МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОХОДНЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ АЭС

Е.М. Васильева, С.А. Винниченко, Ю.И. Неварикаша
ННЦ «Институт метрологии», 61002, г. Харьков, ул. Мироносицкая, 42,
тел. (057) 704-97-07, факс (057) 700-34-47, e-mail: nil50@metrology.kharkov.ua

The methodology of frequency properties evaluation of the coaxial cable with small length by the measurement of its wave resistance is proposed. The estimation of measurement uncertainty based on the analysis of the errors sources is represented for the pulse method of measurements.

Введение

Аппаратура систем управления технологическими процессами атомных электростанций должна обеспечивать возможность контроля ее параметров в процессе производства и эксплуатации при помощи встроенных и внешних средств контроля (измерений). Встроенные средства контроля являются составной частью аппаратуры, выполняющей функции измерения, преобразования, передачи и обработки данных, регистрации и отображения контрольной информации оперативному персоналу, а также выполняющей функции непосредственного цифрового управления исполнительными органами. Эти средства контроля обеспечивают также выдачу контролируемых сигналов на внешние средства контроля. Использование систем видеонаблюдения в управлении и контроле технологических процессов, увеличение объемов и скоростей передаваемой информации предполагает работу в диапазоне частот не менее 10 МГц и вызывает необходимость нормирования радиочастотных характеристик кабелей связи (гермопроходок) атомных станций.

В общем случае такой кабель состоит из нескольких коаксиальных каналов (стержней) и общего проводника связи. Пространственное положение коаксиальных каналов обеспечивает металлический корпус. Стержень модуля состоит из центрального проводника с нанесенной на него изоляцией и корпусов, для обеспечения возможности изгиба конструкции участок между корпусами и часть центрального проводника в изоляции с внешней стороны покрыты плетенкой. Сборка модуля выполняется методом радиального обжатия. При такой конструкции модуля достаточно сложно выдержать с высокой степенью точности соотношение диаметров коаксиальных каналов по всей длине модуля и актуальным становится контроль его радиочастотных характеристик в процессе изготовления. Критерием приемки модулей является значение его волнового сопротивления. Выбор именно этого параметра, а не общепринятого в таких случаях параметра КСВН, обусловлен относительно небольшой длиной кабеля (менее 3 м), ростом потерь в диэлектрике изоляции кабеля с частотой и требованиями к длине выводов коаксиальной пары.

Целью статьи является анализ возможных методов измерения волнового сопротивления коаксиальных каналов и оценка величины погрешности и неопределенности выбранного метода измерений.

Выбор метода измерения волнового сопротивления кабеля

В промышленности существуют стандартизованные методы, применяемые для определения волнового сопротивления коаксиальных радиочастотных кабелей [1-3]:

– определение волнового сопротивления по геометрическим размерам:

$$Z_в = \frac{138 \cdot \log\left(\frac{D}{d}\right)}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (1)$$

где $Z_в$ – волновое сопротивление коаксиального кабеля, Ом;

D – диаметр (внутренний) экрана, мм;

d – диаметр внутреннего проводника, мм;

ε – диэлектрическая проницаемость среды.

– определение волнового сопротивления путем измерения емкости на холостом ходе и индуктивности при коротком замыкании на конце коаксиального кабеля:

$$Z_в = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (2)$$

где $Z_в$ – волновое сопротивление коаксиального кабеля, Ом;

L – индуктивность при коротком замыкании, мкГн;

C – емкость на холостом ходе, мкФ.

– определение волнового сопротивления путем измерения напряжения и тока на холостом ходе и при коротком замыкании на конце коаксиального кабеля:

$$Z_в = \sqrt{\frac{U_{хх} \cdot U_{кз}}{I_{хх} \cdot I_{кз}}}, \quad (3)$$

где $Z_в$ – волновое сопротивление коаксиального кабеля, Ом;

$U_{хх}$ – напряжение на холостом ходу;

$U_{кз}$ – напряжение при коротком замыкании;

$I_{хх}$ – ток на холостом ходу;

$I_{кз}$ – ток при коротком замыкании.

