выходных напряжений и тока:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cdot & \left( \frac{Z_x}{Z_y} \cdot sh(\gamma_x x) \cdot sh(\gamma_y y) + ch(\gamma_x x) \cdot ch(\gamma_y y) \right) + \\ & + \dot{I}_2 \cdot (Z_x \cdot sh(\gamma_x x) \cdot ch(\gamma_y y) + Z_y \cdot ch(\gamma_x x) \cdot sh(\gamma_y y)) + \\ & + U_s \cdot (1 - ch(\gamma_x x)); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 = \dot{U}_2 \cdot & \left( \frac{1}{Z_x} \cdot sh(\gamma_x x) \cdot ch(\gamma_y y) + \frac{1}{Z_y} \cdot ch(\gamma_x x) \cdot sh(\gamma_y y) \right) + \\ & + \dot{I}_2 \cdot \left( ch(\gamma_x x) \cdot ch(\gamma_y y) + \frac{Z_y}{Z_x} \cdot sh(\gamma_x x) \cdot sh(\gamma_y y) \right) - \\ & - U_s \cdot \left( \frac{sh(\gamma_x x)}{Z_x} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

В случае, если дополнительный экран соединен с входным напряжением, т.е.  $\dot{U}_s = \dot{U}_1$ , из (9) и (10) получаем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cdot & \left( \frac{Z_x}{Z_y} \cdot sh(\gamma_x x) \cdot sh(\gamma_y y) + ch(\gamma_x x) \cdot ch(\gamma_y y) \right) \cdot \frac{1}{ch(\gamma_x x)} + \\ & + \dot{I}_2 \cdot (Z_x \cdot sh(\gamma_x x) \cdot ch(\gamma_y y) + Z_y \cdot ch(\gamma_x x) \cdot sh(\gamma_y y)) \cdot \frac{1}{ch(\gamma_x x)}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_2 \cdot \left( \frac{1}{Z_y} \cdot \frac{sh(\gamma_y y)}{ch(\gamma_x x)} \right) + \dot{I}_2 \cdot \left( \frac{ch(\gamma_y y)}{ch(\gamma_x x)} \right). \quad (10)$$

Выражения (11-12) перепишем в матричной форме в А-параметрах [3]:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$A = \left( \frac{Z_x}{Z_y} \cdot sh(\gamma_x x) \cdot sh(\gamma_y y) + ch(\gamma_x x) \cdot ch(\gamma_y y) \right) \cdot \frac{1}{ch(\gamma_x x)}; \quad (12)$$

$$C = \left( \frac{1}{Z_y} \cdot \frac{sh(\gamma_y y)}{ch(\gamma_x x)} \right), \quad D = \left( \frac{ch(\gamma_y y)}{ch(\gamma_x x)} \right);$$

С учетом, что

$$\dot{i}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_2}. \quad (13)$$

из (11) с учетом (14) можно получить выражение для коэффициента деления делителя напряжения:

$$K = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = A + \frac{B}{Z_2}. \quad (14)$$

Решение уравнения (14) с подстановкой (12) позволяет получить числовое комплексное выражение для коэффициента  $K$  в виде:

$$\dot{K} = K_r + jK_i, \quad (15)$$

где  $K_r$  - действительная часть комплексного коэффициента деления  $\dot{K}$ ,

$K_i$  - мнимая часть комплексного коэффициента деления  $\dot{K}$ .

Обозначим через  $\delta_K$  погрешность модуля коэффициента деления. Тогда можно записать выражение для амплитудной погрешности коэффициента деления:

$$\delta_K = \frac{|\dot{K}| - K_0}{K_0}, \quad (16)$$

где  $K_0$  - номинальное значение коэффициента деления делителя напряжения (значение коэффициента деления на постоянном токе).

Соответственно, угловая погрешность коэффициента деления:

$$\varphi_K = \arctg\left(\frac{K_i}{K_r}\right). \quad (17)$$

Выражения (16) и (17) исходя из (12-15) проанализированы в среде MATLAB.

Получены графики зависимостей амплитудной и угловой погрешности коэффициента деления делителя напряжения в зависимости от соотношений длин экранов ( $x$  и  $y$ ) при общей длине резистивного элемента 160 мм, представленные на рис.3 и 4.

Как видно из приведенных графических зависимостей, при определенном соотношении линейных размеров экранов, возможна одновременная частотная компенсация, т.е. нулевое значение амплитудной и фазовой погрешности коэффициента деления делителя напряжения

### III. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведены многочисленные экспериментальное исследование опытного образца делителя напряжения в составе измерительного преобразователя, включающего согласующий усилитель, с учетом графических зависимостей погрешностей делителя напряжения.

Для достижения минимального значения погрешности модуля и угловой погрешности варьировались размеры потенциального и заземленного экрана, а также степень их воздействия (коэффициент экранирования) на погрешности делителя напряжения.

Полученные результаты позволили создать измерительный преобразователь с улучшенными частотными и импульсными характеристиками, значительно расширить его диапазон рабочих частот.

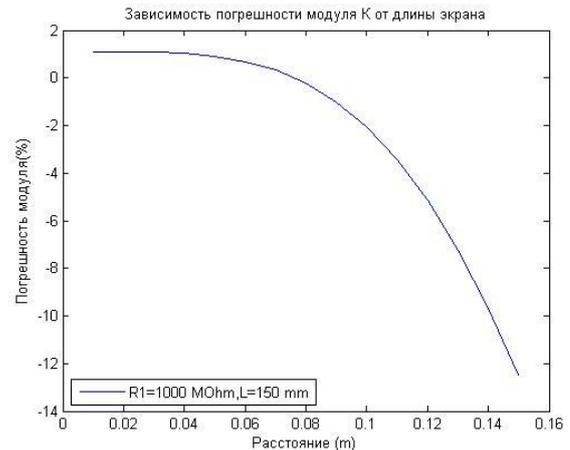


Рис. 3. Зависимость амплитудной погрешности делителя напряжения от линейного размера высокопотенциального экрана.

