

## **A NEW VERIFICATION METHOD FOR VECTOR NETWORK ANALYZERS**

Guba V.G. \*, Savin A.A. \*\*, Bykova O.N. \*, Ivaschenko I.A. \*\*\*

\* NPK TAIR, LLC

51a, bld. 5, Prospekt Kirova str., Tomsk, 634041, Russian Federation

\*\* Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

\*\*\* PLANAR, LLC

32, Elkina str., Chelyabinsk, 454091, Russian Federation

Ph.: (382 2) 901163, e-mail: tairtomsk@gmail.com

*Abstract* – This article presents a new verification method for vector network analyzers. Main advantages of proposed method are a simplifying of verification procedures and reducing costs. Based on the method a recommendation MI 3411-2013 was created. An example of verification procedure in automatic mode in according to MI 3411-2013 for vector reflectometers is shown.

## **СОВРЕМЕННЫЙ МЕТОД ПРОВЕРКИ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ**

Губа В.Г. \*, Савин А.А. \*\*, Быкова О.Н. \*, Иващенко И.А. \*\*\*

\* ООО «НПК ТАИР»

пр. Кирова, д 51а, стр. 5, Томск, 634041, Россия

\*\* ФГБОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

пр. Ленина, 40, Томск, 634050, Россия

\*\*\* ООО «Планар»

ул. Елькина, д 32, Челябинск, 454091, Россия

тел. (382 2) 901163, e-mail: tairtomsk@gmail.com

*Аннотация* – В статье представлен новый метод проверки точностных характеристик векторных анализаторов цепей. Основным преимуществом метода является упрощение и снижение стоимости работ при проверке, калибровке и контроле качества функционирования анализаторов. На его основе создан нормативный документ МИ 3411-2013. Приведен пример автоматизации измерений согласно МИ 3411-2013 на базе отечественных рефлектометров.

Развитие электроники непрерывно стимулирует создание радиотехнических устройств с улучшенными характеристиками и функционалом. Постоянно совершенствуется инфраструктура их разработки, производства и обслуживания. Электронные устройства внедряются во все сферы человеческой деятельности. Быстро растет номенклатура и количество таких устройств. Совместно с ними развиваются приборостроение и метрология, которые являются гарантом их качества. Увеличивается гамма измерительных приборов, от «бесконечно» дорогих до приборов эконом-класса. Каждый класс требует методов подтверждения характеристик в соответствии с функционалом, точностными показателями и ценой. Появляется острая необходимость в расширении методологической базы.

В настоящей статье пойдет речь о новом методе проверки точностных характеристик векторных анализаторов цепей и его практическом применении. Основным преимуществом метода является упрощение и снижение стоимости работ при проверке, калибровке и контроле качества функционирования анализатора, за счет

корректного выбора эталонного оборудования и автоматизации измерений. В работах [1, 2] приведены различные примеры использования метода. На его основе создан нормативный документ МИ 3411-2013 [3]. Это единственный в своем роде документ по метрологии векторных анализаторов цепей. Сами анализаторы имеют огромную область применения в электронной, химической, медицинской и пищевой промышленности.

### Структура и модель векторного анализатора цепей

На рисунке 1 приведена типичная структурная схема векторного анализатора цепей (ВАЦ), имеющего два измерительных порта. Основной функцией такого ВАЦ является измерение комплексных коэффициентов передачи и отражения двухпортовых устройств. Для упрощения на рисунке не приведены гетеродин и блок управления, обработки данных и индикации. В структуре они также присутствуют.

В группу формирования сигнала входят два источника: синтезатор частот и гетеродин. Источники синхронизированы по частоте от одного опорного генератора. Синтезатор частот предназначен для формирования зондирующего сигнала в диапазоне рабочих частот ВАЦ. Сигнал гетеродина, смещенный по частоте относительно зондирующего на величину промежуточной частоты, необходим для преобразования (понижения) частоты.

Группа выделения сигналов, содержащая направленные ответвители или мосты, предназначена для получения падающей и отраженной от исследуемого устройства волн. Иногда для выделения падающей волны применяют делители мощности.

