

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ СПОСОБОВ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПО МЕТОДУ РЕШЕНИЯ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ МОСТОВОЙ ЦЕПИ

Предлагается систематизировать способы измерения комплексного сопротивления по используемому методу решения обобщенного уравнения мостовой цепи. Выявлены способы измерений, перспективные для применения в процессорных средствах измерений комплексного сопротивления. Описаны оригинальные устройства для измерения составляющих комплексного сопротивления.

Обобщенное уравнение мостовой цепи, предложенное К. Б. Карандеевым и Г. А. Штамберггером, устанавливает связь комплексного сопротивления двухполюсной электрической цепи (ДЭЦ), включенной в мостовую измерительную цепь, и отношения двух активных параметров этой цепи (синусоидальных напряжений или токов) [1]:

$$W = W_R + jW_I = |W| e^{j\varphi} = \frac{aZ_X + b}{cZ_X + d}, \quad (1)$$

где W – отношение комплексных напряжений (токов); $Z_X = R_X + jX_X$ – измеряемое комплексное сопротивление ДЭЦ с активной R_X и реактивной X_X составляющими; a, b, c, d – известные комплексные коэффициенты, определяемые комплексными сопротивлениями опорных ДЭЦ измерительной схемы; W_R, W_I – активная и реактивная составляющие отношения W ; $|W|, \varphi$ – модуль и аргумент отношения W . Отношение W может быть безразмерным отношением однородных величин (напряжений или токов измерительной схемы) или размерным отношением неоднородных величин (напряжение и ток) с размерностью сопротивления или проводимости.

Кроме мостовых измерительных схем, обобщенное уравнение описывает измерительные схемы в виде делителя напряжения (полумостовые или последовательные), параллельные, параллельно-последовательные и минимальную измерительную схему в виде исследуемой ДЭЦ.

При отсутствии опорных элементов обобщенное уравнение вырождается в закон Ома для участка цепи в комплексной форме. В этом случае измерение составляющих комплексного сопротивления (СКС) ДЭЦ можно осуществить путем измерения трех величин: напряжения, тока и фазового сдвига между ними. Наличие в измерительной схеме опорных ДЭЦ позволяет проводить прямые измерения СКС ДЭЦ, а при косвенных измерениях выполнять прямые измерения только двух неоднородных величин.

Измерение СКС ДЭЦ на основе решения обобщенного уравнения состоит в преобразованиях измеряемых величин и известных сопротивлений опорных ДЭЦ в активные параметры измерительной схемы (напряжение, ток), прямых измерениях этих активных параметров или их сравнениях с заданными значениями и вычислении по результатам этих операций значений

искомых величин как корней обобщенного уравнения. Каждая из операций измерения имеет ряд вариантов реализации. Различные сочетания этих вариантов порождают множество возможных способов измерения СКС ДЭЦ, однако в любом случае необходимо решать обобщенное уравнение относительно двух неизвестных. Именно выбранный метод решения уравнения определяет структуру измерительного устройства и алгоритм измерения, и, следовательно, уровень его метрологических характеристик. Поэтому метод решения обобщенного уравнения может выступать как основа систематизации способов измерения СКС ДЭЦ.

Методы решения обобщенного уравнения можно разделить на методы, основанные на варьировании коэффициентов обобщенного уравнения, и методы, основанные на использовании фиксированных коэффициентов.

Методы решения на основе варьирования коэффициентов:

1. Метод контроля отношения: осуществляется варьирование коэффициентов a, b, c, d (1) до приведения комплексного отношения W к определенному значению $W = W_0$. Достижение отношением W значения W_0 фиксируется путем непосредственного сравнения или измерительного контроля величин, формирующих это отношение. Неизвестные СКС R_X и X_X находятся затем как решения системы уравнений $W_{R0} = eR_X$ и $W_{R0} = fX_X$, где e и f – действительные функции коэффициентов a, b, c, d .

2. Метод исключения неизвестного: осуществляется варьирование коэффициентов a, b, c, d до поочередного достижения функциями коэффициентов сочетаний значений $e = 0, f \neq 0$ и $e \neq 0, f = 0$. При этом обобщенное уравнение поочередно вырождается в уравнение с одним неизвестным X_X и R_X соответственно.

