

## КАЛИБРОВКА ИМПУЛЬСНЫХ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БИООБЪЕКТОВ

Сапрыка А. В., Сапрыка В. А., Сингатулин Р. С.

*Белгородский государственный технологический университет имени Шухова*

*Для исследования диэлектрической спектроскопии биологических объектов, находящихся под воздействием электромагнитного поля предлагается методика поверки (калибровки) импульсных рефлектометрических систем*

**Постановка проблемы.** Для поверки (калибровки) средств измерений во временной области в настоящее время отсутствует нормативная база и методы поверки и аттестации импульсных рефлектометрических систем.

В связи с этим предлагаем разработку методики поверки импульсных рефлектометрических систем для исследования диэлектрической спектроскопии биобъектов. В процессе работы будем использовать приёмы и методы, которые используются для поверки радиоизмерительных систем с распределенными параметрами в частотной области [1...3].

**Цель статьи.** Разработать калибровку импульсных рефлектометрических систем для исследования биобъекта.

**Основные материалы исследования.** Рассмотрим схему входной цепи рефлектометра для измерения коэффициента отражения. Эквивалентная схема рефлектометра показана на рис. 1. Последовательность операций при определении коэффициента отражения во временной области следующая:

- к плоскости подключения присоединяется короткозамыкатель (КЗ) и регистрируемый сигнал  $U_k(t)$ ;
- подключается согласованная нагрузка и регистрируется сигнал  $U_n(t)$ ;
- подключается исследуемый объект и регистрируется сигнал  $U_0(t)$ ;
- коэффициент отражения определяется по формуле:

$$\Gamma(\omega) = \frac{F[U_0(t) - U_n(t)]}{F[U_k(t) - U_n(t)]} = \frac{S_2(\omega)}{S_1(\omega)}, \quad (1)$$

где  $F$  – обозначает операцию БПФ;  $S_1(\omega)$  – спектр зондирующего сигнала;  $S_2(\omega)$  – спектр сигнала, отраженного объектом.

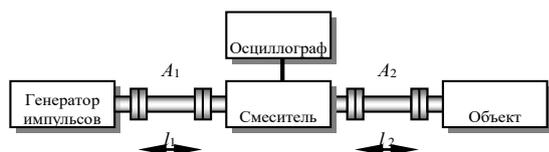


Рисунок 1 – Схема подключения при измерении коэффициента отражения

Покажем, что использование данного метода позволяет в пределах временного окна  $T_c = 2l/C$  исклю-

чить влияние несогласованности генератора и смесителя с волноводным трактом на точность измерений.

В соответствии с временной диаграммой (рис. 2) спектр сигнала  $U_k(\omega)$  в пределах временного окна  $T_0$  можно представить в виде:

$$U_k(\omega) = U_n(\omega) + \Gamma_k(\omega) e^{-j\omega 2l_2/C} + \Gamma_k(\omega) [1 + \Gamma_c(\omega)] \Gamma_z(\omega) e^{-j\omega 2(l_2+l_1)/C}, \quad (2)$$

где  $\Gamma_k(\omega)$ ,  $\Gamma_c(\omega)$  – коэффициенты отражения КЗ смесителя;  $U_n(\omega) = F[U_n(t)]$  – колебание, регистрируемое стробоскопическим преобразователем при поглощении всех волн, распространяющихся в сторону объекта.

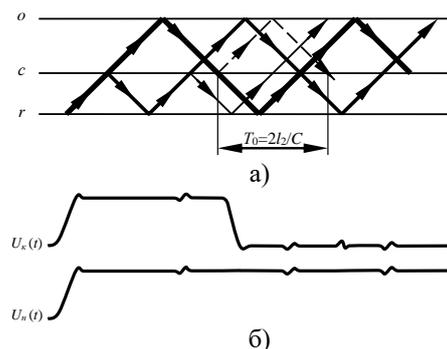


Рисунок 2 – Диаграмма распространения сигналов во входной цепи при измерении

Аналогично спектр  $U_0(\omega)$  можно записать в виде:

$$U_0(\omega) = U_n(\omega) + \Gamma_0(\omega) e^{-j\omega 2l_2/C} + \Gamma_0(\omega) [1 + \Gamma_c(\omega)] \Gamma_z(\omega) e^{-j\omega 2(l_2+l_1)/C}. \quad (3)$$

Подставляя соотношения (2) и (3) в формулу (4), получаем:

$$\Gamma(\omega) = \Gamma_0(\omega) / \Gamma_k(\omega). \quad (4)$$

Таким образом, указанная последовательность операций позволяет полностью исключить в пределах временного окна  $T_0 = 2l_2/C$  влияние несогласованности генератора и смесителя на точность измерений. Длина линии  $l_1$  не имеет принципиального значения.

