

УДК 537.8.029

ДИСТАНЦИОННАЯ КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЯ КОМПЛЕКСНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАЧИ И ОТРАЖЕНИЯ VNA 25-37

Асп. ТОЛОЧКО Т. К., кандидаты техн. наук, доценты ГУСИНСКИЙ А. В., КОСТРИКИН А. М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Назначение калибровочных лабораторий – передача размеров единиц физических величин (ФВ) через калибровку потребителям. Для того чтобы соответствовать требованиям стандарта СТБ ИСО/МЭК 17025, методы передачи размеров единиц ФВ должны непрерывно совершенствоваться [1]. Одним из путей совершенствования является калибровка средств измерений (СИ) с использованием компьютерных сетей, которая находит все большее распространение благодаря малым срокам реализации таких услуг и снижению их стоимости. В статье рассмотрен пример реализации данного подхода – дистанционная калибровка измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения VNA 25-37.

Измеритель изготовлен научно-исследовательской лабораторией аппаратуры и устройств СВЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, которая специализируется на разработке автоматизированных средств измерений для качественной настройки и производства устройств миллиметрового диапазона длин волн, а также решает проблемы их метрологического обеспечения [2–5]. Отличительной особенностью приборов лаборатории является возможность проведения их дистанционной калибровки путем реализации технологии «клиент – сервер».

Порядок работы с системой, реализующей технологию «клиент – сервер». Технология «клиент – сервер» использует TCP/IP протокол и состоит из двух частей: серверной части программного обеспечения (ПО), устанавливаемого на персональном компьютере (ПК), входящем в состав измерителя, а также клиентской части ПО, устанавливаемого на ПК метрологической службы (МС).

Связь и взаимодействие ПК измерителя и ПК МС может осуществляться по локальной

сети, сети Internet, а также по другим сетям, физически реализующим компьютерную сеть, поддерживающую протокол TCP/IP.

Порядок работы с системой, реализующей технологию «клиент–сервер», заключается в следующем. При установке ПО на ПК, входящий в состав измерителя, указывается тип установки *Custom*, а при выборе компонентов – *Server*. При установке ПО на ПК МС указывается тип установки – *Custom* и выбор компонентов – *Client*. После установки в папке «Программы» главного меню «Пуск» появляется папка *BSUIR & MWM lab*, а в ней – ярлык *VNA Server* для серверной части ПО и ярлык *VNA Client* – для клиентской части ПО.

После запуска программы сервера *VNA Server* на ПК измерителя появляются окно и ярлык в правом нижнем углу окна, сигнализирующий о состоянии сервера и позволяющий управлять им через контекстное меню. На рис. 1 приведен внешний вид окна сервера.

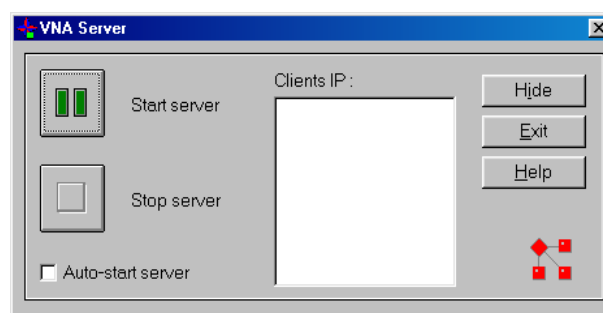


Рис. 1. Внешний вид окна сервера

В окне сервера находятся следующие управляющие элементы:

- кнопка *Start server* – приведение сервера в режим ожидания;
- кнопка *Stop server* – остановка сервера;
- флажок *Auto-start server* – возможность старта сервера автоматически при запуске программы;

- кнопка *Hide* – скрытие окна программы, с возможностью восстановления через ярлык в правом нижнем углу;

- кнопка *Exit* – выход из программы с автоматической остановкой сервера;

- кнопка *Help* – вызов справки.