Методы фиксированных коэффициентов:

1. Метод одного значения коэффициентов и двух параметров отношения: коэффициентам обобщенного уравнения a, b, c, d присваиваются фиксированные значения $a = a_1, b = b_1, c = c_1, d = d_1$. При известных модуле и аргументе комплексного отношения W неизвестные СКС находятся путем решения системы двух уравнений, формируемой из уравнения модулей и уравнения аргументов отношения W .

2. Метод двух значений коэффициентов и одного параметра отношения: формируются два обобщенных уравнения, отличающихся значениями коэффициентов:

$$W_1 = \frac{a_1 Z_X + b_1}{c_1 Z_X + d_1}, W_2 = \frac{a_2 Z_X + b_2}{c_2 Z_X + d_2}.$$

Для нахождения неизвестных достаточно задаться только модулями или только аргументами отношений W и решить относительно составляющих Z_X систему квадратных или трансцендентных уравнений соответственно.

Исторически первый способ измерения СКС ДЭЦ – способ уравнивания преобразования – реализует метод контроля отношения путем варьирования коэффициентов и сравнения текущего значения отношения с его заданным значением. Заданному состоянию измерительной схемы $W = 1$

соответствует способ полного уравнивания [1]. При приведении схемы к другим значениям W имеет место квазиуравнивающее преобразование. Процесс варьирования коэффициентов может осуществляться различными методами и требует оптимизации [2].

Способы измерений СКС, основанные на решении обобщенного уравнения методом исключения неизвестного, разработаны Г. А. Штамбергером [3].

Примером реализации метода фиксированных коэффициентов является измерение составляющих комплексного сопротивления ДЭЦ, основанное на использовании одного параметра (модуля) отношения W [4].

Выявление методов решения обобщенного уравнения, перспективных для применения в качестве математических моделей алгоритмов функционирования процессорных средств измерений СКС, следует проводить на основе следующих положений:

1. Метод решения должен быть инвариантным по отношению к структуре ДЭЦ. Задача идентификации структуры ДЭЦ [5] рассматривается как отдельная задача.

2. Метод решения должен обеспечивать реализацию средства измерений с минимальными аппаратными затратами в смысле необходимого количества состояний опорных ДЭЦ и числа измеряемых и (или) сравниваемых величин. При этом считается, что измерение требует таких же аппаратных затрат, что и сравнение.

3. Сложность и погрешности вычислений не являются ограничивающими факторами для использования того или иного метода решения уравнения в качестве основы алгоритма измерения СКС в связи с быстрым развитием средств вычислительной техники и их широким внедрением в средства измерений [6].

Исходя из перечисленных положений наиболее перспективным для создания новых средств измерений СКС представляется метод фиксированных коэффициентов в различных модификациях. Данный метод требует для своей реализации минимального (до 1) числа различных значений коэффициентов обобщенного уравнения.

При реализации метода одного значения коэффициентов и двух параметров система уравнений, решениями которой являются значения измеряемых величин, имеет вид

$$\begin{cases} |W| = \frac{(R_2^2 + X_2^2) [(R_0 + R_X)^2 + (X_0 + X_X)^2]}{(X_0^2 + R_0^2) [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]}, \\ \varphi = \arctg \left(\frac{A_1 + B_1 R_X + C_1 X_X}{A_2 + B_2 R_X + C_2 X_X} \right), \end{cases}$$

где $A_1 = |Z_0|^2 (R_1 X_2 - X_1 R_2)$, $B_1 = -X_0 |Z_2|^2 + R_0 (X_1 R_2 - R_1 X_2) + X_0 (R_1 R_2 + X_1 X_2)$, $C_1 = R_0 |Z_2|^2 + R_0 (R_1 R_2 - R_1 X_2) + X_0 (R_1 X_2 + X_1 R_2)$, $A_2 = |Z_0|^2 \times (X_0^2 + R_0^2) [(R_1 + R_2) R_2 + (X_1 + X_2) X_2]$, $B_2 = R_0 |Z_2|^2 + R_0 (R_0 R_2 - X_1 X_2) + X_0 (X_2 R_1 + X_1 R_2)$, $C_2 = X_0 |Z_2|^2 + R_0 (X_1 R_2 - R_1 X_2) + X_0 (R_1 R_2 + X_1 X_2)$.

Здесь $Z_0 = R_0 + jX_0$, $Z_1 = R_1 + jX_1$, $Z_2 = R_2 + jX_2$ – комплексные сопротивления опорных ДЭЦ мостовой измерительной схемы.

