УДК 621.3.088.6

ОЦЕНИВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ СОГЛАСОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Баранов В.А.

Пензенский государственный университет, Пенза, e-mail: baranov_va2202@mail.ru

Способы измерений составляющих комплексного сопротивления двухполюсных электрических цепей (ДЭЦ) на основе пассивных измерительных схем с минимальным числом состояний и прямыми измерениями амплитуды напряжения на опорной ДЭЦ и фазового сдвига напряжений на опорных ДЭЦ обладают наиболее широкими функциональными возможностями среди известных способов прямого преобразования параметров комплексного сопротивления. В частности, они могут применяться для контроля изоляторов высоковольтных энергетических сетей под рабочим напряжением, превышающим допустимое напряжение на опорных ДЭЦ. Погрешность согласования сопротивлений опорных элементов измерительной схемы и входных сопротивлений АЦП напряжения и (или) АЦП фазового сдвига таких устройств является значительной. На результат измерения влияют не только входное сопротивление применяемого АЦП, но и параметры электрических цепей, соединяющих АЦП с измерительной схемой, электрические параметры и конструктивное расположение электрических и магнитных экранов. Отрицательное влияние всей совокупности этих факторов на точность измерения может быть ослаблено, если определить эквивалентное их воздействию входное сопротивления АЦП. Эквивалентное входное сопротивление АЦП определяется путем поочередного включения в измерительную схему с резистивными опорными элементами вместо исследуемой ДЭЦ двух образцовых элементов (резисторы, конденсаторы) с различными сопротивлениями. В каждом состоянии измерительной схемы проводится измерение напряжения на опорной ДЭЦ. Активная и реактивная составляющие эквивалентного сопротивления находятся как решения системы уравнений состояния измерительной схемы. Эквивалентный импеданс используется вместо номинального импеданса опорного двухполюсника при нахождении результатов измерения составляющих комплексного сопротивления, что позволяет уменьшить систематическую составляющую погрешности согласования.

Ключевые слова: измерения составляющих комплексного сопротивления, погрешность согласования, импеданс АЦП

MISMATCH ERRORS EVALUATION IN MEASURING THE COMPONENTS OF IMPEDANCE

Baranov V.A.

Penza state university, Penza, e-mail: baranov_va2202@mail.ru

Methods of measuring the components of the impedance of two terminal network (TTN) based on passive measuring circuit with a minimal number of states and the direct measurements of the amplitude of the voltage at the reference TTN and phase shift of the voltages on the reference TTN have the wide functionality of the known methods of direct conversion. In particular, they can be applied to monitor the high voltage insulators of energy networks with operating voltage, exceeding the limit voltage at the reference TTN. However, the matching error of the reference TTN impedance and voltage ADC impedance and (or) phase shift ADC impedance of such devices is significant. The parameters of electrical circuits connecting the ADC to measuring circuit, the electrical parameters and structural arrangement of the electrical and magnetic screens influence on the measurement result too. The negative impact of all this factors on the accuracy of the measurement can be relaxed if we determine equivalent impedance of the ADC. This character of the ADC is determined by alternately included in the measuring circuit two precision elements (resistors, capacitors) with different impedance instead of measurement object. The voltage on the reference TTN is measured in each state of the measuring circuit and appropriate equation of state is formed. Active and reactive components of the equivalent impedance are the solutions of equations system. Equivalent impedance used for finding the measurement results instead of the nominal impedance of the reference TTN. This reduces the systematic matching error when components of TTN impedance are measured.

Keywords: measurements of components of the impedance, the complex impedance of the ADC, mismatch error

Многие задачи измерения параметров диэлектрических материалов и изделий из них сводятся к задаче измерений составляющих комплексного сопротивления высокоомных двухполюсных электрических цепей (ДЭЦ) [1]. К высокоомным относят ДЭЦ с модулем комплексного сопротивления более 1 МОм.