В окне сервера также располагаются информационные элемент, в том числе список *Clients IP* – информация об адресах подключившихся пользователей.

Для организации работы механизма «клиент – сервер» VNA со стороны сервера на ПК измерителя необходимо запустить программу *VNA Server* – нажать кнопку *Start server*.

После запуска программы *VNA Client* на ПК МС появляется окно (рис. 2).

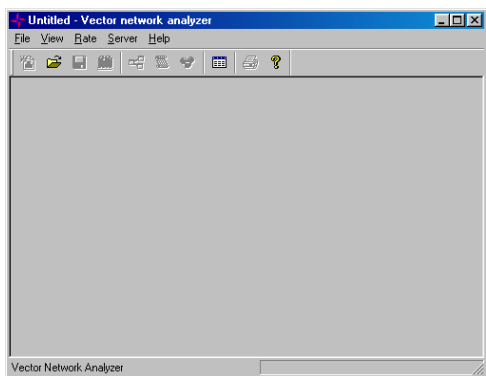


Рис. 2. Внешний вид окна управления измерителем комплексных коэффициентов передачи и отражения VNA 25-37

В этом окне расположено меню *Server*, внешний вид которого приведен на рис. 3.

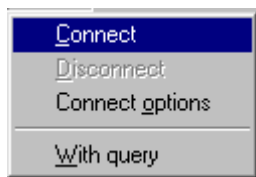


Рис. 3. Внешний вид меню *Server*

Меню *Server* служит для выбора параметров настройки соединения на ПК измерителя и содержит следующие пункты:

- *Connect* – установка соединения с сервером;
- *Disconnect* – разрыв соединения с сервером;
- *Connect options* – настройка параметров соединения.

При выборе этого пункта появляется окно, при помощи которого можно задать режим поиска сервера:

- по IP адресу – кнопка *IP address*;
- по имени – кнопка *Name* и организовать список наиболее используемых адресов и имен

(рис. 4).

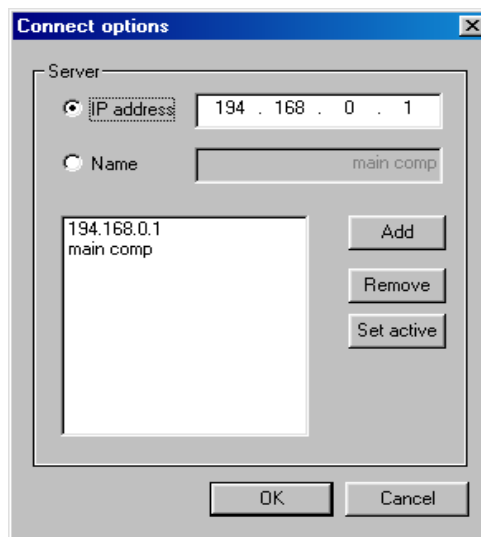


Рис. 4. Внешний вид окна режима поиска сервера

При установке флажка *With query* при измерениях на сервере появляются запросы с картинками, аналогичными тем, которые возникают на ПК МС.

Для организации работы механизма «клиент – сервер» VNA со стороны клиента необходимо:

- запустить программу *VNA Client*;
- выбрать в меню *Server* пункт *Connect options* и в появляющемся окне ввести или IP адрес сервера, например 194.168.0.1, или имя сервера (только для локальных сетей), например «*main comp*»;
- выбрать в меню *Server* пункт *Connect*.

Признаками установления соединения служат:

- на сервере в списке *Clients IP* появляется адрес клиента;
- на дисплее ПК МС становятся доступными кнопки *Setup*, *Calibration*, *Measurement* и внизу окна в строке состояния появляется надпись вида *Server IP: xxxxx*, где xxxxx – имя или адрес сервера.

После этого система «клиент – сервер» VNA готова к проведению измерений.

