



Рис 5. Изменение частоты  $F_{оп}$  при помощи варьирования выходной частоты генератора опорной частоты, построенного на основе DDS-синтезатора

тоты сигнала в диапазоне 42,5—57,5 Гц с разрешением  $1,3 \cdot 10^{-5}$  Гц разрядность АФ можно снизить до 14—16 бит; для хранения одного периода сигнала в ЗУ потребуется примерно 33—131 кбайт на каждый тракт. Во втором случае при использовании генератора опорной частоты на основе DDS-синтезатора в том же диапазоне частот сигнала, разрешении  $6,0 \cdot 10^{-5}$  Гц, разрядности АФ 24 бит для хранения одного периода сигнала в ЗУ потребуется примерно 2 кбайт

на каждый тракт. Кроме того, этот метод регулирования частоты имеет меньшие джиттер и искажения спектра сигнала по сравнению с методом регулирования частоты АФ. Эти характеристики делают метод регулирования частоты сигнала изменением опорной частоты при помощи опорного DDS-генератора наиболее предпочтительным.

Литература

1. **A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis.** Analog Devices Inc. 1999. [http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/450968421 DDS\\_Tutorial\\_rev12-2-99.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/450968421 DDS_Tutorial_rev12-2-99.pdf) (дата последнего обращения 23.08.10).
2. **Torosyan A., Alan N., Willson Jr.** Exact Analysis of DDS Spurs and SNR due to Phase Truncation and Arbitrary Phase-to-Amplitude Errors // Proc. IEEE Intern. Frequency Control Symp. Vancouver, 2005. P. 50—58.
3. **Nicholas H. T., Samueli H.** An Analysis of the Output Spectrum of Direct Digital Frequency Synthesizers in the Presence Phase-Accumulator Truncation // Proc. 41<sup>st</sup> Annual Frequency Control Symp. Philadelphia, 1987. P. 495—502.
4. **ГОСТ 13109—97.** Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
5. **ГОСТ 22261—94.** Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия.

Дата принятия 06.07.2010 г.

**РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

621.317.7

**Создание нового поколения радиоизмерительной аппаратуры миллиметрового диапазона**

**О. П. ПАВЛОВСКИЙ, А. В. ЧЕРНОГУБОВ, И. Г. МАЛЬТЕР**

Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц», Н. Новгород, Россия, e-mail: kvarz\_asu@sinn.ru

Отмечен значительный рост применения радиоаппаратуры миллиметрового диапазона длин волн, в том числе радиоизмерительной аппаратуры. Отмечено наличие узловой базы для создания наиболее используемых в технике измерений приборов данного диапазона. Рассмотрен вопрос метрологического обеспечения новой аппаратуры при ее разработке, эксплуатации и ремонте.

**Ключевые слова:** радиоизмерительная аппаратура, миллиметровый диапазон длин волн.

The significant rise of millimeter wavelength range radioequipment application including radiomeasuring instruments is noted. The availability of nodal base for the creation of given wavelength range instruments mostly used in measurement engineering is noted. The question of metrological support for the new equipment at its development, exploitation and repair is considered.

**Key words:** radiomeasuring equipment, millimeter wavelength range.

В настоящее время в областях техники, где используются радиосигналы, происходит интенсивное освоение миллиметрового диапазона (ММД) длин волн (частоты выше 30 ГГц).

Эти сигналы применяются в радиолокации, радиосвязи, навигации, радиоастрономии, радиоспектроскопии, а также в областях промышленности, связанных с разработкой и вы-

пуском товаров бытового назначения. Радиоволны ММД охватывают чрезвычайно широкий диапазон частот, существенно превышающий ранее находившийся в распоряжении разработчиков радиоаппаратуры. Научно-технические достижения и проблемы развития техники ММД радиоволн подробно рассмотрены в [1—3].

Различные направления радиотехники требуют создания радиоизмерительных приборов (РИП) нового поколения. Использование старого парка приборов выпуска 80-х и начала 90-х годов прошлого века, находящихся в обращении до настоящего времени, в большинстве случаев не позволяет провести разработку и эксплуатацию аппаратуры, по своим техническим характеристикам отвечающей современным требованиям.

Характерной особенностью радиоизмерительной аппаратуры (РИА) является, как правило, ее широкодиапазонность по частоте измеряемых сигналов. Хотя значительная часть радиотехнических средств работает на фиксированных частотах, радиоизмерительный прибор, решающий ту или иную измерительную задачу, создается для широкого диапазона частот, чтобы удовлетворить наибольшее количество потребителей. Ниже рассмотрены виды РИП (а также кратко их технические характеристики), создание которых наиболее актуально.

