

**ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ  
МОЩНОСТИ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 37,5-178,4 ГГц  
НА ОСНОВЕ БЕЛОРУССКИХ РАЗРАБОТОК (MWM LAB) В РФ**

*Л.В. Колоскова, А.В. Гусинский, А.М. Кострикин, А.В. Галыго,  
А.Н. Луферов, Д.А. Кондрашов, А.В. Ворошень, С.С. Гурский,  
А.П. Белошицкий, М.С. Свирид, Т.К. Зезюлина*

*ООО НПЦ «МитиноПрибор»*

*В данной статье приведен анализ ряда современных радиоизмерительных приборов, разработанных в Республике Беларусь и Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники, как базы для построения эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот 37,5-178,4 ГГц. Описываются параметры калибраторов СВЧ мощности, калориметров, генераторов СВЧ сигнала, векторных и скалярных анализаторов цепей. Рассматриваются погрешности, возникающие при работе с эталоном и методы их уменьшения. Представлен отечественный цифровой ваттметр поглощаемой мощности в диапазоне СВЧ, калибруемый в автоматическом режиме.*

**Введение**

Современные достижения в области СВЧ техники открывают принципиально новые пути и возможности построения систем, служащих для скоростной передачи информации, систем радиолокации и радионавигации, систем связи, телевидения, медицины. Это обуславливает необходимость разработки средств измерений СВЧ диапазона длин волн, а также решения вопросов их метрологического обеспечения. С точки зрения метрологии решение этих задач в миллиметровом диапазоне длин волн связано с решением ряда уникальных проблем, поскольку размеры компонентов на этих частотах сравнимы с длиной волны.

Научно-исследовательская испытательная лаборатория аппаратуры и устройств СВЧ БГУИР, аккредитованная в системе аккредитации испытательных лабораторий Республики Беларусь (аттестат аккредитации № ВУ/112 02.5.0.0065 от 09.01.2015 г.), в течение длительного времени занимается решением этой актуальной проблемы: разрабатывает современные автоматизированные средства измерений для качественной настройки и производства устройств миллиметрового диапазона длин волн, а также обеспечивает метрологическое обеспечение измерений в этом диапазоне частот.

Одной из особенностей работы в диапазоне СВЧ является уделение особого внимания измерению мощности электромагнитных сигналов, как

единственной энергетической характеристики, однозначно характеризующей интенсивность электромагнитных колебаний [1]. Именно поэтому существует большая потребность в измерителях мощности сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн как в Республике Беларусь (предприятия Министерства связи и информатизации, подразделения Министерства обороны, предприятия Министерства промышленности), так и за рубежом (предприятия и организации России, Индии, Венесуэлы, Кореи, Китая и др.).

На данный момент в Республике Беларусь находится более 2-х тысяч ваттметров различного назначения, диапазона частот и номенклатуры. Имеющиеся в эксплуатации средства измерения мощности в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц не обеспечены поверкой и калибровкой из-за отсутствия эталонных средств измерений, что создает определенные сложности в обеспечении точности и достоверности измерений. Для их поверки, калибровки и метрологической аттестации необходимы рабочие эталоны, обладающие погрешностью измерения мощности не более  $\pm 2\%$ . Для поверки рабочих эталонов необходимо создать эталон единицы мощности с погрешностью не более  $\pm 1,0\%$ .

Возможность поверки, калибровки и метрологической аттестации ваттметров СВЧ отечественными предприятиями на зарубежных эталонах сильно ограничивается высокой стоимостью.

На сегодняшний день в научно-исследовательской испытательной лаборатории аппаратуры и устройств СВЧ БГУИР созданы все необходимые элементы для создания на их базе эталона единицы мощности в диапазоне частот 37,5–178,4 ГГц.

### **Структурная схема эталона**

Эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах представляет собой систему, имеющую в своем составе оборудование для работы в четырех частотных диапазонах 37,5–53,57 ГГц, 53,57–78,3 ГГц, 78,3–118,1 ГГц и 118,1–178,4 ГГц, которые соответствуют сечениям волновода 5,2×2,6 мм, 3,6×1,8 мм, 2,4×1,2 мм и 1,6×0,8 мм соответственно. В состав оборудования для каждого частотного диапазона входят (рис. 1): генератор СВЧ сигнала, калибратор мощности, содержащий калориметр, эталонный калориметр и источники питания. Для измерения выходного сигнала калориметров используются вольтметры с погрешностью измерения напряжения постоянного тока не более  $\pm 0,004\%$ . Одним из элементов комплекса является измеритель комплексных коэффициентов отражения (векторный анализатор цепей), позволяющий снизить погрешность из-за рассогласования при

измерениях. Управляющая ЭВМ используется для контроля измерений, записи, обработки, хранения и печати полученных данных.