Группа приема сигнала состоит из четырех идентичных приемников: двух опорных и двух измерительных. Для радиотехнических измерений, как правило, приемники строят по супергетеродинной схеме. Они осуществляют преобразование сигналов на более низкую промежуточную частоту, усиление и фильтрацию. В состав приемников входят следующие основные элементы: малошумящий усилитель (МШУ), смеситель (СМ), фильтр нижних частот (ФНЧ), аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и блок цифровой обработки сигналов (блок ЦОС).

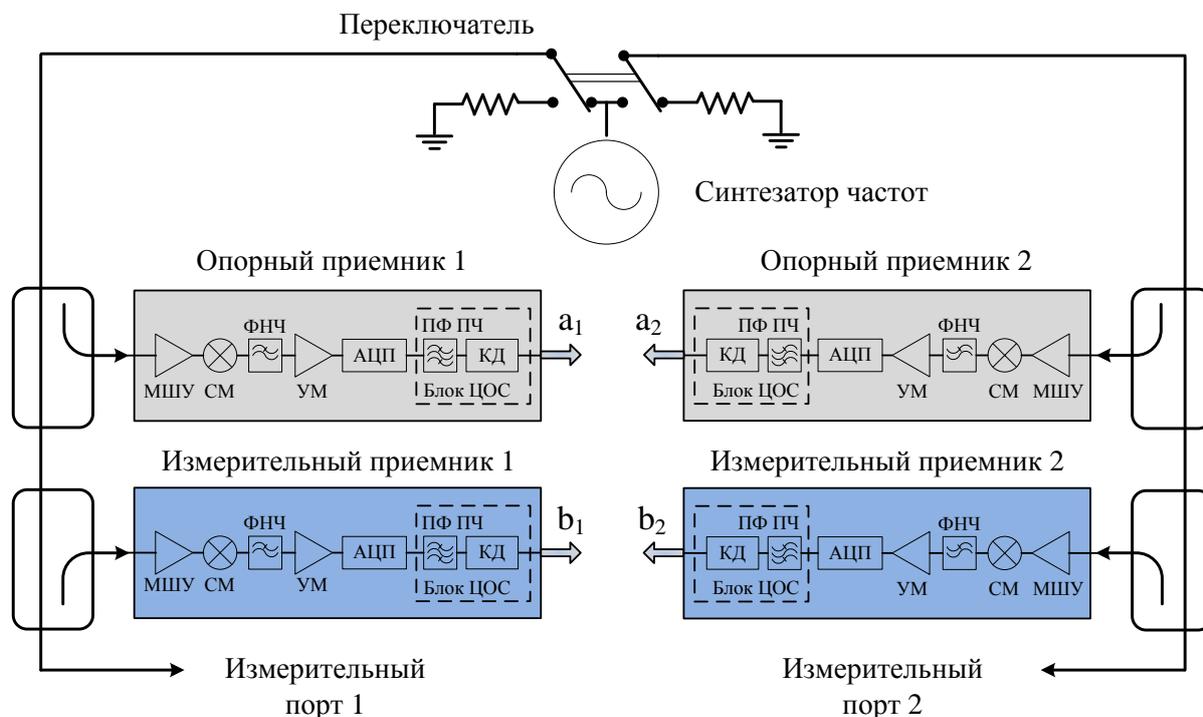


Рисунок 1 – Структурная схема анализатора цепей с двумя портами

Встроенный переключатель предназначен для автоматического переключения направления зондирования сигнала, чтобы обеспечить измерение всех элементов матрицы рассеяния двухпортового устройства (четырёхполюсника) за одно подключение.

К измерительным портам подключаются однопортовые или двухпортовые исследуемые устройства. К двухпортовым устройствам относятся устройства, имеющие, по крайней мере, один вход и один выход. Примерами таких устройств могут быть переходы, аттенюаторы, кабельные сборки, фильтры, усилители и т.д. Кроме этого, к данному классу устройств можно отнести и многопортовые устройства. При этом два порта такого устройства должны подключаться к ВАЦ для тестирования, а оставшиеся нагружаться определенным образом.