Заметим, что вместо согласованной нагрузки можно использовать образцовую воздушную линию длиной  $l \geq l_2$ , при этом в пределах временного окна  $T_0$  не будет наблюдаться сигналов, распространяющихся от смесителя в сторону объекта.

Временное окно  $T_0$  определяет нижние границы диапазона измерений (для  $l_2 = 15$  см  $T_0 = 1$  нс) и частотного диапазона (1 ГГц).

Определение погрешности измерения  $\Gamma(\omega)$  осуществляется с использованием меры коэффициента отражения. Использование волновода длиной 15 см позволяет аттестовать нагрузку в диапазоне частот 1...26 ГГц.

Для проверки точности измерения коэффициента достаточно рассогласованной нагрузки на одно значение коэффициента отражения, если выполняется условие линейности стробоскопического преобразователя:  $\delta_U = \Delta U / U \leq \delta_\Gamma$  ( $\Gamma = U / U_j$ ), где  $\delta_U$  – относительная погрешность вследствие нелинейности измерения напряжения;  $\delta_\Gamma$  – требуемая относительная погрешность измерения коэффициента отражения  $\Gamma$  с отраженным сигналом амплитудой  $U$ .

Погрешность определения коэффициента отражения для значений, отличных от значений используемой меры, можно найти, используя результаты работы [4]. Дисперсия оценки модуля и фазы определяется из выражения [4]:

$$\sigma_\Gamma^2(\omega) = \frac{1}{|S_1(\omega)|^2} \sigma_{|S_2|}^2(\omega) + \frac{|S_2(\omega)|^2}{|S_1(\omega)|^4} \sigma_{|S_1|}^2(\omega), \quad (5)$$

$$\sigma_\phi^2(\omega) = \sigma_{\phi_1}^2(\omega) + \sigma_{\phi_2}^2(\omega), \quad (6)$$

где дисперсия определения спектров сигналов  $S_i(\omega)$ , ( $i = 1, 2$ ) может быть оценена из выражений:

$$\sigma_{|S_i|}^2(\omega) = \frac{N\sigma_r^2}{2}, \quad i = 1, 2; \quad (7)$$

$$\sigma_{\phi_i}^2(\omega) = \frac{N\sigma_r^2}{2} \frac{1}{|S_i(\omega)|^2}, \quad i = 1, 2, \quad (8)$$

где  $\sigma_r^2$  – дисперсия шума измерения сигналов  $U_0(t) - U_n(t)$  и  $U_\kappa(t) - U_n(t)$  во временной области;  $N$  – число точек ДПФ.

$$\sigma_r^2 = 2\sigma^2, \quad (9)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия аддитивного шума во временной области.

Если измеряется коэффициент отражения  $\Gamma$ , то:

$$|S_2(\omega)| = |\Gamma| |S_1(\omega)|. \quad (10)$$

Подставляя выражение (7) ... (10) в соотношения (5), (6), получим зависимость дисперсии измерения коэффициента отражения от его величины:

$$\sigma_{|\Gamma|}^2(\omega) = \gamma_\Gamma(\omega) (|\Gamma|^2 + 1); \quad (11)$$

$$\sigma_\phi^2(\omega) = \gamma_\Gamma(\omega) (|\Gamma|^{-2} + 1); \quad (12)$$

$$\text{где} \quad \gamma_\Gamma(\omega) = N\sigma^2 / |S_1(\omega)|^2. \quad (13)$$