– определение волнового сопротивления путем измерения емкости и коэффициента укорочения длины волны в коаксиальном кабеле:

$$Z_в = \frac{3333 \cdot є}{C}, \quad (4)$$

где $Z_в$ – волновое сопротивление коаксиального кабеля, Ом;

є – коэффициент укорочения длины волны в коаксиальном кабеле;

C – емкость кабеля, пФ/м.

– определение волнового сопротивления импульсным методом:

$$Z_в = R_н, \quad (5)$$

где $Z_в$ – волновое сопротивление коаксиального кабеля, Ом;

$R_н$ – сопротивление нагрузки, Ом.

Основное требование при выборе метода измерений состоит в его повторяемости и возможности использования в технологическом процессе изготовления коаксиального кабеля без нарушения его конструкции. Измерения волнового сопротивления коаксиального кабеля по геометрическим размерам не учитывает разброс параметров соотношения диаметров кабеля за счет допусков при изготовлении и является, по сути, расчетным методом. Измерения емкости на холостом ходу и индуктивности при коротком замыкании на конце коаксиального кабеля

проводят на строительных длинах кабеля и невозможны при длинах кабеля менее 5 м[1-3]. Аналогичные ограничения имеет метод определения волнового сопротивления путем измерения напряжения и тока на холостом ходу и при коротком замыкании на конце коаксиального кабеля. Метод измерения емкости и коэффициента укорочения длины волны в коаксиальном кабеле проводится на достаточно высоких частотах (при длине кабеля 2,5 м это не менее 30 МГц) и требует минимизации выводов коаксиальной пары.

В результате анализа выбран импульсный метод, описанный в [1] и [2]. Измерение значений волнового сопротивления коаксиального кабеля проводилось при помощи измерителя импульсов, содержащего генератор зондирующих импульсов, осциллограф, развязывающее устройство с балансным контуром и нагрузочный контур на измеряемый коаксиальный кабель. Ширина спектра зондирующего сигнала (диапазон частот измерений) определяется длительностью импульса $\Delta F = 1/\tau_{имп.}$ Для определения волнового сопротивления кабеля в диапазоне частот до 10 МГц длительность зондирующего импульса не превышает 100 нс, при этом частота следования не имеет определяющего значения и может составлять единицы килогерц. Схема подключения измеряемого коаксиального кабеля приведена на рис. 1.