Модель ВАЦ, типичная структурная схема которого представлена на рисунке 1, состоит из идеального измерителя коэффициентов передачи и отражения и виртуальных линейных искажающих адаптеров. На рисунках 2 и 3 приведены модели при прямом и обратном направлениях зондирования. Существуют и другие модели. Приведенные модели являются основными для современных анализаторов цепей.

Систематическая погрешность измерений комплексных коэффициентов передачи и отражения возникает из-за наличия искажающих адаптеров и паразитных проникновений сигналов на входы приемников.

Свойства искажающих адаптеров определены их S-параметрами, которые обозначены на рисунках 2 и 3 как  $\dot{E}_D$ ,  $\dot{E}_R$ ,  $\dot{E}_S$ ,  $\dot{E}_T$  и  $\dot{E}_L$ ; дополнительный индекс «F» показывает прямое направление зондирования, а «R» – обратное направление. Паразитное проникновение из источника сигнала в измерительный приемник обозначено как  $\dot{E}_X$ . В итоге, для двух направлений зондирования, имеем 12 параметров. По этой причине такую модель ВАЦ называют 12-параметрической.

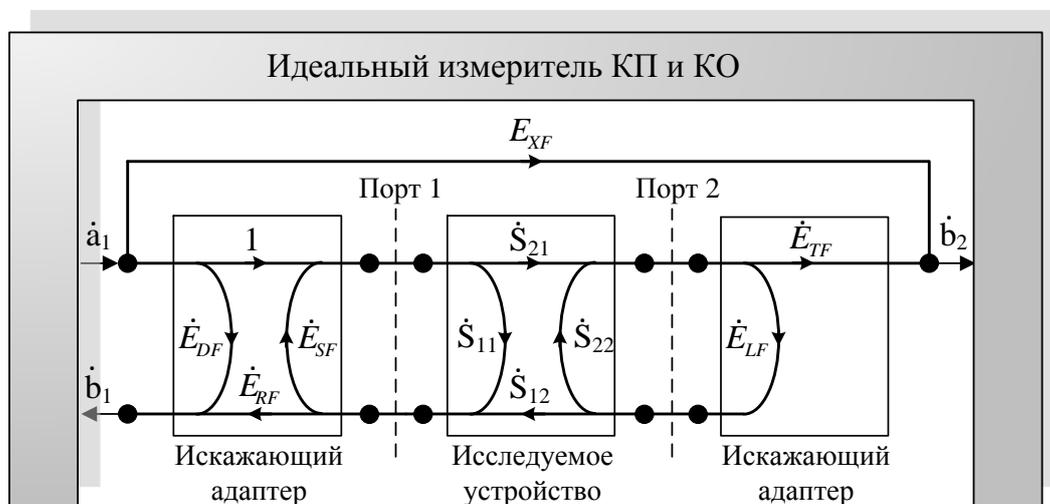


Рисунок 2 – Модель при прямом направлении зондирования

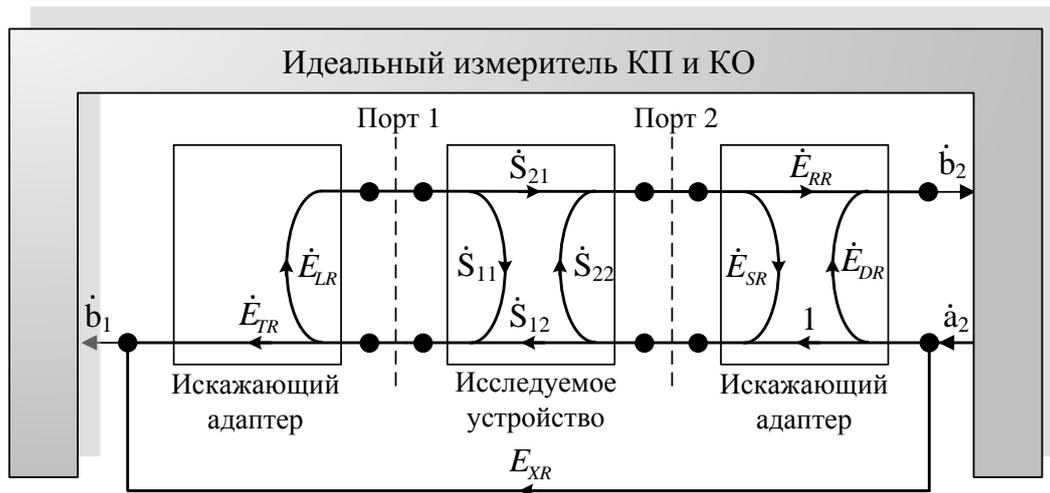


Рисунок 3 – Модель при обратном направлении зондирования

Величины  $\dot{E}_D$ ,  $\dot{E}_R$ ,  $\dot{E}_S$ ,  $\dot{E}_T$ ,  $\dot{E}_L$  и  $\dot{E}_X$  являются ошибками, которые имеют определенный физический смысл и моделируют отражения и искажения сигналов при прохождении цепей внутри ВАЦ и различных кабельных сборок и переходов вне его. Описание ошибок приведено в таблице 1.

Величины  $\dot{E}_D$ ,  $\dot{E}_R$ ,  $\dot{E}_S$ ,  $\dot{E}_T$ ,  $\dot{E}_L$  и  $\dot{E}_X$  комплексные, безразмерные, полагаются неизменными при решении измерительной задачи на каждой фиксированной частоте и могут изменяться только при изменении частоты зондирующего сигнала в рабочем диапазоне.