Параметр  $\gamma_\Gamma(\omega)$  определяется отношением дисперсии шума в спектральной области квадрату модуля спектра сигнала  $|S_1(\omega)|^2$ , падающего на исследуемый объект, т.е. определяется уровнем шума и спектром зондирующего сигнала. Он может быть определен из выражения (11) для известного значения коэффициента отражения  $|\Gamma| = \Gamma_0$  по модулю:

$$\gamma_\Gamma(\omega) = \sigma_{|\Gamma|}^2(\omega) / (1 + \Gamma_0^2), \quad \text{или по фазе:} \quad (14)$$

$$\gamma_\Gamma(\omega) = \sigma_{\phi_0}^2(\omega) / (1 + \Gamma_0^{-2}). \quad (15)$$

Величины  $\sigma_\Gamma^2(\omega)$  и  $\sigma_{\phi_0}^2(\omega)$  определяются экспериментально с помощью аттестованной меры отражения. Кроме случайной составляющей при измерении коэффициента отражения возникает и систематическая составляющая погрешности, обусловленная несоответствием волнового сопротивления волновода  $L_2$  номинальному значению, несовершенством КЗ и согласованной нагрузки.

При измерениях во временной области волновое сопротивление определяется из выражений:

$$Z = Z_0 (1 + |\Gamma|) / (1 - |\Gamma|), \quad \text{для } Z > Z_0; \quad (16)$$

$$Z = Z_0 (1 - |\Gamma|) / (1 + |\Gamma|), \quad \text{для } Z < Z_0. \quad (17)$$

Если погрешность измерения модуля коэффициента отражения обозначить как  $|\Delta\Gamma|$ , то погрешность  $\Delta Z$  измерения волнового сопротивления определяется на основании выражений (16), (17).

Из формулы (16) следует:

$$Z + \Delta Z = Z_0 \frac{1 + |\Gamma| + |\Delta\Gamma|}{1 - |\Gamma| - |\Delta\Gamma|} = Z_0 \frac{1 + |\Gamma| + \frac{\Delta\Gamma}{1 - |\Gamma|}}{1 - |\Delta\Gamma| / (1 - |\Gamma|)}.$$

Если  $|\Delta\Gamma| \ll 1 - |\Gamma|$ , то используя приближенное равенство  $1 / (1 - x) \approx 1 + x$  ( $x \ll 1$ ), получаем:

$$Z + \Delta Z = Z_0 \left[ \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} + \frac{\Delta\Gamma}{1 - |\Gamma|} + \frac{|\Delta\Gamma|(1 + |\Gamma|)}{(1 - |\Gamma|)(1 - |\Gamma|)} \right]. \quad (18)$$

Расчеты по приближенной формуле (18) дают погрешность не более чем 2%, если  $|\Delta\Gamma| \leq 0,4$  и  $|\Delta\Gamma|/|\Gamma| < 0,1$ . Значение  $\Gamma = 0,4$  обеспечивает диапазон измерения  $Z_0 / 2,33 - 2,33Z_0$ .

Из соотношения (18) следуют выражения для погрешности:

$$\Delta Z = 2|\Delta\Gamma|Z_0 / (1 - |\Gamma|^2),$$

и среднеквадратического значения этой погрешности:

$$\sigma_z = Z_0 \frac{2\sigma_{|\Gamma|}}{(1 - |\Gamma|^2)^2}, \quad (19)$$

где  $\sigma_{|\Gamma|}$  – среднеквадратическая погрешность определения коэффициента отражения, определяемая из соотношения.

Относительная среднеквадратическая погрешность определения волнового сопротивления:

$$\sigma_Z = \frac{\sigma_z}{Z} = \frac{2\sigma_{|\Gamma|}}{1 - |\Gamma|^2}. \quad (20)$$

Коэффициент стоячей волны  $K_{cmU}$  определяется:

$$K_{cmU} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}, \quad (21)$$

поэтому относительная среднеквадратичная погрешность измерения  $K_{cmU}\sigma_K$ , вызванная погрешностью измерения коэффициента отражения  $\Gamma$ , определяется формулой (20):

$$\delta_K = \frac{\sigma_{K_{cmU}}}{K_{cmU}} = \frac{2\sigma_{|\Gamma|}}{1 - |\Gamma|^2}. \quad (22)$$

Эквивалентная схема входной цепи при измерении коэффициента передачи объекта приведена на рис. 3. Комплексный коэффициент передачи определяется в следующей последовательности: линии  $L_1$  и  $L_2$  соединяются и регистрируется сигнал  $U_K(t)$ ; между линиями  $L_1$  и  $L_2$  включается исследуемый объект и регистрируется сигнал  $U_0(t)$ .