**Требуемая номенклатура приборов. Технические характеристики.** Для разработки, производства и эксплуатации новой техники в ММД частот нужны разнообразные РИП: измерительные генераторы сигналов, электронно-счетные частотомеры, измерители мощности, анализаторы спектра, измерители параметров цепей, измерительные антенны, измерители плотности потока электромагнитной энергии и некоторые другие высокоточные приборы. В настоящее время разработкой таких приборов занимается ряд зарубежных фирм, ведущими из которых являются Agilent Technologies (АТ) и Militech (США), Rohde & Schwarz (Германия), Anritsu (Япония). Средства измерений ММД созданы практически по всем группам приборов. Выпускаемые РИП постоянно совершенствуются, что позволяет максимально удовлетворять все возрастающие требования потребителей радиоаппаратуры. Интенсивно осваиваются коаксиальные тракты малых сечений в диапазоне частот до 50 ГГц и выше (до 110 ГГц), что повышает эксплуатационные возможности радиоаппаратуры. Обзор состояния разработок и производства отечественной и зарубежной РИА в рассматриваемом диапазоне дан в [4], где кратко очерчен круг измерительных задач и определена номенклатура требуемых на практике РИП. Необходимо отметить, что РИП первого поколения разрабатывались в 80-х годах прошлого столетия в Литве и к настоящему времени все полученные результаты утрачены.

*Измерительные генераторы* первого поколения в нашей стране в основном базировались на малогабаритных лампах обратной волны (ЛОВ). За рубежом отсутствие источников прямого генерирования привело к созданию миллиметровых блоков, в которых использован принцип умножения частоты синтезированных источников сигналов сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона (фирмы Hewlett Packard (США), Anritsu). В настоящее время подобные миллиметровые блоки до частоты 325 ГГц выпускают фирмы АТ, OML (США), Anritsu. Такие блоки имеют существенный недостаток, заключающийся в низком уровне мощности выходного сигнала (на частоте 325 ГГц не более 0,003 мВт), однако обеспечивают «кварцевую» стабильность его частоты, что

выгодно отличает эти приборы от генераторов сигналов типов Г4-141, Г4-142, Г4-149 в общем диапазоне частот 37,5—118,1 ГГц, в которых применен принцип прямого генерирования на ЛОВ. Стабилизация частоты выходного сигнала генератора на ЛОВ непосредственно в ММД, хотя и поддерживает высокий уровень выходного сигнала, приводит к значительному увеличению габаритных размеров и массы прибора [5, 6].

В настоящее время серийный выпуск ЛОВ в нашей стране прекращен, что диктует разработку измерительных генераторов нового поколения с использованием принципа умножения частоты. При этом приборы должны иметь следующие технические характеристики: диапазон частот 78,33—178,4 ГГц, в котором ведется интенсивные работы по созданию аппаратуры и систем различного назначения; дискретность перестройки частоты не более 10 Гц; относительную погрешность частоты в пределах  $\pm 3 \cdot 10^{-7}$  за 1 год; уровень мощности выходного сигнала не менее 100 мкВт на частотах до 178,4 ГГц; основную погрешность установки опорного уровня в пределах  $\pm 2,0$  дБ; регулирование выходного уровня от 0 до  $-10$  дБ.

В приборе должны обеспечиваться режим внешней импульсной модуляции при длительности импульса 0,1—10000 мкс и режим внешней частотной модуляции синусоидальным напряжением с частотой 0,1—1 МГц. Прибор должен обладать минимальными габаритными размерами и массой, а в целом соответствовать требованиям стандарта [7].