Организация дистанционной калибровки. Дистанционная калибровка устраняет необходимость периодически посылать СИ в метрологическую службу для проведения калибровки. Вместо этого МС посылает потребителю эталонные меры и с помощью специализированного ПО, позволяющего сотруднику МС управлять СИ, проводит дистанционные измерения через компьютерные сети.

Для проведения дистанционной калибровки используются три основных компонента: СИ, ПО, эталонные меры (ЭМ).

Рассматриваемый измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения VNA 25-37 предназначен для автоматизированного измерения S-параметров волноводных устройств, имеющих волноводный канал сечением 7,2×3,4 мм в диапазоне частот 25,86–37,5 ГГц с цифровым отсчетом измеряемых величин и воспроизведением их частотных характеристик на экране ПК, входящего в состав измерителя. Внешний вид измерителя приведен на рис. 5.

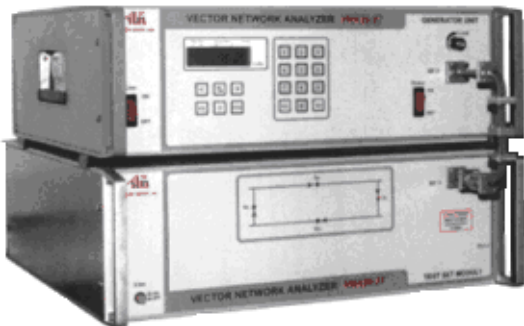


Рис. 5. Внешний вид измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения VNA 25-37

ПО, используемое в измерителе, и компьютерные сети позволяют МС управлять измерителем, выбирать режим работы, форму отображения и документирования результатов измерений.

При проведении дистанционной калибровки измерителя VNA 25-37 в качестве мер модулей коэффициентов отражения и КСВН использовались волноводные нагрузки Э9-129, а в качестве мер коэффициентов передачи – аттенюатор поляризационный ДЗ-36А. Меры фазового сдвига НМФС-1 разработаны лабораторией и аттестованы в Белорусском государственном институте метрологии. Они представляют со-

бой отрезки волноводов с фиксированной разностью длин, обеспечивающей разность фазовых набегов 90° и 180° на средней частоте диапазона. В диапазоне частот $f = (25,86–37,5)$ ГГц применялись меры длиной $5,00 \pm 0,01$ мм и $6,60 \pm 0,01$ мм (для воспроизведения фазового набега 90°) и меры длиной $5,00 \pm 0,01$ мм и $8,23 \pm 0,01$ мм (для воспроизведения фазового набега 180°) [6].

Зависимости воспроизводимых фазовых сдвигов приведены на рис. 6.

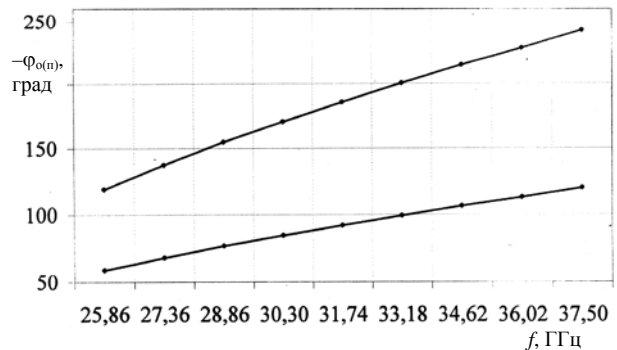


Рис. 6. График зависимости $\varphi_{0(n)}$ от частоты в диапазоне 25,86–37,5 ГГц

Результаты, полученные при дистанционной калибровке. При оформлении результатов калибровки метрологической службой составляется протокол, который содержит информацию о калибруемом СИ, эталонных СИ, условиях проведения калибровки, результаты наблюдений, расчет неопределенности результатов измерений.

Так как при калибровке в соответствии с требованиями [7] рассчитываются неопределенности результатов измерений, приведем алгоритмы и результаты отдельных расчетов для измерителя VNA 25-37.