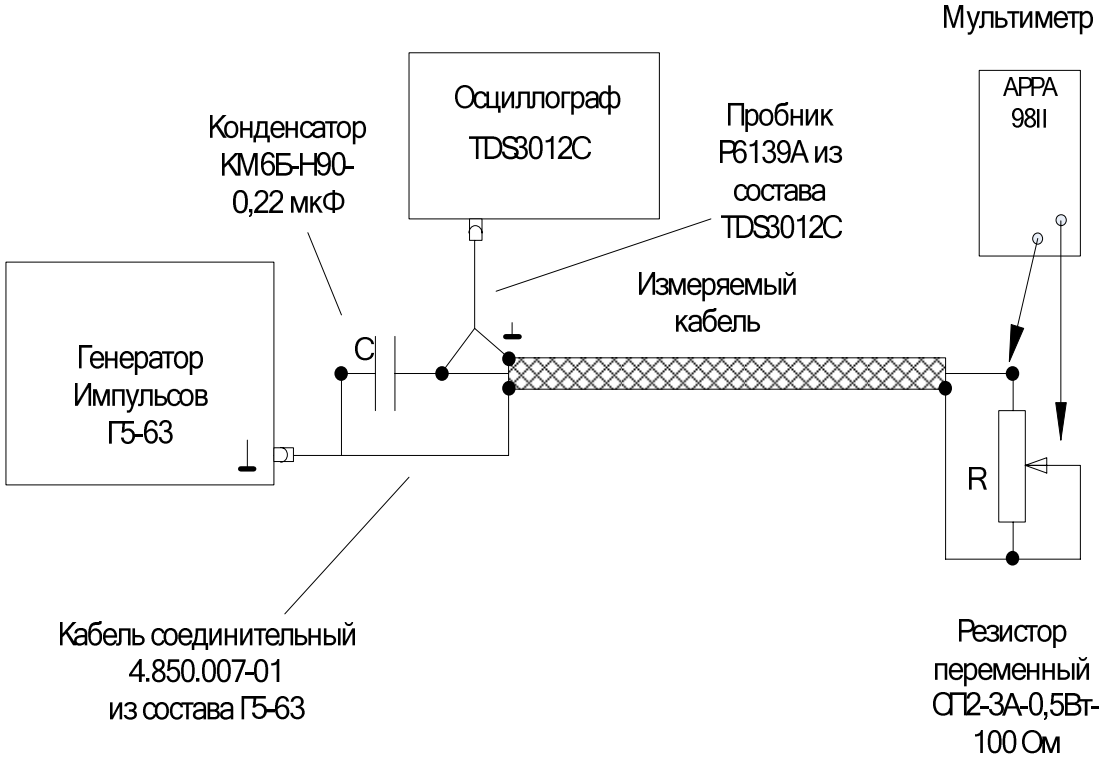

Рисунок 1. Схема измерения волнового сопротивления

Импульс компенсируют до предельно возможных минимальных искажений путем изменения величины нагрузочного резистора. После этого резистор отсоединяют и измеряют его сопротивление с помощью мультиметра. Полученное значение будет равно искомому волновому сопротивлению измеряемой коаксиальной пары. Правильность показаний и форма амплитудно-временной характеристики предварительно проверяются по образцовой коаксиальной паре.

В качестве примера на рис. 2 – 4 приведены формы импульсов при рассогласованной и согласованной нагрузках для кабеля с волновым сопротивлением 80 Ом.