Рис. 1. Элементы эталонного комплекса

Направленный ответвитель, входящий в состав калибратора мощности, делит поступающую на его вход мощность СВЧ поровну между калориметром и выходом калибратора мощности. Измеритель комплексных коэффициентов отражения (векторный анализатор цепей) позволяет исследовать элементы СВЧ тракта эталонного комплекса и произвести коррекцию погрешностей измерений, вызванных рассогласованием.

Специально разработанное программное обеспечение (ПО) управляющей ЭВМ контролирует работу всей системы, позволяет полностью автоматизировать процесс поверки, калибровки и метрологической аттестации ваттметров. Связь управляющей ЭВМ с генератором СВЧ, вольтметрами и измерителем комплексных коэффициентов отражения может осуществляться при помощи интерфейсов GPIB, USB, LAN либо RS-232.

Применение калориметрического метода оправдано простотой преобразования энергии электрического тока в теплоту. К достоинствам калориметрических ваттметров можно отнести исключительно широкий частотный и динамический диапазоны, высокую точность измерений, определяемую в основном погрешностью измерения мощности замещения параметрами рабочей нагрузки, которые точно известны для каждого ваттметра [1].

В основе измерений положен принцип замещения мощности СВЧ мощностью постоянного тока. Величина замещающей мощности постоянного тока будет определяться количеством мощности, необходимым для того, чтобы вызвать тепловые явления в нагрузке калориметра, эквивалентные воздействию мощности СВЧ. Так как часть мощности СВЧ, поданной на вход, теряется вследствие отражений и других причин, для определения фактического уровня мощности используют калибровочный коэффициент, который определяется в процессе калибровки.

Калибровочный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$K = P_{DC} / P_{RF}, \quad (1)$$

где  $P_{RF}$  – мощность СВЧ, поданная на вход;  $P_{DC}$  – замещающая мощность постоянного тока.

При работе с эталонным комплексом возникает необходимость калибровки калориметра калибратора мощности. Для этой цели используется эталонный калориметр (рис. 1). Мощность СВЧ от генератора подается на вход калибратора мощности, внутри которого происходит деление мощности пополам между калибруемым калориметром и выходом калибратора мощности, к которому подключается эталонный калориметр. Уровни выходных сигналов калориметров измеряются вольтметрами А и Б соответственно. Данные измерений передаются от вольтметров в управляющую ЭВМ, где они обрабатываются.

Калибровочный коэффициент калориметра  $K_{THRU}$  определяют по формуле:

$$K_{THRU} = P_{DC\_THRU} / P_{RF}, \quad (2)$$

$P_{RF}$  рассчитывается по формуле:

$$P_{RF} = P_{DC\_TERM} / K_{TERM}, \quad (3)$$

где  $P_{DC\_THRU}$  – замещающая мощность постоянного тока калориметра;  $P_{RF}$  – мощность СВЧ, поданная на вход калибратора;  $P_{DC\_TERM}$  – замещающая мощность постоянного тока эталонного калориметра;  $K_{TERM}$  – калибровочный коэффициент эталонного калориметра.

Для калибровки, поверки и метрологической аттестации ваттметров и измерительных преобразователей мощности используется калибратор мощности (рис. 2). В этом случае исследуемый измерительный преобразователь мощности подключается к СВЧ выходу калибратора мощности. Индикаторный блок ваттметра может быть напрямую подключен к управляющей ЭВМ, что позволит полностью автоматизировать процесс проведения калибровки. В случае отсутствия необходимых интерфейсов, оператору необходимо будет вручную вносить показания исследуемого прибора.

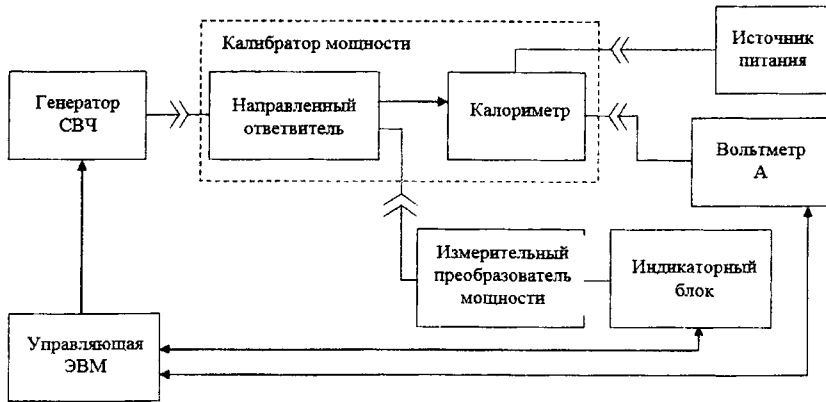


Рис. 2. Схема эталонного комплекса при проведении поверки, калибровки или метрологической аттестации измерительного преобразователя мощности