Расчет неопределенности измерения КСВН. Математическая модель измерения при определении неопределенности измерения КСВН имеет следующий вид:

$$K_{CTU} = K_{CTUи} + \Delta_{\text{эт}} + \Delta_{\text{кв}} + \Delta_{\text{рас}}, \quad (1)$$

где K_{CTU} – действительное значение КСВН; $K_{CTUи}$ – показание калибруемого измерителя VNA 25-37; $\Delta_{\text{эт}}$ – неопределенность, обусловленная неидеальностью меры КСВН; $\Delta_{\text{кв}}$ – неопределенность из-за конечного разрешения калибруемого измерителя VNA 25-37; $\Delta_{\text{рас}}$ –

неопределенность, обусловленная рассогласованием в измерительном тракте.

Анализ входных величин представлен в табл. 1. Результаты экспериментальных исследований

приведены на рис. 7, 8. На рисунках штриховыми линиями показаны границы, в рамках которых находятся неопределенности результатов измерений.

Таблица 1

Входная величина	
$K_{CTUи}$	Тип неопределенности A Вид распределения Нормальное Оценка величины $\bar{K}_{CTUи} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{CTUиi}$, где $K_{CTUиi}$ – результат i -го наблюдения; n – количество наблюдений Стандартная неопределенность $u(\bar{K}_{CTUи}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (K_{CTUиi} - \bar{K}_{CTUи})^2}$
$\Delta_{эТ}$	Тип неопределенности B Вид распределения Прямоугольное Оценка величины 0 Интервал, в котором находится значение входной величины: $\pm a_1$, из руководства по эксплуатации (РЭ) мер КСВН Стандартная неопределенность $u(\Delta_{эТ}) = \frac{a_1}{\sqrt{3}}$
$\Delta_{кв}$	Тип неопределенности B Вид распределения Прямоугольное Оценка величины 0 Интервал, в котором находится значение входной величины: $\pm a_2$, где a_2 – 1/2 единицы младшего разряда калибруемого измерителя Стандартная неопределенность $u(\Delta_{кв}) = \frac{a_2}{\sqrt{3}}$
$\Delta_{рас}$	Тип неопределенности B Вид распределения Арксинусоидальное Оценка величины 0 Интервал, в котором находится значение входной величины: $\pm a_3$, из ГОСТ 20271.1–91 Стандартная неопределенность $u(\Delta_{рас}) = \frac{a_3}{\sqrt{2}}$

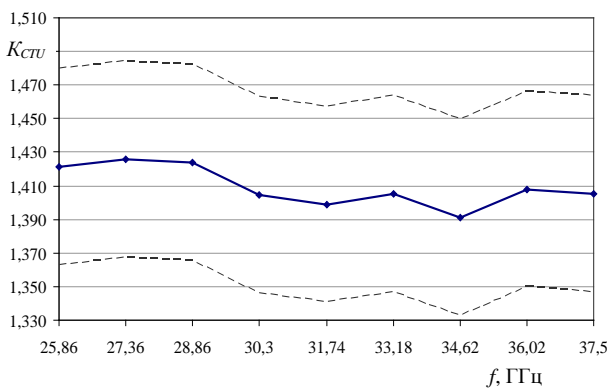


Рис. 7. График зависимости $K_{CTU} \pm U_{K_{CTU}}$ ($k = 1,41$; $p = 95\%$) от частоты в диапазоне 25,86–37,5 ГГц, эталонная мера с $K_{CTU} = 1,4$

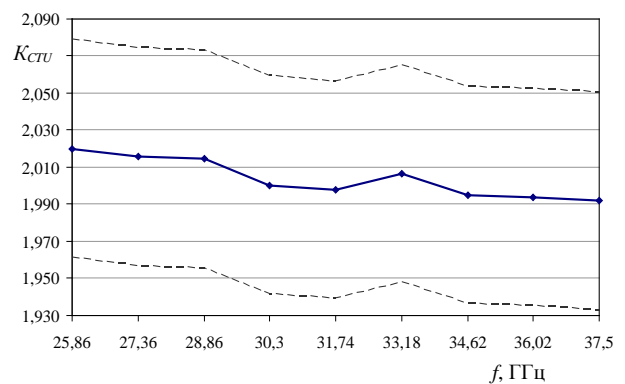


Рис. 8. График зависимости $K_{CTU} \pm U_{K_{CTU}}$ ($k = 1,41$; $p = 95\%$) от частоты в диапазоне 25,86–37,5 ГГц, эталонная мера с $K_{CTU} = 2,0$