Структурная схема устройства для измерения СКС ДЭЦ данным методом представлена на рис. 1. Устройство состоит из мостовой измерительной схемы, двух АЦП напряжения АЦПН1 и АЦПН2, АЦП фазового сдвига напряжений АЦПФ и блока вычислений БВ. АЦП осуществляют преобразования в код напряжений на ДЭЦ с сопротивлениями Z_0 и Z_2 и фазового сдвига между этими напряжениями. Результаты преобразований поступают в блок вычислений БВ, где значения СКС вычисляются по формулам

$$\left\{ \begin{aligned} X &= \frac{X_0 - (R_0 + K_1)K_2}{K_2^2 + 1} + \\ &+ \sqrt{\frac{(R_0^2 + X_0^2)((R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_0)^2)|W| - (R_0 + K_1 - K_2X_0)^2(R_2^2 + X_2^2)}{(R_2^2 + X_2^2)(K_2^2 + 1)^2}}, \\ R_X &= K_1 + K_2X_X, \end{aligned} \right.$$

где $K_1 = \frac{A_1 - \operatorname{tg}\varphi A_2}{\operatorname{tg}\varphi B_2 - B_1}$, $K_2 = \frac{C_1 - \operatorname{tg}\varphi C_2}{\operatorname{tg}\varphi B_2 - B_1}$.

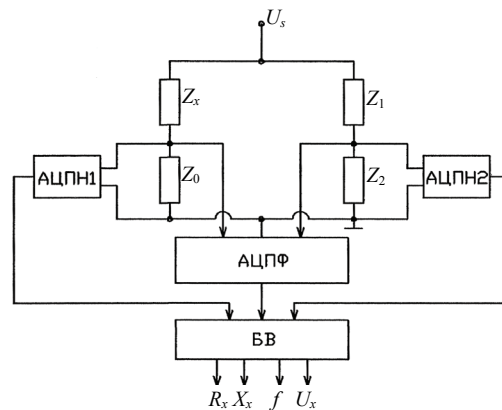


Рис. 1 Структурная схема устройства для измерения СКС ДЭЦ на основе мостовой измерительной схемы с измерением напряжения и фазового сдвига

Реализации метода двух значений коэффициентов и одного параметра возможна двумя способами, отличающимися измеряемым параметром.

При выборе в качестве измеряемого параметра напряжения значения СКС находятся как решения системы уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} |W_1|^2 &= \frac{(R_2^2 + X_2^2)[(R_{01} + R_X)^2 + (X_{01} + X_X)^2]}{(X_{01}^2 + R_{01}^2)[(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]}, \\ |W_2|^2 &= \frac{(R_2^2 + X_2^2)[(R_{02} + R_X)^2 + (X_{02} + X_X)^2]}{(X_{02}^2 + R_{02}^2)[(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]}. \end{aligned} \right.$$

Здесь $|W_1| = \frac{U_2}{U_{01}}$, $|W_2| = \frac{U_2}{U_{02}}$, где U_2 , U_{01} , U_{02} – напряжения на ДЭЦ с сопротивлениями $Z_2 = R_2 + jX_2$, $Z_{01} = R_{01} + jX_{01}$ и $Z_{02} = R_{02} + jX_{02}$ соответственно.

Структурная схема устройства для измерения СКС ДЭЦ данным способом представлена на рис. 2.

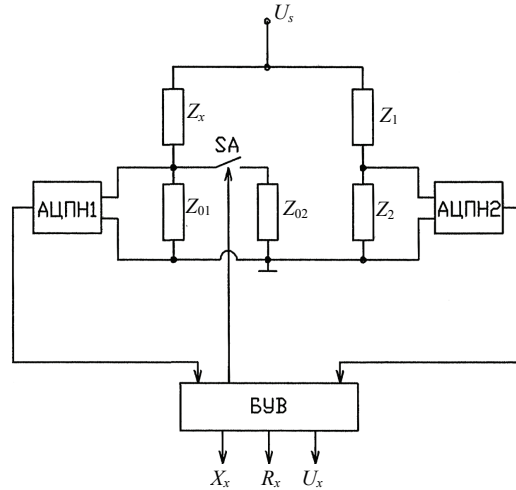


Рис. 2 Структурная схема устройства для измерений СКС ДЭЦ на основе параллельной измерительной схемы с измерением напряжения