Из известных методов измерения составляющих комплексного сопротивления ДЭЦ [2] наиболее широкими функциональными возможностями обладают методы прямого преобразования на основе пассивных измерительных схем с минимальным числом состояний и прямыми измерениями амплитуды напряжения на опорной ДЭЦ и фазового сдвига напряжений на опорных ДЭЦ [3]. Простейшей измерительной схемой является измерительный делитель напряжения, образованный измеряемой и опорной ДЭЦ. Широкое применение находит мостовая измерительная схема, образованная измерительным делителем и опорным делителем из двух опорных ДЭЦ. При измерении модуля комплексного электрического сопротивления образца порядка 10^{10} Ом даже при напряжении на измерительной схеме 10 кВ ток составляет менее 1 мкА. Для формирования напряжения опорной ДЭЦ в диапазоне 0,01–10 В требуются опорные ДЭЦ

с модулем сопротивления более 10^5 Ом. Это значение сопротивления сравнимо с входным сопротивлением большинства современных интегральных АЦП. Шунтирование опорной ДЭЦ конечным входным сопротивлением АЦП является источником возникновения погрешности согласования, которая может превышать 10 %.

В процессорных средствах измерений минимизация систематической составляющей погрешности согласования может быть достигнута путем автоматического введения соответствующих поправок в результаты измерений, если входное сопротивление АЦП известно. Это определяет актуальность разработки методик измерений составляющих комплексного входного сопротивления АЦП напряжения и АЦП фазового сдвига, используемых в устройствах для измерений составляющих комплексного сопротивления высокоомных ДЭЦ.

При измерении параметров высокоомных ДЭЦ с измерением амплитуды напряжения измерительных схем в виде делителя напряжения, образованного измеряемой ДЭЦ с комплексным сопротивлением Z_X и опорной ДЭЦ с комплексным сопротивлением Z_0 с учетом входного сопротивления АЦП напряжения $\dot{Z}_V$ необходимо рассматривать в виде, представленном на рис. 1.

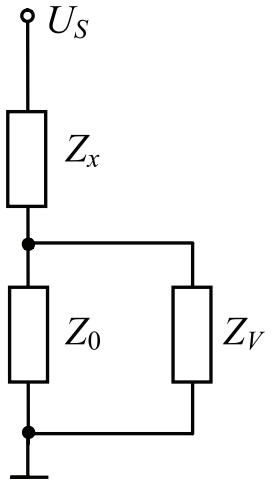

Рис. 1 Измерительная схема в виде делителя напряжения с учетом входного сопротивления АЦП напряжения

С учетом входного сопротивления АЦП вместо сопротивления опорной ДЭЦ при расчетах должно использоваться выражение

$$\dot{Z}_0' = \frac{\dot{Z}_V \cdot \dot{Z}_0}{\dot{Z}_V + \dot{Z}_0}.$$

При использовании мостовой ИС нижнее плечо опорного делителя представляется в виде параллельного соединения опорной ДЭЦ и ДЭЦ с сопротивлением, равным входному сопротивлению АЦП напряжения. Эквивалентное сопротивление нижнего плеча определяется выражением

$$\dot{Z}_{02}' = \frac{\dot{Z}_V \cdot \dot{Z}_{02}}{\dot{Z}_V + \dot{Z}_{02}}.$$

На состояние измерительной схемы влияет входное сопротивление только первого входа АЦП фазового сдвига. Сопротивление нижнего плеча измерительного делителя с учетом входного сопротивления АЦП определяется как

$$\dot{Z}_0' = \frac{\dot{Z}_{F1} \cdot \dot{Z}_0}{\dot{Z}_{F1} + \dot{Z}_0}.$$

При использовании мостовой измерительной схемы на фазовый сдвиг напряжений в средних точках делителей влияют сопротивления входов АЦП фазового сдвига (рис. 2).