Расчет неопределенности измерения ослабления. Математическая модель измерения при определении неопределенности измерения ослабления имеет следующий вид:

$$A = A_{и} + \Delta_{эт} + \Delta_{кв} + \Delta_{рас}, \text{ дБ}, \quad (2)$$

где A – действительное значение ослабления, дБ; $A_{и}$ – показание калибруемого измерителя VNA 25-37, дБ; $\Delta_{эт}$ – неопределенность, обусловленная неидеальностью эталонного атте-

нуатора, дБ; $\Delta_{кв}$ – неопределенность из-за конечного разрешения калибруемого измерителя VNA 25-37, дБ; $\Delta_{рас}$ – неопределенность, обусловленная рассогласованием в измерительном тракте, дБ.

Анализ входных величин представлен в табл. 2.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 9, 10.

Таблица 2

Входная величина	
$A_{и}$	Тип неопределенности A Вид распределения Нормальное Оценка величины $\bar{A}_{и} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{иi}$, где $A_{иi}$ – результат i -го наблюдения, дБ; n – количество наблюдений Стандартная неопределенность $u(\bar{A}_{и}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (A_{иi} - \bar{A}_{и})^2}$
$\Delta_{эт}$	Тип неопределенности B Вид распределения Прямоугольное Оценка величины 0 Интервал, в котором находится значение входной величины: $\pm a_4$, из РЭ аттенюатора Стандартная неопределенность $u(\Delta_{эт}) = \frac{a_4}{\sqrt{3}}$
$\Delta_{кв}$	Тип неопределенности B Вид распределения Прямоугольное Оценка величины 0 Интервал, в котором находится значение входной величины: $\pm a_5$, где a_5 – 1/2 единицы младшего разряда калибруемого измерителя Стандартная неопределенность $u(\Delta_{кв}) = \frac{a_5}{\sqrt{3}}$
$\Delta_{рас}$	Тип неопределенности B Вид распределения Арксинусоидальное Оценка величины 0 Интервал, в котором находится значение входной величины: $\pm a_6$, из ГОСТ 20271.1-91 Стандартная неопределенность $u(\Delta_{рас}) = \frac{a_6}{\sqrt{2}}$

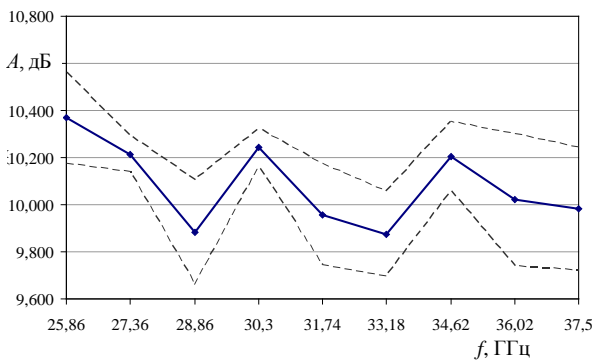


Рис. 9. График зависимости $A \pm U_A$ ($k = 2,0$; $p = 95\%$) от частоты в диапазоне 25,86–37,5 ГГц, установленное значение ослабления $A = 10$ дБ