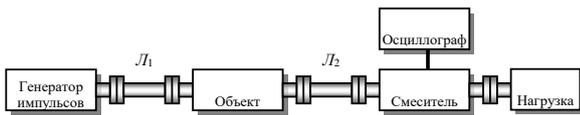


Рисунок 3 – Схема подключения при измерении коэффициента передачи

Коэффициент передачи определяется по следующей формуле:

$$K(\omega) = \frac{F[U_0(t)]}{F[U_K(t)]} = \frac{S_2(\omega)}{S_1(\omega)}. \quad (22)$$

Диаграмма распространения сигналов при измерении коэффициента передачи (рис. 4) показывает, что если длина линии  $L_1$   $l_1 \geq l_2$ , то переотражения от выхода генератора и смесителя стробоскопического преобразователя не войдут во временное окно длительностью  $T_0 = 2l_2 / C$ . Отражения от нагрузки  $H$  входят в сигналы  $U_0(t)$  и  $U_K(t)$  и при вычислении компенсируются. При необходимости переотражения от нагрузки могут быть устранены, если в качестве ее использовать воздушную линию длиной  $l \geq l_2$ .

Таким образом, при измерении коэффициента передачи отсутствуют систематические искажения сигналов  $U_K(t)$  и  $U_0(t)$  вследствие переотражений во входной цепи прибора.

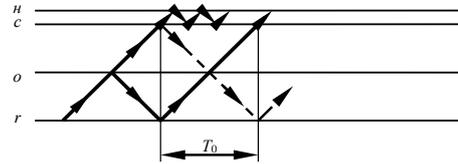


Рисунок 4 – Диаграмма распространения сигналов во входной цепи при измерении коэффициента передачи

Так как коэффициент передачи определяется на основе выражения (22) отношением спектров двух сигналов, то влияние аддитивных шумов и неравномерности спектра зондирующего сигнала на точность измерения определяется по формулам (11), (12), в которые вместо  $\Gamma_0(\omega)$  следует подставлять  $K(\omega)$ .

Среднеквадратическую погрешность измерения коэффициента передачи можно выразить формулами:

$$\sigma_{|K|}(\omega) = 1 / \sqrt{2} \sqrt{\gamma_{\Gamma}(\omega) (|K|^2 + 1)}; \quad (23)$$

$$\sigma_{\phi_K}(\omega) = 1 / \sqrt{2} \sqrt{\gamma_{\Gamma}(\omega) (|K|^{-2} + 1)}. \quad (24)$$

Вносимое ослабление измеряется при помощи схемы входной цепи, показанной на рис. 3.

Последовательность операций измерения вносимого ослабления: линии  $L_1$  и  $L_2$  соединяются друг с другом, и регистрируется зондирующий сигнал  $U_K(t)$ ; между линиями  $L_1$  и  $L_2$  включается исследуемый объект, и регистрируется сигнал  $U_0(t)$ ; вносимое ослабление определяется по формуле:

$$A(\omega) = 20 \lg \frac{F[U_K(t)]}{U_0(t)} = 20 \lg \frac{S_2(\omega)}{S_1(\omega)}. \quad (25)$$

Из формулы (25) следует выражение для погрешности измерения ослабления  $\Delta A$ :

$$\Delta A = 20 \lg(1 + \Delta K(\omega) / K),$$

где  $\Delta K(\omega)$  – погрешность измерения отношения;

$$|S_2(\omega)|/|S_1(\omega)|: K = 10^{-A/20}, \quad (26)$$

где  $A$  – измеряемое значение ослабления.

Если  $\Delta K(\omega)/K \ll 1$ , то используя приближенную формулу  $\lg(1+x) \approx 0,434x$  ( $x \ll 1$ ), получаем  $\Delta A \approx 8,68\Delta K(\omega)/K$ .