Калибровочный коэффициент испытываемого измерительного преобразователя  $K_{DUT}$  определяется по формуле:

$$K_{DUT} = P_{DUT} / P_{RF}, \quad (4)$$

где мощность СВЧ, поданная на вход,  $P_{RF}$  рассчитывается по формуле:

$$P_{RF} = P_{DC\_THRU} / K_{THRU}, \quad (5)$$

где  $P_{DUT}$  – значение мощности СВЧ, считанное с индикаторного блока;  $P_{DC\_THRU}$  – замещающая мощность постоянного тока калориметра;  $K_{THRU}$  – калибровочный коэффициент калориметра.

Калибровочный коэффициент является мерой отношения измеренной мощности и фактически поданной на вход мощности СВЧ. Обычно калибровочный коэффициент представляется в виде десятичного числа и имеет значение от 0 до 1, также он может быть представлен в процентах или в децибелах.

### Описание элементов комплекса

#### *Волноводный калибратор мощности*

Калибратор представляет собой конструкцию, помещенную в корпус и содержащую ферритовый вентиль (ФВ), направленный ответвитель (НО) и калориметр, включенный в основное плечо ответвителя (рис. 3). Направленный ответвитель – интерференционного типа со связью по широкой стенке волновода [2].

Мощность СВЧ от источника сигнала, поданная на вход калибратора, через ФВ поступает на НО, который делит мощность поровну между входом калориметра и выходом 1 калибратора, к которому может

подключаться калибруемый измерительный преобразователь мощности в случае проведения калибровки, либо эталонный калориметр при калибровке самого калибратора мощности. К выходу 2 калибратора подключается вольтметр постоянного тока, измеряющий выходное напряжение калориметра.

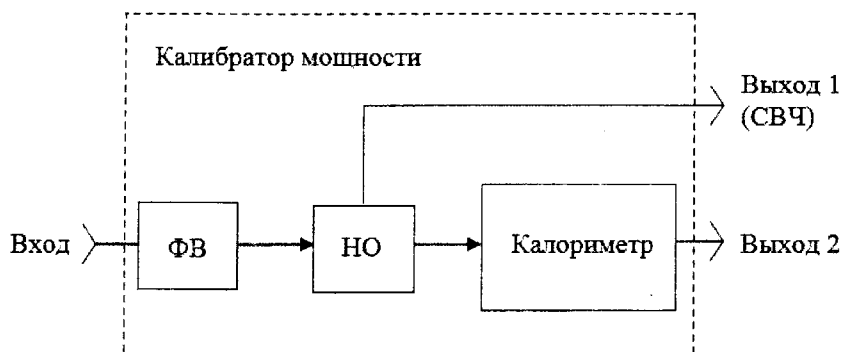


Рис. 3. Схема волноводного калибратора мощности

Основными достоинствами данной схемы являются высокое быстродействие, простота конструкции, небольшое количество составных блоков, и соответственно сопрягаемых узлов СВЧ тракта, что снижает погрешности, вызванные неидеальностью согласования. Кроме того, использование калибратора мощности позволяет частично автоматизировать процесс поверки без существенного усложнения схемы.

Основные технические характеристики НО для калибраторов различных диапазонов частот представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики волноводных НО

Диапазон частот, ГГц	Размеры волновода, мм	Среднее значение переходного ослабления, дБ	Неравномерность переходного ослабления, дБ	Направленность, дБ (мин)	КСВН первичного канала не более
37,50 – 53,57	5,2 x 2,6	3±1	±0,7	25	1.25
53,57 – 78,33	3,6 x 1,8	3±1	±0,7	25	1.25
78,33 – 118,1	2,4 x 1,2	3±1	±0,7	25	1.25
118,10 – 178,40	1,6 x 0,8	3±1	±0,8	25	1.3

В качестве калориметров применены дифференциальные калориметры с сухой нагрузкой и автокомпенсационным преобразователем (АП). В основу АП положен принцип теплоэлектрического взаимодействия. Ваттметр с АП

представляет систему авторегулирования, где в качестве датчика температуры выступает участок *эмиттер-база* биполярного транзистора [3].

