

**Разработка прецизионного набора калибровочных мер  
в коаксиальном тракте сечением 7/3,04**

А.В. Великороднов<sup>1,2</sup>, А.С. Боровков<sup>1,2</sup>, А.С. Бондаренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
г. Москва

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и  
радиотехнических измерений  
Московская область, р.п. Менделеево,  
e-mail: artem-velikorodnov@mail.ru

**Development of a precision set of calibration measures  
in the coaxial path with the cross section 7/3,04**

A.V. Velikorodnov<sup>1,2</sup>, A.S. Borovkov<sup>1,2</sup>, A.S. Bondarenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research University of Electronic Technology,  
Moscow, Russia,

<sup>2</sup>Russian metrological institute of technical physics and radio engineering,  
Mendeleevo, Moscow region, Russia,  
e-mail: artem-velikorodnov@mail.ru

**Аннотация:** В статье описана процедура разработки электродинамических моделей коаксиальных калибровочных мер в тракте сечением 7/3,04 с использованием средств автоматизированного проектирования. Эти меры входят в состав калибровочных наборов и применяются при калибровке векторных анализаторов цепей. Представлены результаты измерений фазочастотных характеристик разработанных мер «короткого замыкания» и «холостого хода». Так же представлены результаты измерений комплексного коэффициента отражения нагрузки согласованной. Показана сходимость результатов моделирования и измерений.

**Ключевые слова:** комплексный коэффициент отражения, калибровка, коаксиальный тракт, набор калибровочных мер.

**Abstract:** The article describes the procedure for developing electrodynamic models of coaxial calibration standards in a 7/3.04 cross-section line using computer-aided design tools. These standards are part of calibration kits and are used for calibrating vector network analyzers. The results of phase-frequency characteristic measurements for the developed

'short circuit' and 'open circuit' standards are presented. Additionally, the results of complex reflection coefficient measurements for a matched load are provided. The convergence of simulation and measurement results is demonstrated.

*Keywords:* complex reflection coefficient, calibration, coaxial path, calibration kit.

Наборы коаксиальных калибровочных мер используются при градуировке установок для измерений S-параметров радиотехнических устройств. Они состоят из меры «короткого замыкания», меры «холостого хода» и нагрузки согласованной. Погрешность градуировки измерительной установки обусловлена метрологическими характеристиками используемых калибровочных мер.

На сегодняшний день отечественными предприятиями эксплуатируются калибровочные наборы российского и иностранного производства. При этом иностранные наборы обладают большей точностью. Для уменьшения зависимости от иностранных поставок и обеспечения предприятий наборами отечественного производства требовалось разработать прецизионный комплект калибровочных мер в коаксиальном тракте сечением 7/3,04. С целью уменьшения погрешности при измерении S-параметров радиотехнических устройств разрабатываемые калибровочные меры должны обладать характеристиками сопоставимыми или лучше зарубежных аналогов.

Первым этапом разработки калибровочного набора является проектирование электродинамических моделей мер «короткого замыкания» и «холостого хода». Мера «короткого замыкания» представляет собой коаксиальный тракт, в котором центральный проводник напрямую соединен с корпусом меры. Данная конструкция позволяет получить коэффициент отражения близкий к идеальной величине в плоскости короткозамыкателя, который можно рассчитать по формуле [1]

$$\Gamma = -e^{-2j\beta l}, \quad (1)$$

где:  $j$  – постоянная распространения электромагнитной волны,  
 $l$  – длина центрального проводника меры.

Мера «холостого хода» представляет собой корпус внутри которого центральный проводник, соединенный с диэлектриком. Данная конструкция позволяет сдвинуть плоскость отсчета фазы относительно

меры «короткого замыкания». Коэффициент отражения меры «холостого хода» рассчитывается по формуле (2)

$$= e^{-2j\Gamma} \quad (2)$$

Смещение фазы относительно «короткого замыкания» на величину  $\Delta\varphi$  необходимо для корректной градуировки измерительной установки. В идеальном случае смещение должно обеспечивать  $\Delta\varphi = 180^\circ$  [2].

На рисунке 1 представлены виды спроектированных электродинамических моделей мер «короткого замыкания» и «холостого хода» в разрезе.

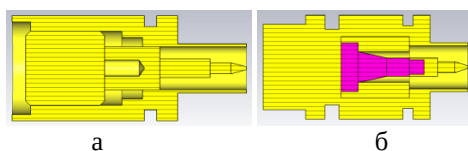


Рис. 1. Вид электродинамических моделей мер (в разрезе):  
а) мера короткого замыкания, б) мера холостого хода

После разработки электродинамических моделей была проведена симуляция и получены результаты  $\Delta\varphi$ , представленные на рисунке 2. По ним видно, что  $\Delta\varphi = 180 \pm 3^\circ$ .