Устройство состоит из параллельной измерительной схемы, двух АЦП напряжения и блока управления и вычислений БУВ. В процессе измерения измерительная схема может находиться в двух состояниях, отличающихся состоянием аналогового ключа SA, управляемого блоком БУВ. АЦПН1 поочередно преобразует в код напряжение на опорной ДЭЦ при ее сопротивлениях Z_{01} и Z_{02} . АЦПН2 осуществляет преобразование в код напряжения на ДЭЦ с сопротивлением Z_2 . Коды результатов всех преобразований поступают в БУВ, где вычисляются значения СКС измеряемого сопротивления Z_X по формулам

$$\begin{cases} R_X = (0,25p^2 - q)^{0,5} - 0,5p, \\ X_X = DR_X + E, \end{cases}$$

где

$$p = \frac{2(DE + EX_{01} + R_{01})}{E^2 + 1}, \quad q = \frac{D^2 + 2DX_{01} + X_{01}^2 + R_{01}^2 - B_1}{E^2 + 1}, \quad D = \frac{C_1 - C_2}{2(X_{02} - X_{01})},$$

$$E = \frac{R_{01} - R_{02}}{X_{02} - X_{01}}, \quad C_1 = R_{01}^2 - B_1, \quad C_2 = R_{02}^2 - B_2, \quad B_1 = \frac{|W_1|^2 (X_{01}^2 + R_{01}^2)}{A},$$

$$B_2 = \frac{|W_2|^2 (X_{02}^2 + R_{02}^2)}{A}, \quad A = \frac{X_2^2 + R_2^2}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}.$$

При выборе в качестве измеряемого параметра фазового сдвига способ измерений СКС Z_X состоит в измерениях фазовых сдвигов φ_1 и φ_2 между напряжениями в средних точках делителей напряжения измерительной схемы при значениях сопротивления опорной ДЭЦ измерительного делителя Z_{01} и Z_{02} соответственно. Значения СКС измеряемой ДЭЦ находятся как решения системы уравнений

$$\begin{cases} \varphi_1 = \arctg \frac{A_1 + B_1 R_X + C_1 X_X}{A_2 + B_2 R_X + C_2 X_X}, \\ \varphi_2 = \arctg \frac{A_3 + B_3 R_X + C_3 X_X}{A_4 + B_4 R_X + C_4 X_X}, \end{cases}$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= (X_{01}^2 + R_{01}^2)(R_1 X_2 - X_1 R_2), \\ B_1 &= -X_{01}(R_2^2 + X_2^2) + R_{01}(X_1 R_2 - R_1 X_2) + X_{01}(R_1 R_2 + X_1 X_2), \\ C_1 &= R_{01}(R_2^2 + X_2^2) + R_{01}(R_1 R_2 - R_1 X_2) + X_{01}(R_1 X_2 + X_1 R_2), \\ A_2 &= (X_{01}^2 + R_{01}^2)[(R_1 + R_2)R_2 + (X_1 + X_2)X_2], \\ B_2 &= R_{01}(R_2^2 + X_2^2) + R_{01}(R_0 R_2 - X_1 X_2) + X_{01}(X_2 R_1 + X_1 R_2), \\ C_2 &= X_{01}(R_2^2 + X_2^2) + R_{01}(X_1 R_2 - R_1 X_2) + X_{01}(R_1 R_2 + X_1 X_2), \\ A_3 &= (X_{02}^2 + R_{02}^2)(R_1 X_2 - X_1 R_2), \\ B_3 &= -X_{02}(R_2^2 + X_2^2) + R_{02}(X_1 R_2 - R_1 X_2) + X_{02}(R_1 R_2 + X_1 X_2), \\ C_3 &= R_{02}(R_2^2 + X_2^2) + R_{02}(R_1 R_2 - R_1 X_2) + X_{02}(R_1 X_2 + X_1 R_2), \\ A_4 &= (X_{02}^2 + R_{02}^2)[(R_1 + R_2)R_2 + (X_1 + X_2)X_2], \\ B_4 &= R_{02}(R_2^2 + X_2^2) + R_{02}(R_0 R_2 - X_1 X_2) + X_{02}(X_2 R_1 + X_1 R_2), \\ C_4 &= X_{02}(R_2^2 + X_2^2) + R_{02}(X_1 R_2 - R_1 X_2) + X_{02}(R_1 R_2 + X_1 X_2). \end{aligned}$$

Структурная схема устройства, реализующего способ измерения СКС с измерениями фазового сдвига, представлена на рис. 3.