Связь между измеренными комплексными коэффициентами передачи и отражения исследуемого устройства и их истинными значениями определяется следующими выражениями:

$$\dot{S}_{11}^{\text{ИЗМ}} = \dot{E}_{DF} + \dot{E}_{RF} \cdot \frac{\dot{S}_{11} - \dot{E}_{LF} \cdot (\dot{S}_{11} \cdot \dot{S}_{22} - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}_{12})}{1 - \dot{E}_{SF} \cdot \dot{S}_{11} - \dot{E}_{LF} \cdot \dot{S}_{22} + \dot{E}_{SF} \cdot \dot{E}_{LF} \cdot (\dot{S}_{11} \cdot \dot{S}_{22} - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}_{12})}, \quad (1)$$

$$\dot{S}_{21}^{\text{ИЗМ}} = \dot{E}_{XF} + \frac{\dot{E}_{TF} \cdot \dot{S}_{21}}{1 - \dot{E}_{SF} \cdot \dot{S}_{11} - \dot{E}_{LF} \cdot \dot{S}_{22} + \dot{E}_{SF} \cdot \dot{E}_{LF} \cdot (\dot{S}_{11} \cdot \dot{S}_{22} - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}_{12})}, \quad (2)$$

$$\dot{S}_{12}^{\text{ИЗМ}} = \dot{E}_{XR} + \frac{\dot{E}_{TR} \cdot \dot{S}_{12}}{1 - \dot{E}_{SR} \cdot \dot{S}_{22} - \dot{E}_{LR} \cdot \dot{S}_{11} + \dot{E}_{SR} \cdot \dot{E}_{LR} \cdot (\dot{S}_{11} \cdot \dot{S}_{22} - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}_{12})}, \quad (3)$$

$$\dot{S}_{22}^{\text{ИЗМ}} = \dot{E}_{DR} + \dot{E}_{RR} \cdot \frac{\dot{S}_{22} - \dot{E}_{LR} \cdot (\dot{S}_{11} \cdot \dot{S}_{22} - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}_{12})}{1 - \dot{E}_{SR} \cdot \dot{S}_{22} - \dot{E}_{LR} \cdot \dot{S}_{11} + \dot{E}_{SR} \cdot \dot{E}_{LR} \cdot (\dot{S}_{11} \cdot \dot{S}_{22} - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}_{12})}, \quad (4)$$