*Измерители мощности* (ваттметры) начали разрабатывать в СССР в 50-х годах. В качестве чувствительных элементов в них использовали термисторы. Теперь их заменили термопары при уровне мощности от долей микроватт до 10 мВт. При измерении уровня мощности  $10^{-5}$ — $10^{-1}$  Вт применяют сухие калориметрические преобразователи. За рубежом в ваттметрах используют термоэлектрические или диодные преобразователи. В нашей стране первоочередной задачей является разработка ваттметра в диапазонах частот 78,33—178,4 ГГц и измеряемых мощностей  $3 \cdot 10^{-7}$ — $1 \cdot 10^{-2}$  Вт. Прибор должен иметь пределы основной относительной погрешности (в процентах) без учета погрешности рассогласования  $\pm [10 + 0,2 (P_k / P_x - 1)]$ , где  $P_k$  — конечное значение мощности в установленном поддиапазоне измерений при измерении значений мощности  $P_x$  от 10 мкВт до 10 мВт, и  $\pm [20 + 0,25 (P_k / P_x - 1)]$  при измерении мощности от 0,3 до 1 мВт. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) входа преобразователя не должен превышать 1,4. Ваттметр должен быть устойчив к перегрузкам по уровню мощности до 15 мВт и соответствовать требованиям стандарта [8].

*Измерители плотности потока энергии* (ППЭ) электромагнитного поля служат для определения интенсивности излучения в окружающей среде и выпускаются только в диапазоне частот 0,3—40 ГГц. В связи с расширением сферы применения радиоволн ММД как в специальных производствах и объектах эксплуатации радиоэлектронного оборудования, так и в области гражданского использования (сотовые и радиотелефоны, СВЧ-печи и т. п.) резко возросло понимание биологических последствий воздействия их энергии на организм человека. Появилась потребность в оценке степени биологической опасности излучений радиоволн ММД на соответствие требованиям действующих санитарных норм.

Изучение нормативной документации, регламентирующей уровни электромагнитных излучений, приводит к необ-

ходимости разработки измерителя плотности потока энергии со следующими характеристиками: общий диапазон частот 37,5—178,4 ГГц с разбивкой, соответствующей поддиапазонам частот стандартных прямоугольных волноводов; диапазон измерений плотности потока энергии 0,3— $1 \cdot 10^5$  мкВт/см<sup>2</sup> с погрешностью измерений в пределах  $\pm 3,0$  дБ. Прибор должен иметь встроенный аккумулятор со временем непрерывной работы не менее 8 ч, быть малогабаритным (масса не более 2 кг) и обеспечивать работу вне помещения с использованием штатива.

Электронно-счетные частотомеры (ЭСЧ) впервые стали упоминаться за рубежом в середине 80-х годов. В нашей стране несколько позже были разработаны частотомеры типов РЧЗ-72 (37,5—118,1 ГГц) и РЧЗ-73 (118,1—178,4 ГГц), которые имели недостатки, связанные с измерением частоты импульсно-модулированных сигналов. В настоящее время эти приборы серийно не выпускаются.

Новое поколение ЭСЧ должно отвечать следующим основным требованиям: общий диапазон частот 37,5—178,4 ГГц; измерение среднего значения частоты непрерывного сигнала за время счета 100 мкс, 1, 10, 100 мс и 1 с; измерение среднего значения несущей частоты импульсно-модулированного сигнала с минимальной длительностью импульса 0,1 мкс с диапазоном частот следования импульсов 0,1—1000 кГц при уровне мощности сигнала 0,1—3 мВт; относительная погрешность внутреннего опорного генератора по частоте  $\pm 3 \cdot 10^{-8}$  за 1 год. В целом приборы должны соответствовать требованиям стандарта [9].

Измерители коэффициентов передачи и отражения (анализаторы цепей) широко используют при создании современных и перспективных изделий техники.

Рассматриваемый тип прибора подразделяется на два подвида: измерители комплексных коэффициентов передачи отражения, или векторные анализаторы цепей, и измерители модулей коэффициентов передачи отражения, или скалярные анализаторы цепей. Первоочередной задачей является создание в ММД более простых измерителей модулей коэффициентов передачи и отражения со следующими характеристиками: диапазон частот 37,5—178,4 ГГц; измеряемые значения КСВН  $K = 1,1 \dots 5$  с пределами основной погрешности измерений  $\pm (5K + 6)$  в диапазоне частот выше 78,33 ГГц; диапазон измерений ослабления 0—35 дБ на этих частотах с погрешностью измерений  $\pm (0,8 + 0,08A)$  при  $A > 30$  дБ, где  $A$  — ослабление. Дискретность перестройки по частоте, на которой проводятся измерения, не более 1 кГц с пределами допустимой относительной погрешности частоты внутреннего опорного генератора  $\pm 3 \cdot 10^{-7}$  за 1 год.