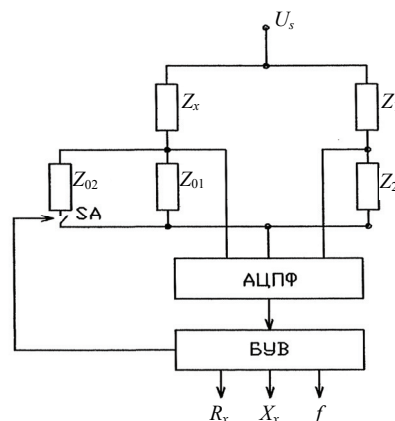


Рис. 3 Структурная схема устройства для измерения СКС ДЭЦ на основе мостовой измерительной схемы с измерением фазового сдвига

Устройство состоит из мостовой измерительной схемы, АЦП фазового сдвига АЦПФ, блока управления и вычислений БУВ. В процессе измерения схема может находиться в двух состояниях, отличающихся положением аналогового ключа SA, управляемого блоком БУВ. АЦПФ поочередно преобразует в код фазовый сдвиг между напряжениями в средних точках делителей измерительной цепи при значениях сопротивления опорной ДЭЦ измерительного делителя Z_{01} и Z_{02} . Коды результатов всех преобразований поступают в БУВ, где вычисляются значения СКС измеряемого сопротивления Z_X по формулам

$$\begin{cases} X_X = \frac{D_1 D_2 (A_2 B_4 - A_4 B_2) + D_1 (A_3 B_2 - A_2 B_3) + D_2 (A_4 B_1 - A_1 B_4) + A_1 B_3 - A_3 B_1}{D_1 D_2 (B_2 C_4 - B_4 C_2) + D_1 (B_3 C_2 - B_2 C_3) + D_2 (B_4 C_1 - B_1 C_4) + B_1 C_3 - B_3 C_1}, \\ R_X = \frac{A_3 - A_4 D_2 + X_X (C_3 - C_4 D_2)}{B_4 D_2 - B_3}, \end{cases}$$

где $D_1 = \operatorname{tg}(\varphi_1)$, $D_2 = \operatorname{tg}(\varphi_2)$.

Важной особенностью метода фиксированных коэффициентов является возможность его реализации не только на основе мостовой и параллельной измерительных схем, но и на основе схемы в виде делителя напряжения. Исключение опорного делителя существенно упрощает измерительную схему, но вызывает необходимость организации в процессе измерения дополнительного ее состояния.

При реализации метода одного значения коэффициентов и двух параметров на основе делителя напряжения система уравнений, решениями которой являются значения измеряемых СКС, имеет вид

$$\begin{cases} \frac{U_{01}^2}{U_{02}^2} = \frac{Z_{01}^2 \left[(R_X + R_{02})^2 + (X_X + X_{02})^2 \right]}{Z_{02}^2 \left[(R_X + R_{01})^2 + (X_X + X_{01})^2 \right]}, \\ \varphi_1 - \varphi_2 = \operatorname{arctg} \left(\frac{X_{01} R_X - R_{01} X_X}{Z_{01}^2 + R_X R_{01} + X_X X_{01}} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{X_{02} R_X - R_{02} X_X}{Z_{02}^2 + R_X R_{02} + X_X X_{02}} \right), \end{cases}$$

где U_{01}, U_{02} – напряжения на опорном двухполюснике при первом и втором состояниях измерительной схемы; Z_{01}, Z_{02} – модули сопротивления опорного двухполюсника при первом и втором состояниях измерительной схемы; $R_{01}, X_{01}, R_{02}, X_{02}$ – активная и реактивная СКС опорного двухполюсника при первом и втором состояниях измерительной схемы; φ_1, φ_2 – фазовые сдвиги напряжения на опорном двухполюснике относительно напряжения с опорной фазой при первом и втором состояниях измерительной схемы соответственно.

Структурная схема устройства, реализующего данный способ измерения СКС, приведена на рис. 4.