Преобразователь содержит два тонкостенных никелевых волновода, рабочий и опорный, покрытых медью в нагрузочной части. В опорный волновод СВЧ мощность не поступает, он служит для компенсации изменений окружающей температуры. На рабочий волновод, содержащий объемную клиновидную поглощающую нагрузку для СВЧ мощности, закрепляются датчики температуры, усилитель и нагреватель, выполненные на биполярных бескорпусных транзисторах.

При нагреве рабочего волновода некоторой мощностью, выделяющейся в нагрузке, или мощностью постоянного тока в нагревателе происходит повышение температуры транзистора датчика температуры. При этом в цепи база-эмиттер этого транзистора появляется дополнительная ЭДС. Это напряжение усиливается и воздействует на базу транзистора выходного каскада, приводя к изменению его тока. При этом изменение мощности, выделяемой в транзисторе и его нагрузочном сопротивлении, которое приводит к восстановлению первоначального баланса, равно замещенной мощности СВЧ или мощности постоянного тока, поданной в нагреватель. Напряжение питания постоянно, поэтому изменение тока через транзистор и падение напряжения на его нагрузочном резисторе пропорционально замещенной мощности. Вольтметр, измеряющий изменение напряжения на нагрузочном резисторе выходного каскада, может быть проградуирован в единицах мощности.

Основные технические характеристики калориметров, созданных для различных диапазонов частот представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные технические характеристики калориметров

Диапазон частот, ГГц	Размеры волновода, мм	Диапазон измеряемых мощностей, мВт	КСВН не более
37,50 – 53,57	5,2 x 2,6	0,001 – 20	1.1
53,57 – 78,33	3,6 x 1,8	0,001 – 20	1.1
78,33 – 118,1	2,4 x 1,2	0,001 – 20	1.1
118,10 – 178,40	1,6 x 0,8	0,001 – 20	1.1

Исследования нестабильности результатов измерений мощности электромагнитных колебаний при помощи данных калориметров в установленном режиме в течение 8 ч при температуре окружающей среды 19–21 °С показали, что значение этой величины не превышает  $2,5 \cdot 10^{-3}$  мВт/мин.

Среднеквадратическое отклонение результатов измерений мощности для первого поддиапазона 37,50–53,57 ГГц не превышает 0,006 мВт, для

второго поддиапазона 53,57–78,33 ГГц не превышает 0,007 мВт, для третьего поддиапазона 78,33–118,1 ГГц не превышает 0,008 мВт, для четвертого поддиапазона 118,10–178,40 ГГц не превышает 0,007 мВт.

*Генератор СВЧ сигналов (твердотельный)*

В качестве источников сигнала СВЧ для различных диапазонов используются четыре генератора, которые могут строиться на основе синтезатора частот – твердотельного источника СВЧ мощности типа Г4-МВМ (разработаны и производятся генераторы типа Г4-МВМ от 0,01 до 220 ГГц).

При реализации генератора синтезированных сигналов его структурная схема (рис. 4) строится по классической схеме построения измерительного волноводного генератора, состоящей из источника СВЧ колебаний, блока управления, устройства амплитудной импульсной модуляции выходного сигнала и блока питания [4].