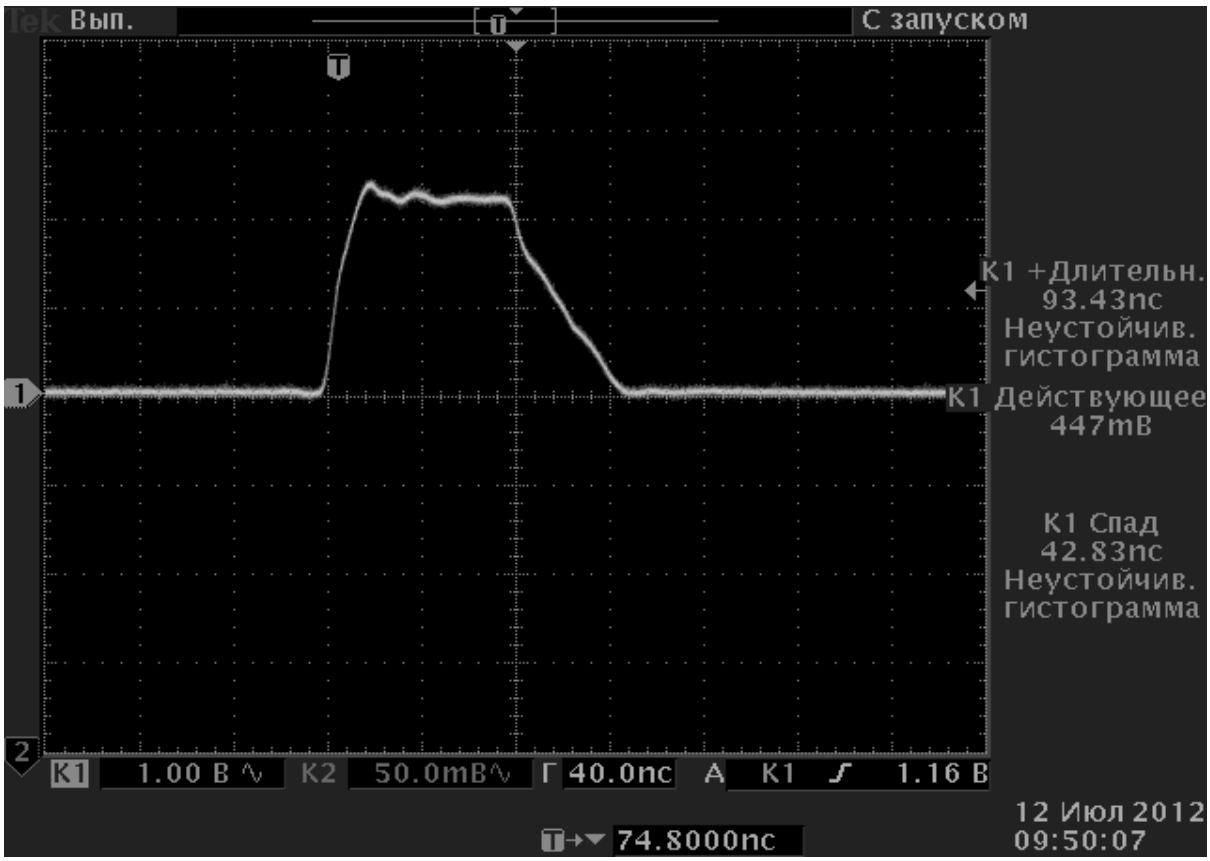

Рисунок 2. Форма импульса при согласованной нагрузке R= 80,4 Ом.