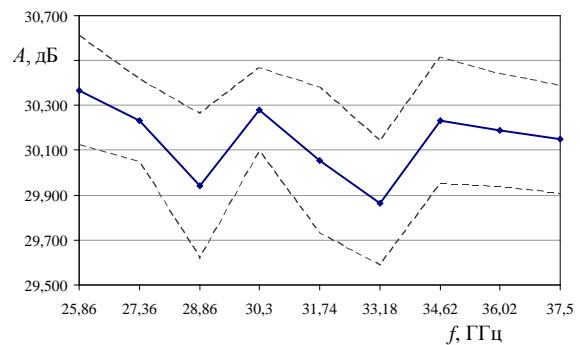


Рис. 10. График зависимости $A \pm U_A$ ($k = 2,0$; $p = 95\%$) от частоты в диапазоне 25,86–37,5 ГГц, установленное значение ослабления $A = 30$ дБ

Расчет неопределенности измерения фазы коэффициента передачи. Математическая модель измерения при определении неопределенности измерения фазы коэффициента передачи имеет следующий вид:

$$\varphi_n = \varphi_{\text{пн}} + \Delta_{\text{ЭТ}} + \Delta_{\text{КВ}} + \Delta_{\text{РАС}}, \text{ град}, \quad (3)$$

где φ_n – действительное значение фазы коэффициента передачи, град; $\varphi_{\text{пн}}$ – показание калибруемого измерителя VNA 25-37, град; $\Delta_{\text{ЭТ}}$ –

неопределенность, обусловленная неидеальностью МФС, град; $\Delta_{\text{КВ}}$ – неопределенность из-за конечного разрешения калибруемого измерителя VNA 25-37, град; $\Delta_{\text{РАС}}$ – неопределенность, обусловленная рассогласованием в измерительном тракте, град.

Анализ входных величин представлен в табл. 3.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 11, 12.

Таблица 3

Входная величина	
$\varphi_{\text{пн}}$	Тип неопределенности A
	Вид распределения Нормальное
	Оценка величины $\bar{\varphi}_{\text{пн}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_{\text{пн}i}$, где $\varphi_{\text{пн}i}$ – результат i -го наблюдения, град; n – количество наблюдений
	Стандартная неопределенность $u(\bar{\varphi}_{\text{пн}}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\varphi_{\text{пн}i} - \bar{\varphi}_{\text{пн}})^2}$
$\Delta_{\text{ЭТ}}$	Тип неопределенности B
	Вид распределения Прямоугольное
	Оценка величины 0
	Интервал, в котором находится значение входной величины: $\pm a_7$, из РЭ МФС
Стандартная неопределенность $u(\Delta_{\text{ЭТ}}) = \frac{a_7}{\sqrt{3}}$	
$\Delta_{\text{КВ}}$	Тип неопределенности B
	Вид распределения Прямоугольное
	Оценка величины 0
	Интервал, в котором находится значение входной величины: $\pm a_8$, где a_8 – 1/2 единицы младшего разряда калибруемого измерителя
Стандартная неопределенность $u(\Delta_{\text{КВ}}) = \frac{a_8}{\sqrt{3}}$	
$\Delta_{\text{РАС}}$	Тип неопределенности B
	Вид распределения Арксинусоидальное
	Оценка величины 0
	Интервал, в котором находится значение входной величины: $\pm a_9$, из ГОСТ 20271.1–91
Стандартная неопределенность $u(\Delta_{\text{РАС}}) = \frac{a_9}{\sqrt{2}}$	

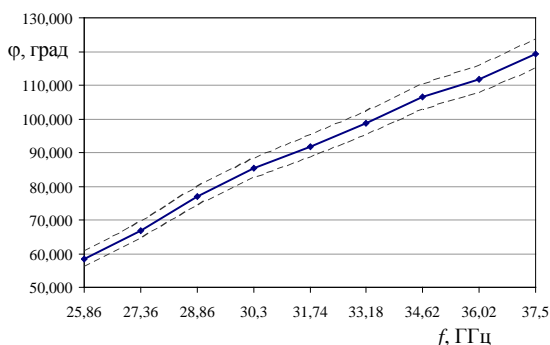


Рис. 11. График зависимости $\varphi \pm U_{\varphi_n}$ ($k = 1,65$; $p = 95\%$) от частоты в диапазоне 25,86–37,5 ГГц при воспроизведении фазового набегу 90° на средней частоте

