

ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Д. И. НЕФЕДЬЕВ, В. А. БАРАНОВ

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия,
e-mail: ndi200106@yandex.ru

Рассмотрены измерительные задачи, возникающие при обслуживании электрооборудования высоковольтных (более 1 кВ) электрических сетей. Предложено использовать пассивные измерительные схемы на основе делителей напряжения с комплексным сопротивлением, разработанных для проверки высоковольтных измерительных трансформаторов напряжения.

Ключевые слова: *пассивная измерительная схема, высоковольтный делитель напряжения.*

The measurements problems incipient at transition to maintenance of high-voltage (more than 1 kV) electrical networks by state are considered. For solution of the wide range of such problems the use of passive measuring circuits based on voltage dividers with complex impedance developed for verification of high-voltage measuring transformers is suggested.

Key words: *passive measuring circuit, high voltage divider.*

Переход отечественной электроэнергетики с системы технического обслуживания по наработке на систему обслуживания по состоянию сдерживается необходимостью решения ряда сложных измерительных задач [1]. Для высоковольтных измерений (напряжение выше 1 кВ) сложность обусловлена ограниченными возможностями проведения прямых измерений активных и пассивных электрических величин методом непосредственной оценки или дифференциально-нулевым методом, поскольку при этом требуются калибраторы высокого напряжения или высоковольтные меры активного сопротивления, емкости, индуктивности. В связи с этим наиболее перспективным и универсальным подходом представляются косвенные измерения величин, позволяющие оценить состояние высоковольтных электрических сетей, на основе понижения напряжений до диапазона измерения обычных средств измерений (СИ). Для понижения напряжений

целесообразно рассмотреть возможности использования устройств, уже разработанных при решении других задач высоковольтных измерений и их метрологического обеспечения. Предлагаемый подход применен при разработке высоковольтных устройств для измерений составляющих комплексного сопротивления электроизоляторов под рабочим напряжением.

Стандарт [2] устанавливает предпочтительные пары контролируемых электрических параметров высоковольтного электроизолятора, по которым оценивается его качество. Пары образуют сочетания электрическая емкость или обратная ей величина, активное электрическое сопротивление или проводимость и тангенс угла диэлектрических потерь. Значения всех нормируемых параметров можно определить по результатам измерений составляющих комплексного сопротивления изолятора в схеме замещения объекта, состоящей из параллельно соединенных резистора сопротивлением R и конденсатора емкостью C .

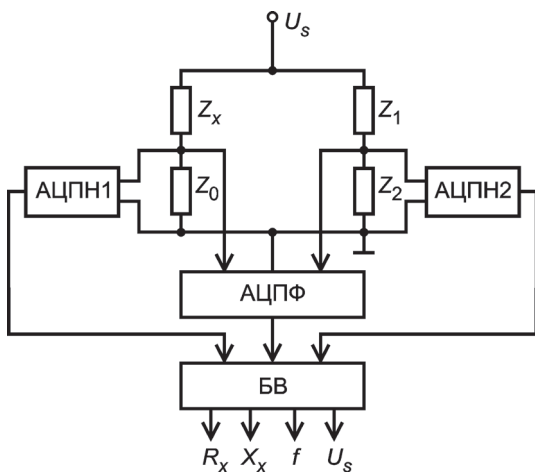


Рис. 1. Структурная схема устройства для измерений составляющих R_x , X_x комплексного сопротивления Z_x с мостовой измерительной схемой:

АЦПН1, *АЦПН2* — аналого-цифровые преобразователи напряжения; *АЦФ* — аналого-цифровой преобразователь фазового сдвига; *БВ* — блок вычислений; U_s — синусоидальное напряжение питания; f — частота напряжения питания

Традиционно параметры комплексного сопротивления высоковольтного электроизолятора измеряются у отключенного от сети объекта нулевым методом (методом уравнивающего преобразования), обеспечивающим высокую точность благодаря исключению напряжения питания измерительной схемы из уравнения измерения и прямого сравнения с многозначными мерами активного сопротивления и емкости. Данный метод реализуется мостовой измерительной схемой. При высоко-

вольтных измерениях область применения мостов переменного тока ограничивается предельно допустимым напряжением на многозначных мерах пассивных параметров электрических цепей. Для измерений активных величин (амплитуды и среднеквадратического значения (СКЗ) рабочего напряжения, его частоты) в высоковольтной электрической сети необходимо использовать соответствующие СИ.