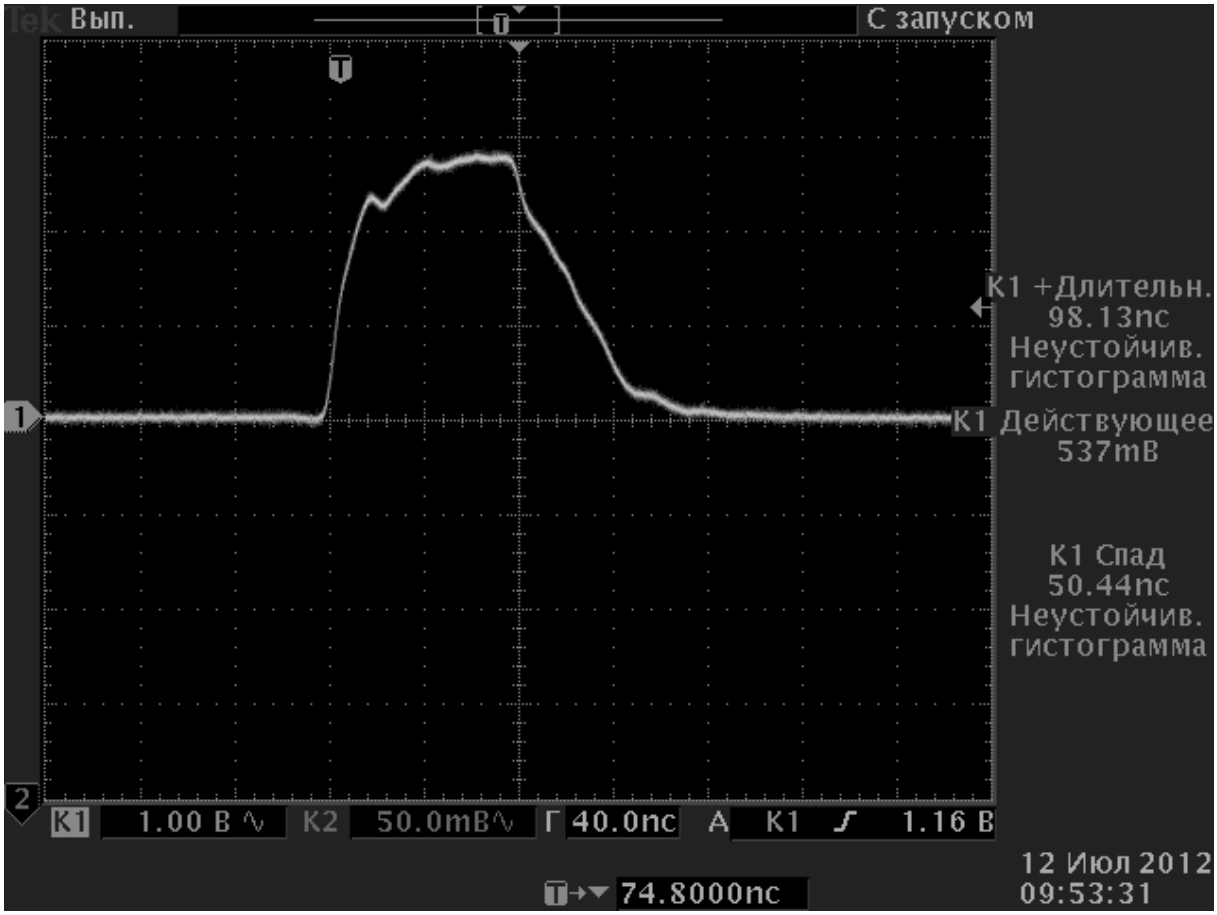

Рисунок 3. Форма импульса при рассогласованной нагрузке R= 136 Ом.