Устройство содержит измерительную схему в виде делителя напряжения, опорная ДЭЦ которого в зависимости от положения аналогового ключа SA может иметь сопротивление Z_{01} и Z_{02} , АЦП напряжения АЦПН, АЦП

фазового сдвига АЦПФ, блок управления и вычислений БУВ, генератор Г. Коды результатов аналого-цифровых преобразований напряжений и фазовых сдвигов при двух состояниях измерительной схемы поступают в блок управления и вычислений БУВ. Значения СКС вычисляются по формулам

$$\begin{cases} X_X = (0,25p^2 - q)^{0,5} - 0,5p, \\ R_X = kX_X + m, \end{cases}$$

где

$$p = \frac{2km + b_1 + kc_1}{1 + k^2}, \quad q = \frac{a_1 + m^2 + c_1m}{1 + k^2}, \quad k = \frac{b_1a_2 - b_2}{c_2 - c_1a_2}, \quad m = \frac{a_1a_2 - d_2}{c_2 - c_1a_2},$$

$$a_1 = \frac{\operatorname{tg}\varphi Z_{01}^2 Z_{02}^2}{\operatorname{tg}\varphi(R_{01}R_{02} + X_{01}X_{02}) + R_{01}X_{02} - R_{02}X_{01}},$$

$$b_1 = \frac{\operatorname{tg}\varphi(Z_{01}^2 R_{02} + R_{01}Z_{02}^2) - Z_{02}^2 X_{01} + Z_{01}^2 X_{02}}{\operatorname{tg}\varphi(R_{01}R_{02} + X_{01}X_{02}) + R_{01}X_{02} - R_{02}X_{01}},$$

$$c_1 = \frac{\operatorname{tg}\varphi(Z_{01}^2 X_{02} + Z_{02}^2 X_{01}) - Z_{02}^2 R_{01} + Z_{01}^2 R_{02}}{\operatorname{tg}\varphi(R_{01}R_{02} + X_{01}X_{02}) + R_{01}X_{02} - R_{02}X_{01}}, \quad a_2 = \frac{U_{01}^2}{U_{02}^2} \frac{Z_{02}^2}{Z_{01}^2} - 1,$$

$$b_2 = 2((a_2 + 1)R_{01} - R_{02}), \quad c_2 = 2((a_2 + 1)X_{01} - X_{02}), \quad d_2 = (a_2 + 1)Z_{01}^2 - Z_{02}^2.$$

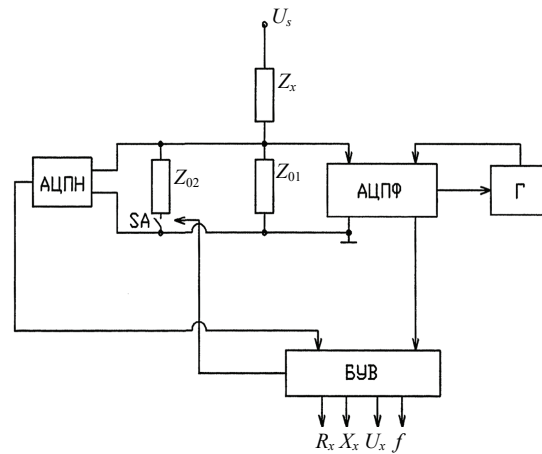


Рис. 4 Структурная схема устройства для измерения СКС ДЭЦ на основе делителя напряжения с измерением напряжения и фазового сдвига

При реализации метода двух значений коэффициентов и одного параметра на основе делителя напряжения с использованием в качестве активного параметра напряжения значения измеряемых СКС определяются как решения системы уравнений

$$\begin{cases} U_{01}^2/U_{02}^2 = Z_{01}^2 \left[(R_X + R_{02})^2 + (X_X + X_{02})^2 \right] / Z_{02}^2 \left[(R_X + R_{01})^2 + (X_X + X_{01})^2 \right], \\ U_{01}^2/U_{03}^2 = Z_{01}^2 \left[(R_X + R_{03})^2 + (X_X + X_{03})^2 \right] / Z_{03}^2 \left[(R_X + R_{01})^2 + (X_X + X_{01})^2 \right], \end{cases}$$

где U_{03} – напряжение на опорном двухполюснике при третьем состоянии измерительной схемы; Z_{03} – модуль сопротивления опорной ДЭЦ при третьем состоянии схемы; R_{03}, X_{03} – активная и реактивная СКС Z_{03} .

Структурная схема устройства, реализующего данный способ измерения СКС ДЭЦ, представлена на рис. 5.