Перечисленные выше приборы пользуются наибольшим спросом и необходимы для контроля параметров радиоаппаратуры. Их создание позволит решить основной комплекс задач при разработке, испытаниях и эксплуатации новейшей аппаратуры в рассматриваемом диапазоне частот. В более поздние сроки должны быть разработаны приборы более сложные в схемном и конструктивном отношении (измерители комплексных коэффициентов передачи и отражения, панорамные анализаторы спектра, синтезаторы частот с уровнем мощности выходного сигнала 5—10 мВт, гене-

раторы шума), а также устройства, расширяющие области использования указанных приборов, такие как развязывающие аттенюаторы с ослаблением до 30 дБ, поляризационные аттенюаторы с динамическим диапазоном 0—60 дБ и высокой точностью установки ослабления (погрешность не более  $\pm 0,02A$ , где  $A$  — установленное значение ослабления). Поскольку волноводные соединители всех без исключения приборов и устройств должны соответствовать стандарту [10], чрезвычайную актуальность приобретает создание комплексных калибров на каждое волноводное сечение, что позволит осуществлять проверку соответствия размеров волноводных фланцев установленным нормам.

**Узловая база РИА миллиметрового диапазона.** Создание РИА требует разработки различных унифицированных узлов, обладающих высокими техническими характеристиками в широком диапазоне частот. К таким узлам относятся: задающие автогенераторы СВЧ-диапазона для формирования путем последующего умножения по частоте сигнала ММД, направленные ответвители, электрически управляемые аттенюаторы, согласованные, рассогласованные и короткозамкнутые нагрузки, фильтры нижних частот (полосовые), детекторные устройства, волноводные соединители, волноводные изгибы, волноводы диэлектрические.

*Направленные ответвители* представляют собой двухканальное устройство, предназначенное для отвода части мощности сигнала из основного канала во вторичный, реагирующий на волну, распространяющуюся в основном канале в одном из двух возможных направлений. Такие ответвители используют в генераторах сигналов для формирования уровня выходного сигнала, синтезаторах частоты для выведения части мощности для обеспечения работы системы фазовой автоподстройки частоты, измерителях коэффициентов прохождения и отражения для оценки уровня проходящего и отраженного сигналов. Теоретические основы создания таких устройств изложены в [11].

Конструктивно ответвитель состоит из диафрагмы с отверстиями связи, двух крышек, образующих вместе с диафрагмой основной и вторичный волноводные каналы. Отверстия связи в диафрагме и волноводные каналы выполняются с допуском  $\pm 0,005$  мм. Технические характеристики волноводных ответвителей приведены в табл. 1.

Аналогичные устройства разработаны по стандартам МЭК с разбивкой на поддиапазоны 33—50, 50—75, 75—110 и 110—170 ГГц.

*Задающие автогенераторы СВЧ-диапазона*, применяющиеся для формирования сигнала крайне высокочастотного (КВЧ) диапазона путем умножения частоты сигнала СВЧ, достаточно подробно описаны в [11]. По своим техническим характеристикам и конструктивному исполнению они постоянно совершенствуются (снижаются габаритные размеры, увеличивается полоса частот модулирующей катушки и т. д.).

*Электрически управляемые аттенюаторы* служат для выравнивания уровня мощности выходного сигнала в диапазоне частот при помощи системы АРМ. В их конструкции использованы *pin*-диоды, принципы построения подробно изложены в [11]. Технические характеристики аттенюаторов представлены в табл. 2.

Таблица 1

Технические характеристики волноводных ответвителей

Диапазон частот, ГГц (сечение волновода, мм)	Среднее значение переходного ослабления, дБ	Неравномерность переходного ослабления, дБ	Направленность переходного ослабления, дБ	КСВН первичного канала	Габаритные размеры, мм
37,5—53,57 (5,2×2,6)	3 ± 1	±0,7	25	1,25	25×23×111
	6 ± 1	±0,6	30	1,20	
	10 ± 1	±0,6	34	1,20	
	20 ± 1	±0,7	34	1,20	
53,57—78,33 (3,6×1,8)	3 ± 1	±0,7	25	1,25	25×27×92
	6 ± 1	±0,6	30	1,20	
	10 ± 1	±0,6	36	1,20	
78,33—118,1 (2,4×1,2)	3 ± 1	±0,7	25	1,25	25×27×74
	6 ± 1	±0,6	30	1,20	
	10 ± 1	±0,6	33	1,20	
	20 ± 1	±0,6	33	1,20	
118,1—178,4 (1,6×0,8)	3 ± 1	±0,8	25	1,3	25×27×74
	6 ± 1	±0,8	25	1,25	
	10 ± 1	±0,8	30	1,25	