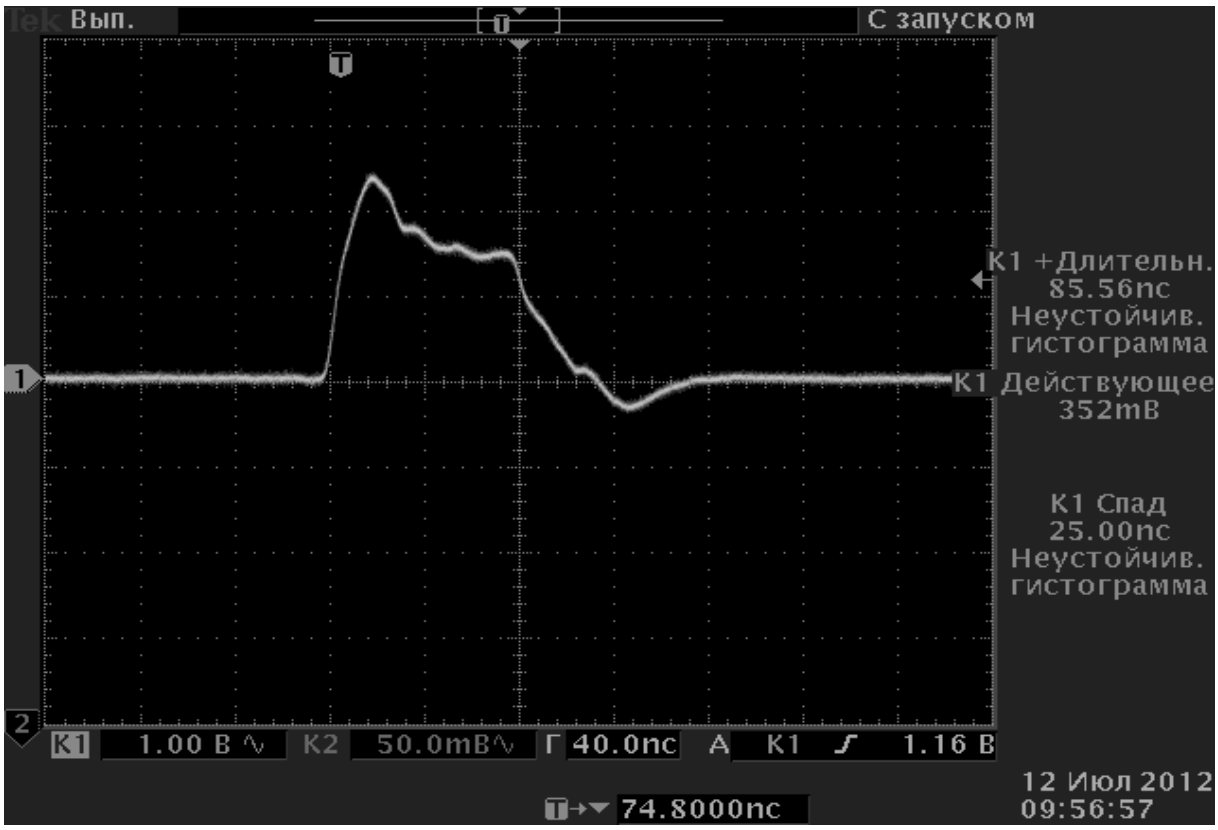

Рисунок 4. Форма импульса при рассогласованной нагрузке R= 42,5 Ом.

Обработка результатов измерений

При расчете погрешности используется следующее уравнение измерений:

$$Z_в = f(R) = R\,, \tag{6}$$

где $Z_в$ – волновое сопротивление коаксиального кабеля;

R – сопротивление переменного резистора.

В результате трех измерений значения сопротивления переменного резистора вычисляем среднее арифметическое значение сопротивления $R_{ńđ}$ и принимаем

$$Z_в = R_{cp}\,. \tag{7}$$

Анализ источников погрешности результата измерений

Среднее квадратическое отклонение (СКО), характеризующее случайную составляющую погрешности при измерениях сопротивления $S(R_{cp})$ возможно вычислить по формуле:

$$S(R_{cp}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_i - R_{cp})^2}{n(n-1)}}\,, \tag{8}$$

где R_i – i-й результат измерения;

R_{cp} – результат измерения (среднее арифметическое результатов измерений);

n – число результатов измерений.

Относительное $S_o(R_{cp}) = \frac{S(R_{cp})}{R_{cp}} \cdot 100$.

Для кабеля с волновым сопротивлением 75 Ом границы неисключенной систематической погрешности мультиметра в Ом определены при его калибровке в виде следующего выражения:

$$\Theta_R = 0{,}007 \cdot R + 0{,}3 = 0{,}82 \text{ Ом}. \quad (9)$$

Относительное значение $\Theta_{oR} = 100 = 1{,}1\,\%$.

Границы неисключенной систематической погрешности осциллографа определены исходя из разрешения экрана при максимальном значении напряжения 400 мВ и половине минимальной шкалы 5 мВ:

$$\Theta_V = 5 \text{ мВ}. \quad (10)$$

Относительное значение $\Theta_{oV} = 1{,}25\,\%$.

Вычисление характеристик погрешности результата измерений

В предположении о равномерном распределении неисключенных систематических составляющих погрешности результата измерения внутри их границ Θ_R и Θ_V границы относительной неисключенной систематической погрешности Θ_o вычисляем по формуле:

$$\Theta_o = k\sqrt{\sum_{i=1}^{m} \Theta_{oi}^2} = 1{,}83\,\%, \quad (11)$$

где Θ_{oi} – граница i-й относительной неисключенной систематической погрешности;

k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью.

Коэффициент k принимаем равным 1,1 при доверительной вероятности $P = 0{,}95$.

Предположим, что в результате трех измерений значения сопротивления переменного резистора имеют следующие величины: $R_1 = 74{,}8$ Ом; $R_2 = 74{,}7$ Ом; $R_3 = 74{,}8$ Ом. Тогда относительное среднее квадратическое отклонение (СКО), характеризующее случайную составляющую погрешности составит $S_o(R_{cp}) = \frac{S(R_{cp})}{R_{cp}} \cdot 100 = 0{,}045\,\%$.