Современные процессорные измерительные устройства позволяют реализовать дифференциальный метод измерения составляющих комплексного сопротивления на основе однозначных мер под рабочим напряжением промышленной сети [3]. Структурная схема устройства представлена на рис. 1. Устройство состоит из мостовой измерительной схемы, двух аналого-цифровых преобразователей напряжения *АЦПН1* и *АЦПН2*, аналого-цифрового преобразователя фазового сдвига *АЦПФ* и блока вычислений *БВ*.

Активная и реактивная составляющие комплексного сопротивления определяются из решения системы уравнений измерений

$$\left\{ \begin{array}{l} |\dot{W}| = \frac{(R_2^2 + X_2^2)[(R_0 + R_x)^2 + (X_0 + X_x)^2]}{(X_0^2 + R_0^2)[(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]} ; \\ \varphi = \arctg \left(\frac{A_1 + B_1 R_x + C_1 X_x}{A_2 + B_2 R_x + C_2 X_x} \right), \end{array} \right.$$

где $A_1 = (X_0^2 + R_0^2)(R_1 X_2 - R_1 R_2)$;

$$B_1 = -X_0 (R_2^2 + X_2^2) + R_0 (X_1 R_2 - R_1 X_2) + X_0 (R_1 R_2 + X_1 X_2);$$

$$C_1 = R_0 (R_2^2 + X_2^2) + R_0 (R_1 R_2 - R_1 X_2) + X_0 (R_1 X_2 + X_1 R_2);$$

$$A_2 = (X_0^2 + R_0^2) [(R_1 + R_2) R_2 + (X_1 + X_2) X_2];$$

$$B_2 = R_0 (R_2^2 + X_2^2) + R_0 (R_0 R_2 - X_1 X_2) + X_0 (X_2 R_1 + X_1 R_2);$$

$$C_2 = X_0 (R_2^2 + X_2^2) + R_0 (X_1 R_2 - R_1 X_2) + X_0 (R_1 R_2 + X_1 X_2).$$

Здесь \dot{W} — отношение напряжений на нижних плечах делителей напряжения; R_x, X_x — активная и реактивная составляющие комплекс-

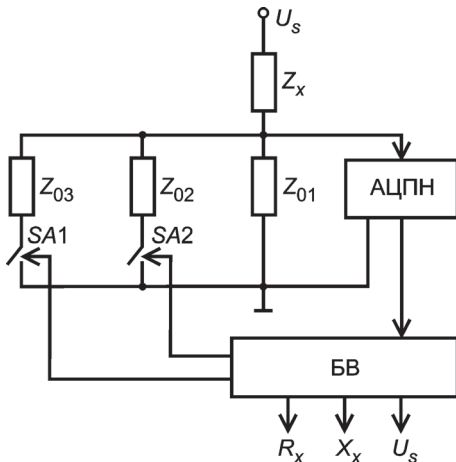


Рис. 2. Структурная схема устройства для измерений составляющих комплексного сопротивления с измерительной схемой в виде делителя напряжения (обозначения как на рис. 1)

Диапазон напряжения для измерений R_x , X_x можно значительно расширить при использовании тех же мер пассивных величин путем перехода к измерительной схеме в виде делителя напряжения. На рис. 2 представлена функциональная схема устройства для измерений составляющих комплексного сопротивления Z_x на основе измерений напряжения на опорном элементе при трех различных значениях его комплексного сопротивления Z_{01} , Z_{02} , Z_{03} .

По результатам прямых измерений напряжения вычисляются активная R_x и реактивная X_x составляющие комплексного сопротивления \dot{Z}_x из системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{U_{01}^2}{U_{02}^2} = \frac{Z_{01}^2 \left[(R_x + R_{02})^2 + (X_x + X_{02})^2 \right]}{Z_{02}^2 \left[(R_x + R_{01})^2 + (X_x + X_{01})^2 \right]}; \\ \frac{U_{01}^2}{U_{03}^2} = \frac{Z_{01}^2 \left[(R_x + R_{03})^2 + (X_x + X_{03})^2 \right]}{Z_{03}^2 \left[(R_x + R_{01})^2 + (X_x + X_{01})^2 \right]}. \end{cases}$$

сного сопротивления \dot{Z}_x объекта измерения; R_0 , R_1 , R_2 , X_0 , X_1 , X_2 — активные и реактивные составляющие комплексных сопротивлений \dot{Z}_0 , \dot{Z}_1 , \dot{Z}_2 — мер пассивных электрических величин.