где  $\dot{S}_{ij}^{\text{ИЗМ}}$  – измеренные элементы матрицы рассеяния исследуемого устройства ( $i = 1, 2; j = 1, 2$ );

$\dot{S}_{ij}$  – истинные (действительные) значения элементов матрицы рассеяния исследуемого устройства;

Таблица 1 – Обозначение, наименование и краткое описание ошибок согласно модели векторного анализатора цепей

Обозначение	Наименование	Краткое описание
$\dot{E}_D$	Направленность	Относительный уровень паразитного сигнала, поступающий на вход приемников, при подключении идеальной согласованной нагрузки к измерительному порту. Ошибка обусловлена неидеальным качеством устройства выделения сигналов: направленного ответвителя или моста. Направленность ограничивает нижний предел измерений комплексного коэффициента отражения.

Обозначение	Наименование	Краткое описание
$\dot{E}_S$	Согласование источника	Относительный уровень отраженного сигнала, вызванный неидеальным согласованием измерительного порта в режиме источника. Ошибка обусловлена отличием выходного импеданса синтезатора частот от номинального значения волнового сопротивления линии передачи.
$\dot{E}_L$	Согласование нагрузки	Относительный уровень отраженного сигнала, вызванный неидеальным согласованием измерительного порта в режиме приемника. Ошибка обусловлена отличием входного импеданса нагрузки переключателя от номинального значения волнового сопротивления линии передачи.
$\dot{E}_R$	Трекинг отражения	Ошибка характеризует отличие коэффициентов передачи двух основных цепей в тракте отражения: от устройства выделения сигналов до опорного и до измерительного приемников. Показывает неидентичность путей распространения опорного и отраженного сигналов. Определяет плоскость отсчета модуля и фазы коэффициента отражения.
$\dot{E}_T$	Трекинг передачи	Ошибка характеризует отличие коэффициентов передачи двух основных цепей в тракте передачи: от устройства выделения сигналов до опорного и до измерительного приемников. Показывает неидентичность путей распространения опорного и прошедшего через тракт сигналов. Определяет плоскость отсчета модуля и фазы коэффициента передачи.
$\dot{E}_X$	Изоляция	Относительный уровень паразитного сигнала, поступающий на вход приемников, при измерении коэффициента передачи. Ошибка обусловлена неидеальным качеством экранировки внутренних блоков, используемых переходов и кабельных сборок. Некоторая часть измерительных сигналов и помех, вызванных работой рядом стоящего оборудования, сетей связи и телевидения, в момент измерений попадает на вход приемников напрямую без прохождения исследуемого устройства. Изоляция ограничивает нижний предел измерений комплексного коэффициента передачи.

#### Описание метода

Принцип предлагаемого метода состоит в последовательном проведении двух калибровок одного и того же анализатора с помощью двух разных средств калибровки и поэлементном сравнении полученных оценок ошибок.

К средствам калибровки относят механические наборы мер и электронные калибраторы.

Погрешности одного средства калибровки должны быть известны и нормированы определенным образом, то есть представлены эффективные параметры ВАЦ после калибровки.

По результатам проведения двух калибровок ВАЦ получают два вектора оценок ошибок, содержащих 10 из 12 возможных параметров, на каждой частоте измерений  $f$ :

$$\vec{E}_{2port}^{1cal} = (\dot{E}_{DF}^*, \dot{E}_{SF}^*, \dot{E}_{LF}^*, \dot{E}_{RF}^*, \dot{E}_{TF}^*, \dot{E}_{DR}^*, \dot{E}_{SR}^*, \dot{E}_{LR}^*, \dot{E}_{RR}^*, \dot{E}_{TR}^*), \quad (5)$$

$$\vec{E}_{2port}^{2cal} = (\dot{E}_{DF0}^*, \dot{E}_{SF0}^*, \dot{E}_{LF0}^*, \dot{E}_{RF0}^*, \dot{E}_{TF0}^*, \dot{E}_{DR0}^*, \dot{E}_{SR0}^*, \dot{E}_{LR0}^*, \dot{E}_{RR0}^*, \dot{E}_{TR0}^*). \quad (6)$$

где  $\vec{E}_{2port}^{1cal}$  – вектор оценок ошибок после проведения первой двухпортовой калибровки с помощью штатного средства;

$\vec{E}_{2port}^{2cal}$  – вектор оценок ошибок после проведения второй полной двухпортовой

калибровки с помощью эталонного средства.