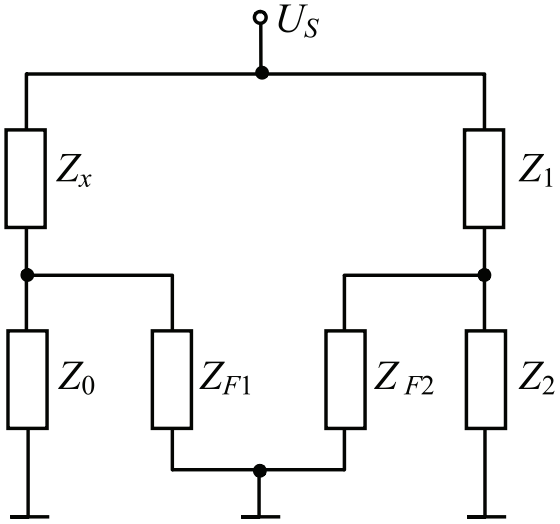

Рис. 2. Эквивалентная схема мостовой измерительной схемы при измерении фазового сдвига напряжений в средних точках делителей

Сопротивление нижнего плеча опорного делителя определяется из уравнения

$$\dot{Z}_{02}' = \frac{\dot{Z}_{F2} \cdot \dot{Z}_{02}}{\dot{Z}_{F2} + \dot{Z}_{02}}.$$

Для способов измерений составляющих комплексного сопротивления ДЭЦ с измерением амплитуды напряжения и фазового сдвига на основе измерительной схемы в виде делителя напряжения и мостовой измерительной схемы с учетом импедансов обоих АЦП представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

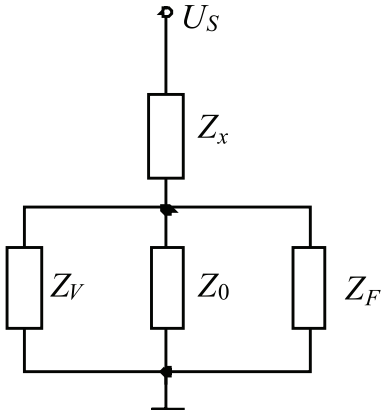

Рис. 3. Эквивалентная схема измерительной схемы в виде делителя напряжения при измерении напряжения и фазового сдвига

Для нижних плеч делителей при расчетах должны использоваться значения сопротивлений Z_{01VF} и Z_{02VF} соответственно.

$$Z_{01VF} = Z_{01V} \cdot \frac{Z_{F1}}{Z_{01V} + Z_{F1}};$$

$$Z_{02VF} = Z_{02V} \cdot \frac{Z_{F2}}{Z_{02VF} + Z_{F2}}.$$

Современный подход к измерениям входного сопротивления цифровых измерительных приборов на переменном токе подробно изложен в работе [4]. Однако при измерении составляющих комплексного сопротивления ДЭЦ на основе пассивных измерительных схем АЦП напряжения и АЦП фазового сдвига являются не автономными измерительными преобразователями, а узлами более сложного измерительного устройства. При этом на результат измерения влияют не только входное сопротивление применяемого АЦП, но и параметры электрических цепей, соединяющих АЦП с измерительной схемой, электрические параметры и конструктивное расположение электрических и магнитных экранов [5]. Отрицательное влияние всей совокупности этих факторов на точность измерения может быть ослаблено, если определить эквивалентное их воздействию входного сопротивления АЦП смонтированного измерительного устройства. В связи с этим разработаны методики измерений входных сопротивлений АЦП напряжения и АЦП фазового сдвига без отключения от измерительной схемы.