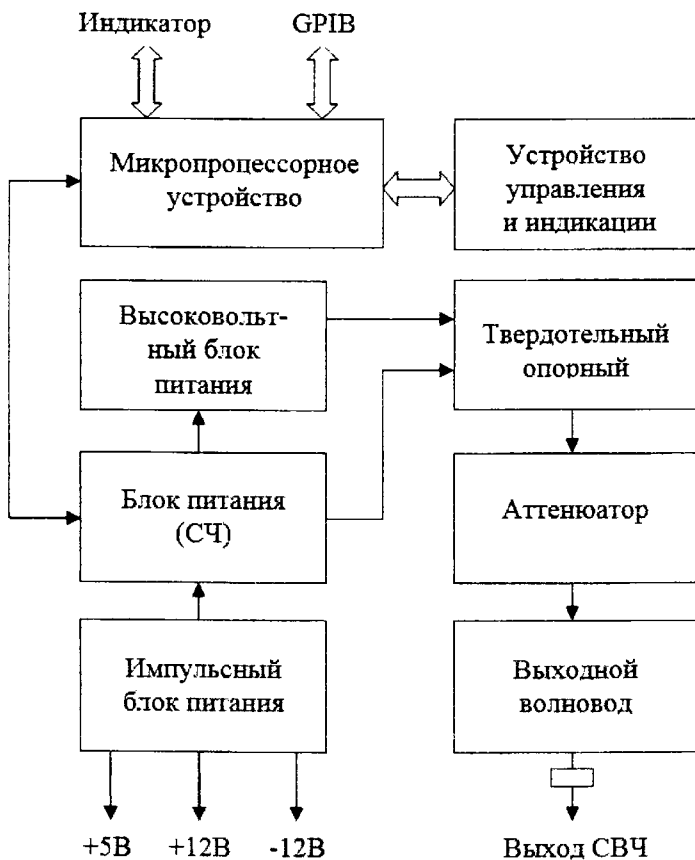


Рис. 4. Структурная схема генератора СВЧ сигналов



Основным элементом генератора, определяющим его структурную схему, является твердотельный опорный источник, способный изменять частоту генерируемого сигнала в широких пределах в зависимости от изменения напряжения на замедляющей системе, а выходную мощность – изменением напряжения на управляющем электроде.

Генераторы имеют следующие метрологические характеристики:

- предел основной погрешности установки  $\pm 2 \cdot 10^{-4} \cdot f_{\max}$ , где  $f_{\max}$  – значение максимальной частоты рабочего диапазона частот;
- кратковременная нестабильность частоты  $\pm 1 \cdot 10^{-4} \cdot f_{\max}$ ;
- значение выходной мощности генератора от 10 мВт.

В генераторе обеспечивается цифровое управление всеми внутренними элементами, ответственными за установку параметров и режимов работы, и цифровой отсчет устанавливаемых параметров. Для обеспечения точности установки частоты в память генератора введен твердотельный опорный источник.

В генераторе реализуются два основных режима управления. Первый режим – оперативный (или ручной) с передней панели генератора, второй – автоматический, от ЭВМ через интерфейс GPIB или RS-232.

### *Анализаторы цепей (твердотельным источником сигнала)*

В научно-исследовательской испытательной лаборатории аппаратуры и устройств СВЧ БГУИР разработаны и изготовлены панорамные измерители коэффициентов отражения и передачи (скалярные анализаторы цепей САЦ), предназначенные для измерения модулей S-параметров. В состав САЦ входят высокочувствительные детекторы, измерительные мосты для направленных ответвителей, синтезатор частот (СЧ) и встраиваемый компьютер.

Разработанный вариант САЦ имеет ряд преимуществ по сравнению с известными аналогами вида P2. Во-первых, применением в качестве источника измерительного сигнала высокостабильного синтезатора частот достигается более высокая точность установки частоты. Во-вторых, использованием в программном обеспечении измерителя усовершенствованных алгоритмов калибровки и измерения позволяет повысить точность измерений.

В рамках ГНТП «Эталоны и научные приборы» а так же по заказу Российских предприятий в 2014 году разработан и изготовлен измеритель модуля коэффициентов передачи и отражения P4-MVM-37. Измеритель прошел метрологическую аттестацию, рекомендован к установке на производство и является базовой моделью для построения измерителей в других диапазонах частот.

Измеритель обладает следующими метрологическими характеристиками:

- диапазон рабочих частот 25,95 – 37,5 ГГц;
- погрешность установки частоты не более  $\pm 0,001$  %;
- кратковременная нестабильность частоты не более  $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-8}$  Гц;
- пределы измерения модулей коэффициентов отражения от 0 до минус 32 дБ;
- пределы измерения модулей коэффициентов передачи от 0 дБ до минус 60 дБ;
- основная погрешность измерения модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  – не более  $\pm(0,2+0,03 \cdot |S_{11}|)$ ;
- основная погрешность измерения модуля коэффициента передачи  $|S_{21}|$  – не более  $\pm(0,2+0,02 \cdot |S_{21}|)$ .

Для измерения как амплитудных, так и фазовых параметров применяются векторные анализаторы цепей (ВАЦ).

Работа ВАЦ основана на принципе направленного ответвления падающей на объект измерения (ОИ) и отраженной (или прошедшей) от него волн СВЧ сигнала, распространяющихся в измерительном тракте анализатора; формирования и выделения напряжений, несущих информацию о реальных составляющих измеряемых S-параметров; усиления и дискретного преобразования этих напряжений; вычисления с помощью прямого и обратного преобразований Фурье сигналов, несущих информацию, и мнимых составляющих S-параметров; вычисления значений измеряемых параметров по специальным алгоритмам с использованием параметров калибровки; воспроизведения частотных зависимостей измеряемых параметров либо в полярной (параметры  $S_{11}$  и  $S_{22}$ ), либо в декартовой системе координат (все S-параметры) с отсчетом значений  $S_{ij}$  на любой частоте (в пределах диапазона рабочих частот ВАЦ) [5].