Поскольку $\frac{\Theta_o}{S_o(R_{cp})} = 40{,}67 > 0{,}8$ то случайной погрешностью по сравнению с систематической пренебрегаем и принимаем, что граница погрешности результата:

$$\delta_{0,95} = \Theta_o = 1.83\,\%. \quad (12)$$

Оценка неопределенности измерений

В результате десяти измерений значения сопротивления переменного резистора равны: $R_1 = 74{,}7$ Ом; $R_2 = 74{,}7$ Ом; $R_3 = 74{,}8$ Ом; $R_4 = 74{,}7$ Ом; $R_5 = 74{,}7$ Ом; $R_6 = 74{,}7$ Ом; $R_7 = 74{,}8$ Ом; $R_8 = 74{,}7$ Ом; $R_9 = 74{,}7$ Ом; $R_{10} = 74{,}7$ Ом.

Среднее арифметическое значение сопротивления $R_{ср}$ составляет:

$$R_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_i}{n} = 74{,}72 \text{ Ом}, \tag{13}$$

где R_i – i-й результат измерения;

n – число результатов измерений.

Результат измерения волнового сопротивления коаксиального кабеля:

$$Z_в = R_{ср} = 74{,}72 \text{ Ом}. \tag{14}$$

Стандартная неопределенность по типу А

Стандартную неопределенность сопротивления, обусловленную источниками неопределенности, имеющими случайный характер, u_A определяют по формуле:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(R_i - R_{ср}\right)^2}{n(n-1)}} = 1{,}33 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}, \tag{15}$$

где R_i – i-й результат измерения;

$R_{ср}$ – результат измерения (среднее арифметическое результатов измерений);

n – число результатов измерений.

Относительное значение: $u_{oA} = \frac{u_A}{R_{ср}} \cdot 100 = 0{,}018$ %.

Стандартная неопределенность по типу В

По типу В вычисляют стандартные неопределенности, обусловленные источниками неопределенности, имеющими систематический характер. Распределение значений величин внутри границ считают равномерным.

Границы систематического смещения при измерениях сопротивления, определенные при калибровке мультиметра, равны $0{,}007 \cdot R + 0{,}3$. Тогда соответствующую стандартную неопределенность u_{BR} вычисляют по формуле:

$$u_{BR} = \frac{0{,}007 \cdot R + 0{,}3}{\sqrt{3}} = 0{,}475 \text{ Ом}. \tag{16}$$

Относительное значение: $u_{oBR} = \frac{u_{BR}}{R_{ср}} \cdot 100 = 0{,}64$ %.

Границы, внутри которых лежит значение отрицательного выброса зондирующего импульса, определены исходя из разрешения экрана осциллографа при

максимальном значении напряжения 400 мВ и половине минимальной шкалы 5 мВ, то есть $u_{BV} = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2{,}89$ мВ.

Относительное значение $u_{oBV} = \frac{u_{BV}}{400} \cdot 100 = 0{,}72$ %.

Таким образом относительная суммарная стандартная неопределенность по типу В равна:

$$u_{oB} = \sqrt{u_{oBR}^2 + u_{oBV}^2} = 0{,}96\ \%. \qquad (17)$$

Суммарная стандартная неопределенность

Суммарную стандартную неопределенность (относительное значение) вычисляют по формуле:

$$u_{oC} = \sqrt{u_{oA}^2 + u_{oB}^2} = 0{,}96\ \%\ . \qquad (28)$$

Расширенная неопределенность

Расширенную неопределенность при доверительной вероятности 0,95 $P = 0{,}95$ определяют по формуле:

$$U_{0,95} = k \cdot u_{oC} = 1{,}82\ \%\ , \qquad (19)$$

где k – коэффициент охвата, определяемый принятой доверительной вероятностью. Коэффициент k принимаем равным 2 при доверительной вероятности $P = 0{,}95$.

Выводы

В данной статье предложена методика оценки частотных свойств отрезков коаксиального кабеля путем измерения волнового сопротивления импульсным методом. На основе анализа источников погрешности проведена оценка неопределенности измерений.

Список литературы

1. ГОСТ 11326.0-78. Кабели радиочастотные. Общие технические условия.
2. ГОСТ 27893-88. Кабели связи. Методы испытаний.
3. ГОСТ Р 51978-2002. Кабели грузонесущие геофизические бронированные.