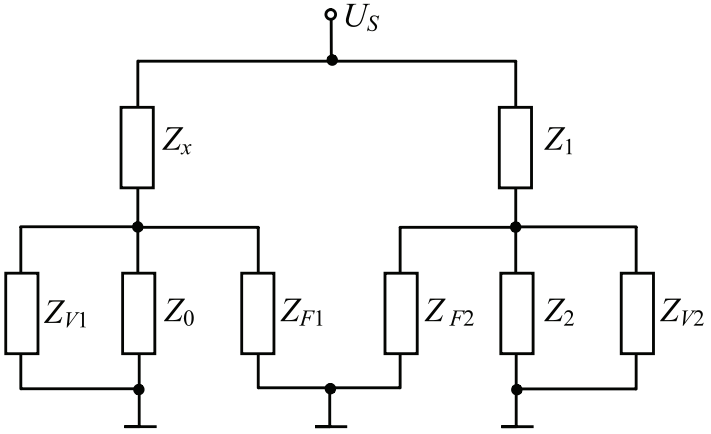

Рис. 4. Эквивалентная схема мостовой ИС при измерении напряжения и фазового сдвига

При реализации способов измерения составляющих комплексного сопротивления ДЭЦ с прямыми измерениями напряжений эквивалентное входное сопротивление АЦП определяется путем поочередного включения в измерительную схему с резистивными опорными элементами вместо исследуемой ДЭЦ двух образцовых резисторов с сопротивлениями R_1 и R_2 соответственно. В каждом состоянии измерительной схемы проводится измерение напряжения на опорной ДЭЦ. Активная R_V и реактивная X_V составляющие сопротивления Z_V находятся как решения системы уравнений

$$\begin{cases} W_1 = \dfrac{U_1^2}{U_S^2} = \dfrac{R_1^2 \cdot (R_V^2 + X_V^2)}{R_{01}^2 \cdot R_1^2 + 2 \cdot R_{01} \cdot R_1 \cdot X_V \cdot (R_{01} + R_1) + (R_{01} + R_2)^2 \cdot (R_V^2 + X_V^2)}, \\ W_2 = \dfrac{U_S^2}{U_S^2} = \dfrac{R_2^2 \cdot (R_V^2 + X_V^2)}{R_{01}^2 \cdot R_2^2 + 2 \cdot R_{01} \cdot R_2 \cdot X_V \cdot (R_{01} + R_2) + (R_{01} + R_2)^2 \cdot (R_V^2 + X_V^2)}. \end{cases} \quad (1)$$

Система уравнений (1) имеет следующие решения:

$$R_V = \frac{R_0 \cdot (W_2 \cdot R_2 \cdot A - W_1 \cdot R_1^2 \cdot B)}{2 \cdot (W_1 \cdot R_1 \cdot (R_0 + R_1) \cdot B - W_2 \cdot R_2 \cdot (R_0 + R_2) \cdot A)};$$

$$X_V = \left[\frac{W_1}{A} \cdot (R_0^2 \cdot R_1^2 + 2 \cdot R_1 \cdot R_0 \cdot R_V \cdot (R_0 + R_1)) - R_V{}^2 \right]^{0,5},$$

где $A = W_1 \cdot (R_0 + R_1)^2 - R_0^2$; $B = W_2 \cdot (R_0 + R_2)^2 - R_0^2$.

Для определения входного сопротивления АЦП напряжения, подключенного к опорному делителю, достаточно одного образцового резистора. Первое уравнение системы получается с использованием первой опорной ДЭЦ делителя. Эта система уравнений отличается от системы (1) заменой параметров R_1 и R_0 на параметры R_{01} и R_{02}.

При реализации способов измерения составляющих комплексного сопротивления ДЭЦ с прямым измерением фазового сдвига составляющие R_F и X_F входного сопротивления АЦП фазового сдвига определяются как решения системы уравнений

$$\mathrm{tg}\phi_1 = \frac{X_F \cdot R_0 \cdot R_1}{R_F \cdot R_0 \cdot R_1 + (R_0 + R_1) \cdot (X_F^2 + R_F^2)};$$

$$\mathrm{tg}\phi_2 = \frac{X_F \cdot R_0 \cdot R_2}{R_F \cdot R_0 \cdot R_2 + (R_0 + R_2) \cdot (X_F^2 + R_F^2)} \cdot (2)$$