Векторы  $\vec{E}_{2port}^{1cal}$  и  $\vec{E}_{2port}^{2cal}$  описывают параметры линейных искажающих адаптеров согласно модели ВАЦ.

Ошибки  $\dot{E}_{XF}^*$  и  $\dot{E}_{XR}^*$ , характеризующие паразитные проникновения сигналов на входы приемников при измерении комплексного коэффициента передачи, определяются отдельно. Методика основана на измерении собственного шума приемников после калибровки при подключении к измерительным портам нагрузок короткозамкнутых.

Разность векторов ошибок  $\vec{E}_{2port}^{1cal}$  и  $\vec{E}_{2port}^{2cal}$  на каждой частоте измерений приводит к появлению вектора эффективных параметров  $\vec{E}_{2port}^{eff}$ :

$$\begin{aligned} \vec{E}_{2port}^{eff} &= \vec{E}_{2port}^{1cal} - \vec{E}_{2port}^{2cal} = \\ &= (\dot{E}_{DF}^* - \dot{E}_{DF0}^*, \dot{E}_{SF}^* - \dot{E}_{SF0}^*, \dot{E}_{LF}^* - \dot{E}_{LF0}^*, \dot{E}_{RF}^* - \dot{E}_{RF0}^*, \dot{E}_{TF}^* - \dot{E}_{TF}^*, \dots). \end{aligned} \quad (7)$$

В качестве итоговых оценок эффективных параметров  $|\dot{E}_k^{eff}|$  при расчете систематической погрешности ВАЦ принимаются параметры, определяемые следующим образом:

$$|\dot{E}_k^{eff}| = \sqrt{|\dot{E}_k^* - \dot{E}_{k0}^*|^2 + |\Delta \dot{E}_k|^2}, \quad (8)$$

где  $|\dot{E}_k^* - \dot{E}_{k0}^*|$  – модуль разности элементов векторов  $\vec{E}_{2port}^{1cal}$  и  $\vec{E}_{2port}^{2cal}$ ;

$|\Delta \dot{E}_k|$  – погрешность эталонного средства «калибровки» для  $k$ -ой ошибки.

Формула (8) корректно работает при малых трекингах отражения и передачи.

Известные эффективные параметры дают возможность рассчитать погрешность измерений комплексных коэффициентов передачи и отражения произвольных однопортовых или двухпортовых устройств. В [4, 5] приведены другие методы определения эффективных параметров и расчет погрешности.

Например, погрешность измерений модуля  $\Delta|\dot{S}_{21}|_{СИСТ}$  и фазы  $\Delta \arg(\dot{S}_{21})_{СИСТ}$ , градусы, комплексного коэффициента передачи  $\dot{S}_{21}$  определяют по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta|\dot{S}_{21}|_{СИСТ} &= |\Delta \dot{S}_{21}^{MAX}| = \\ &= |\dot{S}_{21}| \cdot (|\dot{E}_{XF}^{eff}| \cdot |\dot{S}_{21}|^{-1} + |\dot{E}_{TF}^{eff} - 1| + |\dot{E}_{SF}^{eff}| \cdot |\dot{S}_{11}| + |\dot{E}_{LF}^{eff}| \cdot |\dot{S}_{22}| + \\ &\quad + |\dot{E}_{SF}^{eff}| \cdot |\dot{E}_{LF}^{eff}| \cdot |\dot{S}_{21}| \cdot |\dot{S}_{12}|), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta \arg(\dot{S}_{21})_{СИСТ} &= \frac{180}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{|\Delta \dot{S}_{21}^{MAX}|}{|\dot{S}_{21}|}\right) = \\ &= \frac{180}{\pi} \cdot \arcsin\left(|\dot{E}_{XF}^{eff}| \cdot |\dot{S}_{21}|^{-1} + |\dot{E}_{TF}^{eff} - 1| + |\dot{E}_{SF}^{eff}| \cdot |\dot{S}_{11}| + |\dot{E}_{LF}^{eff}| \cdot |\dot{S}_{22}| + \right. \\ &\quad \left. + |\dot{E}_{SF}^{eff}| \cdot |\dot{E}_{LF}^{eff}| \cdot |\dot{S}_{21}| \cdot |\dot{S}_{12}|\right). \end{aligned} \quad (10)$$