Таблица 2

Технические характеристики аттенуаторов

Диапазон частот, ГГц (сечение волновода, мм)	Потери пропуска- ния, дБ, не более	Ослабление, дБ, не менее	КСВН в режиме пропускания	Время переключения, нс	Габаритные размеры, мм (масса, г)
37,5—53,57 (5,2×2,6)	1,8	30	1,5	20	37×22×23 (70)
53,57—78,33 (3,6×1,8)	3,0	25	2,5	20	25×30×20 (100)
78,33—118,1 (2,4×1,2)	4,0	20	—	20	18×27×18 (70)

Нагрузки различных типов широко применяют при конструировании узлов (направленных ответвителей, стробоскопических преобразователей), а также в качестве калибровочных устройств (измерители коэффициентов передачи и отражения). Технические характеристики фиксированных согласованных нагрузок приведены в табл. 3.

Волноводные подвижные нагрузки позволяют снизить КСВН до 1,03 во всем диапазоне частот.

Технические характеристики волноводных рассогласованных нагрузок представлены в табл. 4.

Таблица 3

Технические характеристики фиксированных согласованных нагрузок

Диапазон частот, ГГц (сечение волновода, мм)	КСВН	Габаритные размеры, мм
37,5—53,57 (5,2×2,6)	1,03	∅20×39,6
53,57—78,33 (3,6×1,8)	1,03	∅20×34
78,33—118,1 (2,4×1,2)	1,05	∅16×23,3
118,1—178,4 (1,6×0,8)	1,07	∅16×21

Таблица 4

Технические характеристики волноводных рассогласованных нагрузок

Диапазон частот, ГГц (сечение волновода, мм)	КСВН	Частотная зависимость КСВН	Погрешность аттестации КСВН, %	Габаритные размеры, мм
37,5—53,57 (5,2×2,6)	1,4	1,38—1,42	2,5	∅20×72
	2,0	1,96—2,03		
53,57—78,33 (3,6×1,8)	1,4	1,38—1,42	3,0	∅20×72
	2,0	1,96—2,03		
78,33—118,1 (2,4×1,2)	1,4	1,38—1,42	3,0	∅16×54
	2,0	1,96—2,03		

Во всем диапазоне частот могут быть изготовлены подвижные короткозамкнутые нагрузки с КСВН не менее 10 в режиме отражения.

Технические характеристики волноводных фильтров

Диапазон частот, ГГц (сечение волновода, мм)	Полоса, ГГц		Верхняя полоса заграждения, ГГц	Потери, дБ			КСВН
	пропускания	заграждения		в полосе пропускания	на граничных частотах	выше полосы заграждения	
37,5—53,57 (5,2×2,6)	37,8—40,0 48,5—55,0	0—37,0 0—46,7	43,0—51,0 58,2—67,0	0,6 0,8	30	50	1,6 1,8
53,57—78,33 (3,6×1,8)	55,16—55,35	0—54,9	55,6—78,2	3,0	30	35	1,35
78,33—118,1 (2,4×1,2)	87,2—101,0	0—83,9	108,8—130,6	0,9	30	30	1,85
118,1—178,4 (1,6×0,8)	141,5—152,6	0—140	154—170	2,0	29	30	1,5

Фильтры предназначены для выделения из спектра сложного колебания тех частотных составляющих, которые находятся в полосе пропускания фильтра. Теоретические основы создания фильтров различных типов изложены в [11].

Технические характеристики волноводных фильтров приведены в табл. 5.

Рассматриваемые типы фильтров используют в измерительных генераторах сигнала и измерителях коэффициента передачи и отражения.

Детекторные устройства широко применяют для стабилизации уровня сигнала в диапазоне частот генераторов сигнала, синтезаторах частот и других приборах, при измерении уровней падающих и отраженных волн в измерителях параметров цепей. Особенности построения детекторных устройств с использованием низковольтных диодов Шоттки рассмотрены в большом количестве работ и кратко изложены в [11].

Технические характеристики детекторов в ММД при максимальной мощности входного сигнала 20 мВт содержатся в табл. 6.

Изгибы волноводов в E- и H-плоскостях используют при компоновке волноводных узлов в приборе. Они обеспечивают КСВН не более 1,15 при повороте на 90° по широкой или узкой стороне волновода во всем диапазоне частот.