При  $\Delta K(\omega)/K \leq 0,1$  относительная погрешность вычисления ослабления не превышает 5%. Из последнего соотношения следует выражение для среднеквадратического значения погрешности измерения ослабления:

$$\sigma_A = 8,68 \frac{\sigma_K}{K}. \quad (27)$$

Дисперсия измерения  $K(\omega)$   $\sigma_K^2(\omega)$  может быть получена по формуле (11), если вместо  $|G|$  подставить значение  $K$  из выражения (26):

$$\sigma_K(\omega) = \sqrt{\gamma_K(\omega)(K^2 + 1)}. \quad (28)$$

Спектр  $S_1(\omega)$  соответствует в данном случае сигналу, прошедшему объект. Поэтому для выражения  $\gamma_K(\omega)$  через  $\gamma_G(\omega)$  следует подставить  $S_1(\omega)$ , выраженное через спектр зондирующего сигнала  $S_2(\omega)$ .

$$S_1(\omega) = S_2(\omega)/K.$$

Использование этого соотношения дает:

$$\gamma_K(\omega) = K^2 \frac{\Delta \sigma^2}{2|Y_2(\omega)|^2} = \frac{K^2}{2} \gamma_G(\omega). \quad (29)$$

Изложенное позволяет сформулировать следующую методику определения погрешности измерения коэффициента передачи, волнового сопротивления,  $K_{cmU}$ , ослабления.

**Выводы.** 1. К входу прибора подключается согласованная нагрузка, аттестированная по геометрическим размерам. 2. Определяется дисперсия измерения модуля коэффициента отражения при подключении рассогласованной нагрузки. 3. По формуле (14) определяется значение  $\gamma_G(\omega)$  на граничных и центральной частотах диапазона измерений. 4. По формулам (12) и (11) определяется дисперсия модуля коэффициента отражения и фазы на центральном и граничных значениях диапазона измерений по коэффициенту отражения. 5. Рассчитывается среднеквадратическое значение погрешностей измерения модуля и фазы коэффициента отражения. 6. По формуле (21) определяется погрешность измерения волнового сопротивления на граничных и центральном значениях

диапазона измерений волнового сопротивления. 7. По формуле (22) определяется погрешность измерения  $K_{cmU}$  на граничных и центральном значениях диапазона. 8. По формулам (23), (24) определяется погрешность измерения модуля и фазы коэффициента передачи на граничных и центральном значениях диапазона измерений модуля коэффициента передачи. Так как метод определения параметров рассеяния  $S_{11}$  и  $S_{22}$  при измерениях во временной области не отличается от метода измерения коэффициента отражения, то погрешность их определения будет соответствовать погрешности определения коэффициента отражения и рассчитываться по формулам (12) и (11). Аналогично – погрешность определения  $S_{21}$  и  $S_{12}$  соответствует погрешности определения коэффициента передачи и рассчитывается по формулам (24) и (25).

#### Список использованных источников

1. Абубакиров Б. А., Львов А. Е. Образцовые меры для калибровки автоматизированных анализаторов цепей. Техника средств связи. Сер. РИТ., – 1982, Вып. 7.
2. Weinschel В. О. Air field coaxial lines as absolute impedance standards. Microwawe Journal. – 1984, № 4.
3. Андриянов А. В., Чепурнов А. В. К вопросу о погрешностях измерения параметров цепей во временной области с использованием преобразования Фурье. Техника средств связи. сер. РИТ. – 1982, Вып. 4.
4. Борохов И. В. Анализ методов и технических систем для дистанционного измерения диэлектрических параметров биологических объектов. / И. В. Борохов, Ю. М. Федюшко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2011. – Вип. 11, Т. 4. С. 351 – 357 с.

#### Анотація

#### КАЛИБРОВКА ІМПУЛЬСНИХ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ БІОБ'ЄКТІВ

Саприка О. В., Саприка В. О., Сінгатулін Р. С.

Для дослідження діелектричної спектроскопії біологічних об'єктів, що знаходяться під впливом електромагнітного поля пропонується методика перевірки імпульсних рефлектометричних систем.

#### Abstract

#### CALIBRATION OF PULSED REFLECTOMETRIC SYSTEMS FOR RESEARCH OF BIOLOGICAL OBJECTS

A. Saprika, V. Saprika, R. Singatulin

The method of verification (calibration) of the pulsed reflectometric systems for dielectric spectroscopy of biological objects under the influence of the electromagnetic field is considered.