*Рекомендуемая последовательность действий при расчете погрешности*

Для вычисления суммарной погрешности измерений комплексных коэффициентов передачи и отражения необходимо выполнить следующие действия:

- определить среднеквадратическое отклонение  $\sigma_h(\dot{S}_{ij})$ ;
- определить относительный собственный шум приемников  $n(\dot{S}_{ij})$ ;
- вычислить относительный собственный шум компаратора  $N(\dot{S}_{ij})$ ;
- последовательно провести две или более калибровки ВАЦ с помощью одного и того же средства калибровки, определить флуктуацию параметров искажающих адаптеров

$R(\dot{S}_{ij})$ ;

- вычислить пределы случайной погрешности измерений модуля  $\Delta|\dot{S}_{ij}|_{\text{СЛ}}$  и фазы  $\Delta \arg(\dot{S}_{ij})_{\text{СЛ}}$ ;
- последовательно провести две калибровки ВАЦ с помощью штатного и эталонного средства, определить эффективные параметры искажающих адаптеров  $\dot{E}_k^{eff}$ ;
- определить уровень паразитного проникновения сигналов на входы приемников  $\dot{E}_X^{eff}$ ;
- вычислить пределы систематической погрешности измерений модуля  $\Delta|\dot{S}_{ij}|_{\text{СИСТ}}$  и фазы  $\Delta \arg(\dot{S}_{ij})_{\text{СИСТ}}$ ;
- вычислить пределы суммарной погрешности измерений модуля  $\Delta|\dot{S}_{ij}|_{\Sigma}$  и фазы  $\Delta \arg(\dot{S}_{ij})_{\Sigma}$ ;
- приписать пределы суммарной погрешности результату измерений  $\dot{S}_{ij}$  исследуемого устройства;
- представить суммарную погрешность измерений комплексных коэффициентов передачи и отражения в форме, указанной в эксплуатационной документации на ВАЦ конкретного типа, и сравнить с допускаемыми пределами.

#### *Область применения МИ 3411-2013*

Рекомендация распространяется на анализаторы цепей векторные и устанавливает методику определения их основных метрологических характеристик, к которым относятся:

- погрешность измерений комплексного коэффициента отражения однопортовых и двухпортовых устройств;
- погрешность измерений комплексного коэффициента передачи двухпортовых устройств.

Методика основана на методе сравнения калибровок, использование которого требует наличия эталонного набора мер или эталонного электронного модуля калибровки с известными метрологическими характеристиками.

Методика может быть использована для определения метрологических характеристик ВАЦ в волноводе с сечением, отличающимся от его измерительных портов и не указанным в описании типа (эксплуатационной документации) на него.

Также рекомендация может быть использована для разработки методов поверки и калибровки ВАЦ.

Помимо процедур верификации методика может быть применена непосредственно на рабочем месте для контроля функционирования ВАЦ.

Дополнительно, с помощью описанного подхода можно определять параметры двухпортовых устройств с малыми потерями, таких как переходы, или параметры кабелей при их различном изгибе, воздействии внешних влияющих факторов и времени.

#### *Автоматизация измерений*

На основе МИ 3411-2013 компания НПК ТАИР разработала программное обеспечение *VNA Performance Test* (рисунок 4) позволяющее управлять векторными рефлектометрами SABAN R54 и SABAN R140 производства компании ПЛАНАР при проведении калибровки или поверки.