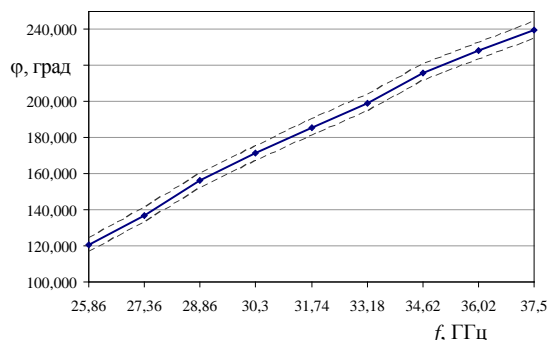


Рис. 12. График зависимости $\varphi \pm U_{\varphi_n}$ ($k = 1,65$; $p = 95\%$) от частоты в диапазоне 25,86–37,5 ГГц при воспроизведении фазового набегу 180° на средней частоте

ВЫВОД

Реализация метода дистанционной калибровки средств измерений предоставляет возможность оперативного проведения метрологических работ, повышает производительность за счет уменьшения времени калибровки и одновременной калибровки нескольких средств измерений, автоматизирует и систематизирует учет реального состояния средств измерений.

Вопрос разработки нормативных документов для дистанционной калибровки приобретает актуальность как на уровне национального метрологического законодательства, так и через внедрение специальных требований в международные и региональные стандарты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Общие** требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий: СТБ ИСО/МЭК 17025.

2. **Новые** средства радиоизмерений в миллиметровом диапазоне длин волн / А. В. Гусинский [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2004. – № 1. – С. 38–43.

3. **Гомодинные** анализаторы СВЧ цепей коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн / А. В. Гусинский [и др.] // Известия Белорусской инженерной академии. – 1999. – № 1 (7)/1. – С. 41–43.

4. **Измеритель** коэффициентов передачи и отражения трехмиллиметрового диапазона длин волн / А. В. Гусинский [и др.] // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – № 2 (14)/2. – С. 18–19.

5. **Свирид, М. С.** Автоматическая калибровка векторного анализатора цепей / М. С. Свирид, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 14-й Междунар. конф. – Севастополь, 2004. – С. 628–629.

6. **Галыго, А. В.** Метрологическое обеспечение векторных анализаторов цепей в диапазоне частот (25,86–37,5) ГГц. / А. В. Галыго // Метрология и измерительная техника: материалы конф. – Харьков, 2006. – Т. 1. – С. 247–255.

7. **Ефремова, Н. Ю.** Оценка неопределенности в измерениях / Н. Ю. Ефремова. – Минск: БелГИМ, 2003.

Поступила 9.06.2007

УДК 621.319.4

ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ С КОЛЬЦЕВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Канд. техн. наук, доц. ДЖЕЖОРА А. А.

Витебский государственный технологический университет

Датчики (первичные преобразователи) являются основной частью любого измерительного устройства. Обоснованный выбор конструкции и параметров первичного преобразователя позволяет определять метрологические характеристики всего измерительного устройства, решает вопросы осуществимости технического решения поставленной задачи. Исследование первичных преобразователей, оптимизация их конструкций возможны либо физическим, либо математическим моделированием преобразователя и объекта контроля. Эти исследования часто характеризуются значительным объемом,

трудоемкостью и затратностью, что с учетом сложности структуры объектов контроля делает физическое моделирование трудноосуществимым. Поэтому основная нагрузка накладывается на математическое моделирование. Математическое моделирование неразрывно связано с широким использованием различных методов и средств математики, с огромным количеством вычислений и расчетов, использованием специализированных программ.

В статье дается расчет математической модели кольцевого первичного преобразователя для достаточно общего случая, когда объектом