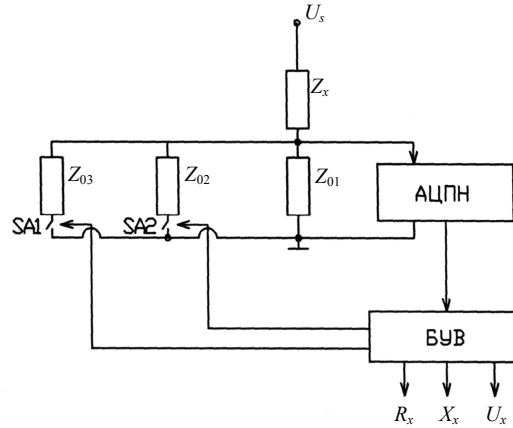


Рис. 5 Структурная схема устройства для измерения СКС ДЭЦ на основе делителя напряжения с измерением напряжения

Устройство состоит из измерительной схемы с тремя опорными ДЭЦ, двух аналоговых ключей SA1 и SA2, АЦП напряжения АЦПН, блока управления и вычислений БУВ. Измерение СКС осуществляется в три такта, отличающихся состояниями ключей. Коды результатов преобразований напряжения на опорной ДЭЦ используются БУВ для вычисления значений СКС по формулам

$$\begin{cases} X_X = (0,25p - q)^{0,5} - 0,5p, \\ R_X = kX_X + m, \end{cases}$$

где

$$p = \frac{2a_1km + b_1 + kc_1}{a_1(1+k^2)}, \quad q = \frac{a_1m^2 + c_1m + d_1}{a_1(1+k^2)}, \quad k = \frac{b_1a_2 - a_1b_2}{a_1c_2 - c_1a_2}, \quad m = \frac{d_1a_2 - a_1d_2}{a_1c_2 - c_1a_2},$$

$$a_1 = \frac{U_{01}^2}{U_{02}^2} \frac{Z_{02}^2}{Z_{01}^2} - 1, \quad b_1 = 2((a_1 + 1)R_{01} - R_{02}), \quad c_1 = 2((a_1 + 1)X_{01} - X_{02}),$$

$$d_1 = (a_1 + 1)Z_{01}^2 - Z_{02}^2, \quad a_2 = \frac{U_{01}^2}{U_{03}^2} \frac{Z_{03}^2}{Z_{01}^2} - 1, \quad b_2 = 2((a_2 + 1)R_{01} - R_{03}),$$

$$c_2 = 2((a_2 + 1)X_{01} - X_{03}), \quad d_2 = (a_2 + 1)Z_{01}^2 - Z_{03}^2.$$

При выборе в качестве параметра фазового сдвига напряжений в средней точке делителя и на выходе генератора Г измерение СКС основано на решении системы уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_1 - \varphi_2 &= \arctg \frac{X_{01}R_X - R_{01}X_X}{R_{01}(R_{01} + R_X) + X_{01}(X_{01} + X_X)} - \\ &- \arctg \frac{X_{02}R_X - R_{02}X_X}{R_{02}(R_{02} + R_X) + X_{02}(X_{02} + X_X)}, \\ \varphi_1 - \varphi_3 &= \arctg \frac{X_{01}R_X - R_{01}X_X}{R_{01}(R_{01} + R_X) + X_{01}(X_{01} + X_X)} - \\ &- \arctg \frac{X_{03}R_X - R_{03}X_X}{R_{03}(R_{03} + R_X) + X_{03}(X_{03} + X_X)}. \end{aligned} \right.$$

Схема устройства, реализующего данный способ измерения СКС, представлена на рис. 6.

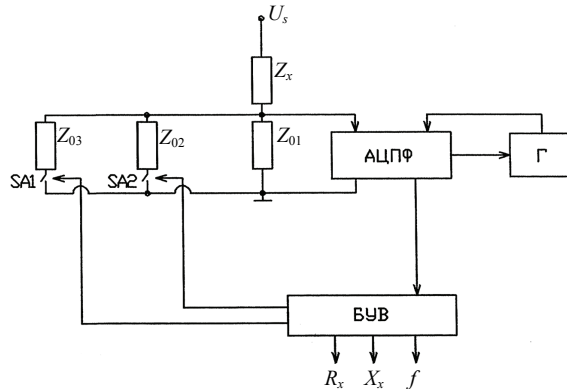


Рис. 6 Структурная схема устройства для измерения СКС ДЭЦ с измерением фазового сдвига

Устройство состоит из измерительной схемы с тремя опорными ДЭЦ, двух аналоговых ключей SA1 и SA2, АЦП фазового сдвига АЦФ, блока управления и вычислений БУВ, генератора Г. Генератор Г генерирует синусоидальное напряжение с частотой напряжения U_s . Измерение СКС Z_X также осуществляется в три такта. На основе результатов аналого-цифровых преобразований фазового сдвига в каждом такте в БУВ вычисляются значения СКС по формулам

$$\left\{ \begin{aligned} R_X &= (0,25p^2 - q)^{0,5} - 0,5p, \\ X_X &= \frac{(c_1a_2 - a_1c_2)R_X + (d_2c_1 - d_1c_2)}{c_2b_1 - b_2c_1}, \end{aligned} \right.$$