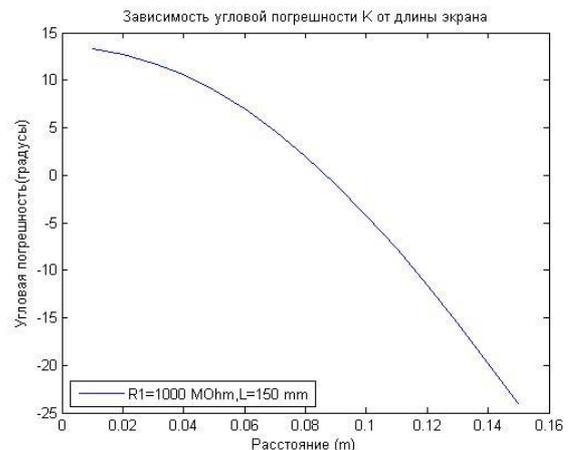


Рис. 4. Зависимость угловой погрешности делителя напряжения от линейного размера высокопотенциального экрана.

Поскольку расширенный диапазон частот находится на уровне 2-5 кГц при погрешности 0,5-1 %, то это означает, что измерительные преобразователи напряжения на основе биэкранированных делителей напряжения могут быть с успехом использованы для контроля качества электрической энергии.

В таблице приведены технические характеристики измерительных преобразователей высокого напряжения, на основе результаты исследования опытных образцов делителей напряжения.

## Технические характеристики ИПВН

Наименование	ИПВН -15	ИПВН -35
Рабочее напряжение переменного тока, kV	0-15	0-35
Входное сопротивление, МΩ	1000	1000
Коэффициент деления	1000	1000
Основной рабочий диапазон частот, Hz	0-100	0-100
Погрешность по напряжению в основном диапазоне частот, не более, %	0,1	0,1
Угловая погрешность в основном диапазоне частот, не более, min	10	10
Расширенный рабочий диапазон частот, Hz	0-2000	0-2000
Погрешность по напряжению в расширенном диапазоне частот, не более, %	0,5-1,0	0,5-1,0
Рабочий диапазон частот, по уровню 3 dB, Hz	20000	20000
Длительность фронта выходного импульса, не более, μs	20	20
Входная емкость общая, не более, pF	20	30
Входная емкость измерительного плеча, не более, pF	1	1
Диапазон рабочих температур, °C	10...35	10...35
Расширенный диапазон рабочих температур, °C	-40+85	-40+85
Габаритные размеры, высота, ширина, глубина, mm	300 x 260 x 220	500 x 260 x 220
Масса, не более, kg	10	15

Внешний вид измерительного преобразователя напряжения показан на рис.5.



Рис.5. Внешний вид измерительного преобразователя высокого напряжения ИПВН-15.

Исследование импульсных характеристик измерительного преобразователя напряжения на основе биекранированного делителя напряжения показало возможность его использования для исследования микро-миллисекундных импульсов высокого напряжения с длительностью фронта вплоть до 10 мкс и более. На рис.6 показана осциллограмма переходной характеристики делителя напряжения при частоте следования импульсов 10 кГц.

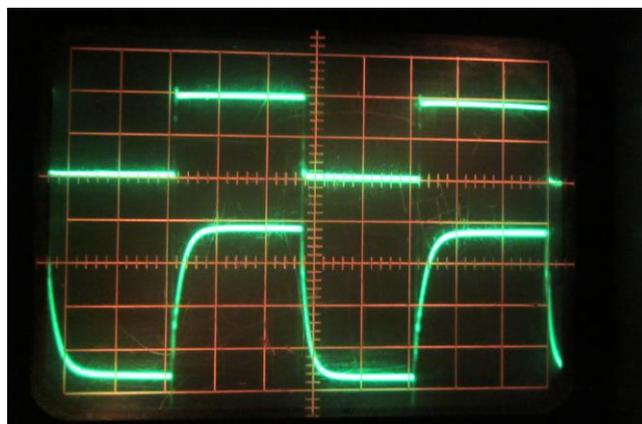


Рис. 6. Осциллограмма входного и выходного напряжения делителя напряжения. Вверху- входной, внизу- выходной сигнал. Цена деления по горизонтали - 20 мкс.

## IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получено математическое выражение для расчета коэффициента деления делителя напряжения с двумя разнопотенциальными экранами и на основе этого выражения для вычисления амплитудной и угловой погрешностей коэффициента деления.

Показана возможность компенсации амплитудной и угловой погрешности коэффициента деления за счет изменения параметров экранов – размеров и коэффициентов экранирования.

Расширен частотный диапазон высоковольтного делителя напряжения, что позволяет успешно использовать его в измерительных преобразователях для контроля качества электроэнергии.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Колпакович Ю.И. Математическая модель экранированного делителя напряжения из литого микропровода. Материалы 3-й международной конференции «ICTEI-2010». Кишинев, 2010.
- [2] Колпакович Ю., Барков В. Математическая модель биекранированного делителя напряжения. Информационные технологии и математическое моделирование. Вып.3, Славянский университет, Кишинев, 2013.
- [3] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1996 – 750с.