Структурная схема ВАЦ гомодинного типа, работающего в диапазоне частот 78,33–118,10 ГГц, приведена на рис. 5.

Представленный вариант ВАЦ обладает расширенным динамическим диапазоном, малой погрешностью измерений модулей S-параметров (не более  $\pm 0,2$  дБ) и достаточно низкой стоимостью в сравнении с зарубежными аналогами. ВАЦ позволяет одновременно измерить все 8 параметров исследуемого устройства без его отключения и перестыковки, а также позволяет подключать объекты измерений любых габаритов за счет выполнения СВЧ измерительного тракта в виде двух блоков. Данное схемное решение защищено патентом [9].

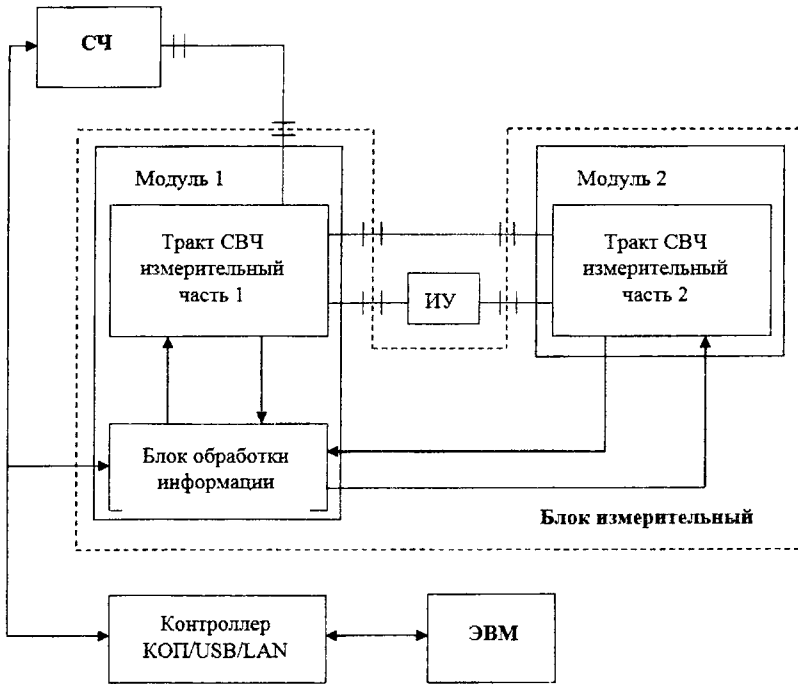


Рис. 5. Структурная схема ВАЦ

Еще одной особенностью разработанного ВАЦ является ПО, позволяющее в реальном масштабе времени отображать результаты измерений и активно воздействовать на процессы калибровки и обработки результатов измерений. Управление по стандартным интерфейсам позволяет объединить несколько анализаторов для различных частотных диапазонов в информационно-измерительную систему [7,8].

При проектировании ВАЦ была разработана математическая модель СВЧ измерительного тракта при использовании калибровочных мер и специального алгоритма калибровки, что позволило добиться расширения функциональных возможностей и повышения точностных характеристик ВАЦ [6].

Результаты экспериментальных исследований, проведенных при использовании образцового поляризационного аттенюатора и набора калибровочных мер фазового сдвига, показали следующее:

- пределы измерения  $|S_{11}|$  и  $|S_{22}|$  от 0 до минус 32 дБ;
- пределы измерения  $|S_{21}|$  и  $|S_{12}|$  четырехполюсников от +30 до минус 60 дБ;
- пределы измерения аргументов всех S-параметров от 0 до  $360^\circ$  или от минус  $180^\circ$  до  $+180^\circ$ ;

- основная погрешность измерения  $|S_{11}|$  и  $|S_{22}|$  не более  $\pm(0,2+0,04|S_{11(22)}|)$  дБ;
- основная погрешность измерения  $|S_{21}|$  и  $|S_{12}|$  не более  $\pm(0,2+0,03|S_{21(12)}|)$  дБ;
- основная погрешность измерения  $\arg S_{11}$  и  $\arg S_{22}$  не более  $\pm(3,5^\circ+0,1|S_{11(22)}|)$ ;
- основная погрешность измерения  $\arg S_{21}$  и  $\arg S_{12}$  не более  $\pm(2,5^\circ+0,1|S_{21(12)}|)$ .