где

$$p = \frac{a_1(b_1c_2 - b_2c_1)^2 + b_1(c_1a_2 - a_1c_2)(b_1c_2 - b_2c_1) + 2c_1(c_1a_2 - c_2a_1)(c_1d_2 - c_2d_1)}{c_1((c_1a_2 - c_2a_1)^2 + (c_2b_1 - c_1b_2)^2)},$$

$$q = \frac{d_1(c_2b_1 - c_1b_2)^2 + b_1(c_2b_1 - c_1b_2)(c_1d_2 - d_1c_2) + c_1(c_1d_2 - d_1c_2)^2}{(c_2b_1 - c_1b_2)^2},$$

$$\begin{aligned}a_1 &= \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_2) \left(Z_{01}^2 R_{02} + R_{01} Z_{02}^2 \right) - X_{01} Z_{02}^2 + X_{02} Z_{01}^2, \\b_1 &= \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_2) \left(Z_{01}^2 X_{02} + X_{01} Z_{02}^2 \right) + R_{01} Z_{02}^2 - R_{02} Z_{01}^2, \\c_1 &= \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_2) \left(R_{01} R_{02} + X_{01} X_{02} \right) + X_{01} R_{02} - R_{01} X_{02}, \quad d_1 = \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_2) Z_{01}^2 Z_{02}^2, \\a_2 &= \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_3) \left(Z_{01}^2 R_{03} + R_{01} Z_{03}^2 \right) - X_{01} Z_{03}^2 + X_{03} Z_{01}^2, \\b_2 &= \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_2) \left(Z_{01}^2 X_{03} + X_{01} Z_{03}^2 \right) + R_{01} Z_{03}^2 - R_{03} Z_{01}^2, \\c_2 &= \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_2) \left(R_{01} R_{03} + X_{01} X_{03} \right) + X_{01} R_{03} - R_{01} X_{03}, \quad d_2 = \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_2) Z_{01}^2 Z_{03}^2.\end{aligned}$$

Заключение

Реализация метода фиксированных коэффициентов в средствах измерений СКС дает возможность повысить их метрологические характеристики. Метод одного значения коэффициентов и двух параметров целесообразно применять при высоких требованиях к быстродействию измерительного устройства. Использование измерительной схемы в виде делителя напряжения рекомендуется при высоком (свыше 1 кВ) напряжении питания измерительной схемы. Возможность измерения СКС без опорного делителя позволяет в десятки раз расширить диапазон измерительного напряжения, поскольку в мостовых и параллельных измерительных схемах оно ограничивается допустимым напряжением на элементах опорного делителя. Это открывает широкие перспективы использования устройств для измерения СКС на основе делителя напряжения для контроля состояния высоковольтной изоляции под рабочим напряжением до 100 кВ и более при переходе на обслуживание энергетического оборудования по состоянию.

Список литературы

1. **Карандеев, К. Б.** Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока / К. Б. Карандеев, Г. А. Штамберггер. – Новосибирск : РИО СО АН СССР, 1961. – 224 с.
2. **Кнеллер, В. Ю.** Автоматические измерители комплексных величин с координированным уравниванием / В. Ю. Кнеллер, Ю. Р. Агамалов, А. А. Десова. – М. ; Л. : Энергия, 1975. – 168 с.
3. Раздельное преобразование комплексных сопротивлений / Е. Е. Добров, И. Г. Татарицев, В. Н. Черноус, Г. А. Штамберггер ; под ред. Г. А. Штамберггера. – Львов : Высшая школа, 1985. – 134 с.
4. Патент 2214609 РФ, МПК G 01 R27/02. Способ измерения составляющих комплексного сопротивления двухполюсника и напряжения на нем / А. А. Андрюшаев, В. А. Баранов, Вл. А. Баранов, В. П. Буц, В. Г. Недорезов, А. Н. Шестернин.
5. **Добровинский, И. Р.** Проектирование ИИС для измерения параметров электрических цепей / И. Р. Добровинский, Е. А. Ломтев. – М. : Энергоатомиздат, 1997. – 122 с.
6. **Цыпин, Б. В.** Измерение импедансов системами с ЭВМ / Б. В. Цыпин. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2001. – 100 с.