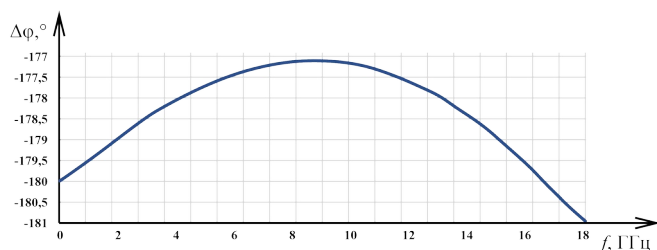


Рис. 2. Зависимость  $\Delta\varphi$  от частоты

Следующим этапом была разработка конструкторской документации по имеющимся моделям и изготовление опытных образцов. На рисунке 3 представлен внешний вид данных образцов.

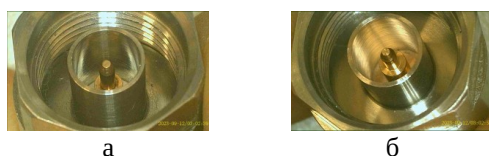


Рис. 3. Внешний вид опытного образца изготовленной меры: а) меры холостого хода, б) меры короткого замыкания

После изготовления был проведен ряд измерений и получены результаты, показанные на рисунке 4. По рисунку видно, что результаты измерения  $\Delta\varphi$  опытных образцов близки к результатам моделирования.

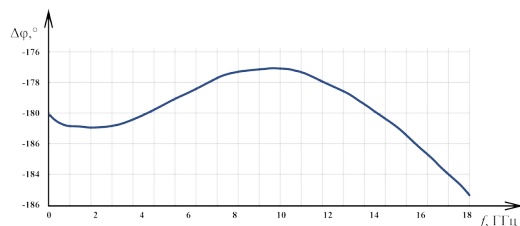


Рис. 4. Зависимость  $\Delta\varphi$  от частоты по результатам измерений

Важной частью набора калибровочных мер является мера согласованной нагрузки. Данная мера состоит из коаксиального тракта, нагруженного на резистивный элемент, чаще всего представляющий собой тонкопленочный резистор. На рисунке 5 представлен вид разработанной электродинамической модели меры согласованной нагрузки в разрезе, а также составляющие её части.

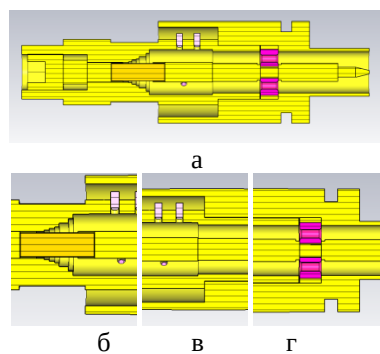


Рис. 5. а) вид электродинамической модели меры, б) коаксиальный тракт с резистором, в) тракт с увеличением диаметра центрального проводника, г) тракт с шайбой из диэлектрика

Тонкопленочный резистор поглощает мощность электромагнитной волны без ее отражения. Так как активное сопротивление резистора уменьшается к концу меры, была разработана конструкция, состоящая

из ступеней для компенсации реактивного сопротивления резистора [3]. Утолщение центрального проводника, показанное на рисунке 5б необходимо для установки резистора, который имеет диаметр, превышающий указанный в ГОСТ 13317-89 3,04 мм. Для компенсации скачка волнового сопротивления был так же увеличен диаметр внешнего проводника в области увеличения диаметра внутреннего. Диэлектрическая шайба в данном случае удерживает центральный проводник в фиксированном положении, обеспечивая его механическую прочность и стабильность соединителя данной меры во время проведения измерений. На рисунке 6 представлены результаты моделирования данной меры в виде частотной зависимости модуля комплексного коэффициента отражения меры  $|S_{11}|$ .

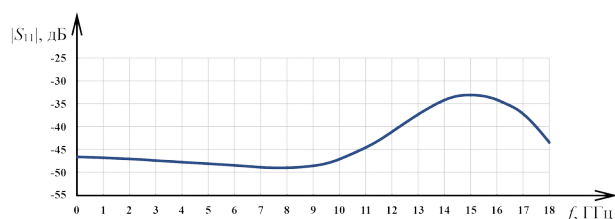


Рис. 6. Зависимость модуля комплексного коэффициента отражения меры согласованной нагрузки от частоты.

Итогом данной работы являются разработанные электродинамические модели коаксиальных калибровочных мер. Приведены результаты симуляции моделей мер и для сравнения представлены результаты измерений опытных образцов мер «короткого замыкания» и «холостого хода». Полученные значения комплексного коэффициента отражения модели согласованной нагрузки сравнимы с существующими аналогами. Сходимость данных результатов подтверждает техническую реализуемость разрабатываемого комплекта калибровочных мер.

#### Библиографический список

1. Ефимов И.Е., Останькович Г.А. Радиочастотные линии передачи. Радиочастотные кабели. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Связь», 1977. 408 с.
2. Дансмор Д.П. Мир радиоэлектроники // Техносфера – С. 173–179.

3. Абубакиров Б.А., Когтева Л.В., Львов А.Е., Панков С.В., Шишков Г.И. Коаксиальные нагрузки в радиоизмерительной технике // Радиотехника, системы телекоммуникаций, антенны и устройства СВЧ, 2015. – С. 11-21.