Система уравнений (2) имеет следующие решения:

$$R_F = \frac{(\mathrm{tg}\phi_1 \cdot R_2 \cdot (R_0 + R_1) - \mathrm{tg}\phi_2 \cdot R_1 \cdot (R_0 + R_2)) \cdot A}{(R_0 + R_1) \cdot (A^2 + \mathrm{tg}^2\phi_1 \cdot \mathrm{tg}^2\phi_2 \cdot R_0^2 \cdot (R_2 - R_1)^2)};$$

$$X_F = R_X \cdot \frac{\mathrm{tg}\phi_1 \cdot \mathrm{tg}\phi_2 \cdot R_0 \cdot (R_2 - R_1)}{\mathrm{tg}\phi_1 \cdot R_2 \cdot (R_0 + R_1) - \mathrm{tg}\phi_2 \cdot R_1 \cdot (R_0 + R_2)},$$

где $A = \mathrm{tg}\phi_1 \cdot R_2 \cdot (R_0 + R_1) - \mathrm{tg}\phi_2 \cdot R_1 \cdot (R_0 + R_2)$.

При реализации способов измерения составляющих комплексного сопротивления ДЭЦ с прямыми измерениями амплитуды и фазового сдвига необходимо при расчетах использовать значение сопротивления опорной ДЭЦ из уравнения:

$$\dot{Z}_0' = \frac{\dot{Z}_0 \cdot \dot{Z}_F \cdot \dot{Z}_V}{\dot{Z}_0 \cdot (\dot{Z}_F + \dot{Z}_V) + \dot{Z}_F \cdot \dot{Z}_V}.$$

Выводы

Предлагаемые методики при использовании в качестве образцовых прецизионных резисторов позволяют оценить систематические погрешности измерения составляющих комплексного сопротивления ДЭЦ, обусловленные конечностью импеданса применяемых АЦП напряжения и АЦП фазового сдвига. Это дает возможность повысить точность измерений.

Список литературы

1. Баранов В.А. Измерения параметров композиционных диэлектрических материалов. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2008. – 124 с.

2. Баранов В.А. Систематизация способов измерения составляющих комплексного сопротивления по методу решения обобщенного уравнения мостовой цепи // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – №3. – С. 110–120.

3. Добровинский И.Р., Ломтев Е.А. Проектирование ИИС для измерения параметров электрических цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 120 с.

4. Кнеллер В.Ю. Автоматическое измерение составляющих комплексного сопротивления. – Л.: Энергия, 1967. – 368 с.

5. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. – М.: Мир, 1979. – 320 с.

References

1. Baranov V.A. Izmerenija parametrov kompozicionnyh dijelektricheskih materialov. Penza: IIC PGU, 2008. 124 p.

2. Baranov V.A. Sistematizacija sposobov izmerenija sostavljajuwih kompleksnogo soprotivlenija po metodu reshenija obobwennogo uravnenija mostovoj cepi // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki, 2008, no.3. pp. 110–120.

3. Dobrovinskij I.R., Lomtev E.A. Proektirovanie IIS dlja izmerenija parametrov jelektricheskih cepej M.: Jenergoatomizdat, 1997. 120 p.

4. Kneller V.Ju. Avtomaticheskoe izmerenie sostavljajuwih kompleksnogo soprotivlenija. L.: Jenergija, 1967. 368 p.

5. Ott G. Metody podavlenija shumov i pomeh v jelektronnyh sistemah. M.: Mir, 1979. 320 p.

Рецензенты:

Данилов А.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Метрология и системы качества», заместитель директора ФБУ «Пензенский ЦСМ», г. Пенза;

Цыпин Б.В., д.т.н., профессор, Пензенский государственный университет, кафедра «Информационно-измерительная техника», г. Пенза.

Работа поступила в редакцию 07.12.2012.