Все разработанные радиоизмерительные приборы имеют возможность их дистанционной калибровки, заключающейся в доставке транспортируемых эталонных средств измерения к месту работы калибруемого измерительного прибора и проведении калибровки на этом месте. Расположенная в калибровочной лаборатории ЭВМ дистанционно управляет проведением измерений, что позволяет сократить время калибровки в 3 раза, снизить стоимость калибровки в 1,5 раза [10, 11].

### *Вольтметр*

Измерение выходного напряжения калориметров осуществляется при помощи вольтметров В7-72 разработанных в ОАО «МНИПИ» (Минский научно-исследовательский приборостроительный институт). Вольтметр В7-72 является малогабаритным прибором высокого класса точности с большими функциональными возможностями и малым энергопотреблением.

Вольтметр способен измерять напряжение постоянного тока в диапазоне от 2 мкВ до 1000 В с погрешностью  $\pm(0,003-0,004)\%$ , может быть включен в автоматизированную измерительную систему при помощи интерфейсов GPIB или RS-232, обеспечивает хранение до 500 результатов измерений во внутреннем ОЗУ, математическую обработку результатов измерений (10 программ), содержит цифровой фильтр.

### **Коррекция погрешностей измерений, вызванных рассогласованием**

При проведении калибровок калибратора мощности и измерительных преобразователей СВЧ мощности производится коррекция погрешностей измерения, вызванных рассогласованием. Эти погрешности могут быть рассчитаны с большой точностью, если известны комплексные коэффициенты отражения (ККО) всех элементов тракта СВЧ. Далее эти данные учитываются при обработке результатов измерений.

Данная методика применяется всеми без исключения производителями современной аппаратуры СВЧ. Одним из примеров

использования данной методики служит процесс калибровки измерителей мощности СВЧ в компании Rohde & Schwarz [12].

При отсутствии полного согласования выходного сопротивления источника мощности и измерительного преобразователя ваттметра происходит отражение энергии от преобразователя, вследствие чего в линии возникает стоячая волна. В результате величина мощности, которая поглощается преобразователем  $P_{ABS}$ , отличается от падающей мощности  $P_{INC}$  и связана с ней соотношением:

$$P_{ABS} = P_{INC} * (1 - \Gamma_{DUT}), \quad (6)$$

где  $\Gamma_{DUT}$  – ККО преобразователя.

Коррекция значений калибровочных коэффициентов (2) и (4) проводится с использованием значений ККО элементов СВЧ тракта и исследуемых измерительных преобразователей.

Калибровочный коэффициент калориметра калибратора мощности с учетом коррекции  $K_{THRU\_COR}$  определяют по формуле:

$$K_{THRU\_COR} = K_{THRU} / |1 + \Gamma_{TERM} * \Gamma_{THRU}|^2, \quad (7)$$

где  $K_{THRU}$  – калибровочный коэффициент калориметра, рассчитанный по формуле (2);  $\Gamma_{TERM}$  – ККО эталонного калориметра;  $\Gamma_{THRU}$  – ККО калибратора мощности.

Калибровочный коэффициент испытываемого измерительного преобразователя с учетом коррекции  $K_{DUT\_COR}$  определяется по формуле:

$$K_{DUT\_COR} = K_{DUT} * |1 + \Gamma_{THRU} * \Gamma_{DUT}|^2, \quad (8)$$

где  $K_{DUT}$  – калибровочный коэффициент испытываемого измерительного преобразователя, рассчитанный по формуле (4);  $\Gamma_{DUT}$  – ККО испытываемого измерительного преобразователя.

### Измеритель СВЧ мощности

Для удовлетворения спроса отечественных и зарубежных заказчиков в научно-исследовательской испытательной лаборатории аппаратуры и устройств СВЧ БГУИР (MWWMLab) разработаны и изготавливаются ваттметры поглощаемой мощности серии M2-MBM, предназначенные для измерения мощности синусоидальных СВЧ сигналов и среднего значения мощности импульсно-модулированных СВЧ сигналов в диапазоне частот от 0.01 до 220 ГГц.

Основными блоками ваттметров являются измерительный преобразователь, в котором происходит преобразование СВЧ мощности в сигнал доступный для измерения, и измерительный блок с цифровым индикатором, показывающим величину измеряемой мощности в мкВт (мВт).

Измерительный блок является универсальным устройством. К нему, в зависимости от решаемой задачи, может быть подключен любой совместимый с ним измерительный преобразователь, рассчитанный на определенный частотный и динамический диапазон.

Для повышения точности измерения используются частотные коэффициенты (коэффициент преобразования, коэффициент эффективности, коэффициент калибровки), которые определяются в процессе калибровки [13].