Кроме параметров R_x , X_x , устройство измеряет частоту f , СКЗ и амплитуду синусоидального напряжения питания U_s .

В данном устройстве в качестве однозначных мер целесообразно использовать делители напряжения класса точности 0,1, разработанные для измерений коэффициентов преобразования измерительных трансформаторов до 220 кВ [4].

Здесь $U_{01}, U_{02}, U_{03}, Z_{01}, Z_{02}, Z_{03}$ — напряжения на опорных элементах и модули комплексного сопротивления опорного элемента в трех последовательных тактах преобразования; $R_{01}, R_{02}, R_{03}, X_{01}, X_{02}, X_{03}$ — активная и реактивная составляющие комплексных сопротивлений $\dot{Z}_{01}, \dot{Z}_{02}, \dot{Z}_{03}$.

Устройство также измеряет СКЗ и амплитуду напряжения питания U_s на основе решения уравнения состояния измерительной схемы в одном такте преобразования.

В связи с громоздкостью выражений инженерный расчет устройства следует проводить с использованием программ типа MathCad, MatLab. Исходными данными при расчете являются значения нормируемых параметров контролируемого электроизолятора, напряжение на измерительной схеме, допустимые напряжения на опорных элементах. Например, при контроле электроизолятора сопротивлением $r = 1$ ГОм и емкостью $C = 10$ нФ под рабочим напряжением $U_s = 30$ кВ, $f = 50$ Гц и допустимом напряжении на мере активного сопротивления и емкости $U_{01\max} = 1$ кВ вычисляется модуль комплексного сопротивления электроизолятора

$$|\dot{Z}_x| = \sqrt{R_x^2 + X_x^2},$$

где $R_x = \frac{r}{1 + \omega^2 r^2 C^2} \approx 10$ кОм; $X_x = \frac{\omega Cr}{1 + \omega^2 r^2 C^2} \approx 3,2$ МОм.

С учетом соотношения $U_s/U_{01\max} = 30$ вычисляется модуль сопротивления первого опорного элемента $|\dot{Z}_{01}| = \sqrt{R_{01}^2 + X_{01}^2} = |\dot{Z}_x| / 29 = 110$ кОм. Искомые значения сопротивления резистора r_{01} и емкости конденсатора C_{01} первого опорного элемента находятся в результате решения системы уравнений при принятых значениях активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления \dot{Z}_{01} , например, $R_{01} = 100$ кОм, $X_{01} = 33$ кОм:

$$R_{01} = \frac{r_{01}}{1 + \omega^2 r_{01}^2 C_{01}^2}; X_{01} = \frac{\omega C_{01} r_{01}^2}{1 + \omega^2 r_{01}^2 C_{01}^2}.$$

Задаваясь практически реализуемым значением емкости $C_{01} = 10 \text{ нФ}$, получаем $r_{01} \approx 110 \text{ кОм}$. Аналогично вычисляются значения параметров других элементов при максимальных напряжениях $U_{02\text{max}} = 0,8 U_{01\text{max}}$ и $U_{03\text{max}} = 0,6 U_{01\text{max}}$.

Предлагаемые устройства обеспечивают измерения как пассивных, так и активных электрических величин, позволяющих оценить состояние оборудования высоковольтной электрической сети. Применение в устройствах мостовой измерительной схемы и однозначных мер пассивных электрических величин в виде высоковольтных делителей напряжения, разработанных для метрологического обеспечения измерительных трансформаторов, позволяет расширить диапазон рабочих напряжений до 220 кВ. Использование измерительной схемы в виде делителя напряжения дает возможность проводить измерения при рабочем напряжении, превышающем предельно допустимое напряжение мер пассивных электрических величин.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Сви П. М.** Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1992.
2. **ГОСТ 30421—96.** Измерители электрической емкости, активного сопротивления и тангенса угла потерь высоковольтные. Общие технические условия.
3. **Нефедьев Д. И.** Методы и средства измерений коэффициентов преобразования измерительных трансформаторов. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006.
4. **Баранов В. А.** Измерения параметров композиционных диэлектрических материалов — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2008.

Дата принятия 04.10.2013 г.