Рисунок 4 – Автоматизация измерений

Рефлектометры представляют собой полноценные векторные анализаторы цепей с одним измерительным портом и объединяют в одном малогабаритном металлическом корпусе: генераторы испытательного и гетеродинного сигналов, аттенуатор регулировки мощности, блок направленного ответвителя, двухканальный приёмник, блок управления на базе сигнального процессора и блок питания. Приборы имеют простой дружественный интерфейс, адаптированный под мобильные компьютеры и не требующий кропотливого изучения со стороны инженерного состава.

Широкие возможности автоматизации позволили организовать взаимодействие между программой *VNA Performance Test* и штатным программным обеспечением приборов так, чтобы на любом этапе жизненного цикла можно было просто и недорого проводить необходимые метрологические процедуры.

Все тесты выполняются в полуавтоматическом режиме с возможностью записи в файл или протокол. Форма представления результатов универсальная и соответствует рекомендациям по метрологии.

Время на проведение всех измерений уменьшается до 15 минут. При этом большая его часть тратится на подготовку используемых средств измерений.

В программе имеются все необходимые инструкции, поэтому кардинально уменьшается нагрузка на персонал, проводящий работы. Особое внимание уделено взаимодействию с пользователем - применяются самые распространенные и простые решения: кнопки, поля для ввода, таблицы и графики. Случайные действия пользователя не приведут к утрате результатов измерений или сбою в работе.

Автоматизированный метод измерений, указанный в МИ 3411-2013, позволяет снизить стоимость поверки и калибровки, поскольку для реализации используются более дешевые и распространённые эталонные средства.

При наличии необходимого эталонного оборудования, пользователь самостоятельно, в любое время и без дополнительных затрат может убедиться в качестве функционирования прибора. Параметры можно проверять избирательно, то есть только те, которые интересуют.

### *Заключение*

Используя метод, описанный в статье и в рекомендации МИ 3411-2013, можно выполнить верификацию ВАЦ с произвольным составом, определив его основные метрологические характеристики, такие как погрешности измерений комплексных коэффициентов передачи и отражения.

Для реализации метода требуется дополнительный набор калибровочных мер с известными точностными характеристиками и не нужны прецизионные воздушные линии, согласованные и рассогласованные нагрузки, аттенюаторы и пр. Наборы калибровочных мер являются более распространенными и востребованными при эксплуатации по сравнению с верификационными наборами.

Метод позволяет учесть погрешность описания эталонного набора и, таким образом, обеспечить прослеживаемость результатов измерений. Кроме этого, данный метод имеет простой алгоритм реализации.

Автоматизация измерений и метрологических процедур позволит многим компаниям упростить и удешевить применение и обслуживание высокоточных приборов при их эксплуатации в самых различных сферах деятельности.

### *Литература*

1. Заостровных С.А., Губа В.Г., Савин А.А., Быкова О.Н. Сравнительный анализ алгоритмов верификации векторных анализаторов цепей // 23-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» CrMiCo'2013 (Севастополь, 8-13 сен. 2013 г.): материалы конференции / Севастополь: Вебер, 2013. С. 942-943.

2. Vladimir G. Guba, Aleksandr A. Savin, Olesia N. Bykova, Andrej Rumiantsev and Benjamin D. Maxson. An Automated Method for VNA Accuracy Verification Using the Modified Calibration Comparison Technique // 82nd ARFTG Microwave Measurement Conference (Columbus, Ohio, USA, November 20-21, 2013)/ P. 164-167.

3. МИ 3411-2013. Рекомендация. Анализаторы цепей векторные. Методика определения метрологических характеристик. М., 2013., 54 с. (Государственная система обеспечения единства измерений).

4. Савин А.А., Губа В.Г. Определение уровня остаточной систематической погрешности векторного анализатора цепей после выполнения однопортовой калибровки // Вестник метролога. 2009. № 4. С. 16-22.

5. Губа В.Г. Влияние точности характеристики мер калибровочного набора на погрешность измерений однопортового векторного анализатора цепей // Вестник метролога. 2010. № 4. С. 24-30.