Разработанный ваттметр измеряет мощность СВЧ сигналов в диапазоне 1 мкВт – 10 мВт и при помощи интерфейсов GPIB, RS232 или USB, может подключаться в общую компьютерно-измерительную систему эталонного комплекса и проходить калибровку в полностью автоматическом режиме с сохранением калибровочной информации во внутренней памяти прибора. Измерительное устройство может хранить результаты калибровки для нескольких преобразователей и позволяет оперативно загружать нужные данные.

### Заключение

Созданы все предпосылки для создания эталона на основе отечественных приборов и отечественной научной и методической базы. Особенностью эталона будет являться возможность его использования для калибровки и поверки как ваттметров старого образца, серийно выпускавшихся производителями бывшего СССР до 1992 г., так и новых цифровых приборов отечественного (например, ваттметр производства БГУИР серии М2-МВМ) и зарубежного производства.

### Литература

1. Билько М.И., Томашевский А.К. Измерение мощности на СВЧ. – М.: Радио и связь, 1986, 168 с.
2. Гусинский А.В., Кострикин А.М., Дерябина М.Ю. и др. Калибратор для поверки ваттметров малой мощности в диапазоне частот 37,5–178,6 ГГц // Сборник статей 16-ой Международной конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», 2006, с. 809–810.
3. Akhiezer A.N., Senko A.P., Sredniy V.P. Millimeter wave power standards // IEEE Transactions on instrumentation and measurement, № 2, April 1997, p. 495–498.
4. Гусинский А.В., Дерябина М.Ю., Кострикин А.М. и др. Разработка и метрологическое обеспечение измерительной аппаратуры в миллиметровом диапазоне длин волн // Доклады БГУИР, Январь 2004, № 2, с. 199–207.

5. Гусинский А.В., Шаров Г.А., Кострикин А.М. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн. Монография. В 3-х частях. Ч. 1. Основные понятия и представления теории преобразования сигналов и спектрального анализа. – Мн.: БГУИР, 2004, 214 с.
6. Гусинский А.В., Шаров Г.А., Кострикин А.М. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн. Монография. В 3-х частях. Ч. 2. Анализ СВЧ-цепей. – Мн.: БГУИР, 2005, 402 с.
7. Гусинский А.В., Шаров Г.А., Кострикин А.М. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн. Монография. В 3-х частях. Ч. 3 (кн. 1). Принципы построения и анализ схем векторных анализаторов цепей. – Мн.: БГУИР, 2008, 240 с.
8. Гусинский А.В., Шаров Г.А., Кострикин А.М. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн. Монография. В 3-х частях. Ч. 3 (кн. 2). Принципы построения и анализ схем векторных анализаторов цепей. – Мн.: БГУИР, 2008, с. 241–507.
9. Измеритель комплексных параметров СВЧ-устройств: пат. № 6193 Респ. Беларусь, МПК G 01R 27/02 / А.В. Гусинский, А.М. Кострикин; заявитель Бел. гос. ун-т информ. и радиоэл. – № а 19980615; заявл. 01.07.98.
10. Способ дистанционного контроля метрологических характеристик автоматизированных радиоизмерительных приборов диапазона СВЧ: пат. № 12574 Респ. Беларусь, МПК (2006) G 01R 17/00 / А.В. Гусинский, А.М. Кострикин, Т.К. Толочко ; заявитель Бел. гос. ун-т информ. и радиоэл. – № 20061301; заявл. 20.12.06; опубл. 30.10.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. Уласнасці, 2009, № 5.
11. Способ дистанционного контроля метрологических характеристик автоматизированных радиоизмерительных приборов на примере измерителя комплексных параметров СВЧ-устройств : пат. 2379699 Рос. Фед., МПК G01R 35/00 / А.В. Гусинский, А.М. Кострикин, Т.К. Толочко; заявитель Бел. гос. ун-т информ. и радиоэл. – № 2006146568/28; заявл. 25.12.06; опубл. 20.01.10 // Офиц. бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2010, № 2.
12. Герхард Россель, Калибровка измерителей мощности СВЧ в компании Rohde & Schwarz, Контрольно-измерительные приборы и системы ("КИПиС"), №6, декабрь 2006, с. 23-27.
13. Гусинский А.В., Кострикин А.М., Толочко Т.К., Ворошень А.В. и др. Оценка неопределенности измерения коэффициента эффективности ваттметров поглощаемой мощности // Сборник статей 16-й Международной конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», 2006, с. 815–816.