Таблица 6

Технические характеристики детекторов волноводного диапазона

Диапазон частот, ГГц (сечение волновода, мм)	Чувствительность детектирования, мВ/мВт	Неравномерность чувствительности, дБ
37,5—53,57 (5,2×2,6)	1500	±1
53,57—78,33 (3,6×1,8)	1000	±1,5
78,33—118,1 (2,4×1,2)	700	±2,0
118,1—178,4 (1,6×0,8)	300	±2,5

**Технологические особенности разработки и изготовления РИА.** Технологические приемы при изготовлении аппаратуры ММД значительно отличаются от обычных методов обработки радиотехнических деталей из-за высоких требований к точности геометрических размеров, формы, взаимного расположения поверхностей, а также чистоте обработки. Следует отметить, что для сечений указанных прямоугольных волноводов в зависимости от их размеров допускаются отклонения в диапазоне ± (0,005—0,012) мм, в то время как для серийных волноводных труб повышенной точности отклонения колеблются от ± 0,02 до +0,1 и -0,05 мм. Поэтому точные волноводные каналы изготавливают с применением комплектов протяжек, разверток, дорнов и достаточно сложной технологии.

Фланцевые соединения волноводов представляют комплекс связанных между собой элементов, выполненных с высокой точностью и расположенных с минимальными допусками: размеры волноводных каналов — погрешность до ± 0,012 мм; плоскостность рабочей поверхности фланцев — допуск 0,005—0,015 мм; перпендикулярность плоскости фланца к оси волноводного канала — допуск до 0,03 мм; межцентровые расстояния штифтовых отверстий — допуск ± 0,002 мм; расположение штифтовых отверстий относительно волноводного канала — допуск 0,02 мм; размеры соединительных штифтов — отклонение 0,016—0,010 мм. Изготовление и калибровка каналов требуют сложных технологий, специальной оснастки и весьма трудоемки.

Поглотители для нагрузок и направленных ответвителей изготавливают методом прессования из поглощающего материала, состоящего из карбонатного железа и полиэтилена, что гарантирует значение КСВН не более 1,05.

Детали корпусов с элементами волноводных каналов формируют различными способами. Используют волноводные трубы с применением гибок и скруток; в ряде случаев, например, для короткозамкнутых и эталонных нагрузок, каналы формируют в цельном материале с помощью комплекта инструментов. Канал изготавливают из нескольких частей, которые после покрытия деталей соединяют штифтами и затягивают винтами.

Сечение волновода необходимо проверять по высоте и ширине, например, при помощи пневмокалибров. Размеры волновода по высоте можно контролировать с помощью цилиндрических стержней, имеющих шаг 0,01 мм, или микроскопа.

Разрабатываемые приборы и приборы для их поверки и контроля

Тип разрабатываемого прибора	Тип прибора для поверки и контроля									
	Генераторы сигналов Г4	Измерители мощности М3	Частотомеры электронно-счетные Ч3	Измерительные аттенюаторы Д3	Измерители коэффициентов передачи и отражения Р2, Р4	Анализаторы спектра СК4	Развязывающие аттенюаторы Д5	Антенны измерительные П6	Синтезаторы частот Г7	Установка для измерения ослабления ДК1
Генераторы сигналов Г4	<input type="checkbox"/>	+	+	-	+	+	-	+	+	-
Измерители мощности М3	-	<input type="checkbox"/>	-	-	+	-	+	-	+	-
Частотомеры электронно-счетные Ч3	+	+	<input type="checkbox"/>	-	-	-	+	-	+	-
Измерительные аттенюаторы Д3	-	-	-	<input type="checkbox"/>	+	-	-	-	-	+
Измерители коэффициентов передачи и отражения Р2, Р4	-	-	-	+	<input type="checkbox"/>	-	-	-	-	-
Генераторы шума ГШ	-	+	-	+	+	+	-	-	+	-
Анализаторы спектра СК4	-	+	-	+	+	<input type="checkbox"/>	+	+	+	-
Измерители ППЭ П3	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-
Развязывающие аттенюаторы Д5	-	-	-	-	+	-	<input type="checkbox"/>	-	-	+
Антенны измерительные П6	+	+	-	-	+	-	-	<input type="checkbox"/>	-	-
Синтезаторы частот Г7	-	+	+	+	-	+	+	+	<input type="checkbox"/>	-
Установка для измерения ослабления ДК1	-	-	-	-	+	-	-	-	+	<input type="checkbox"/>

Насущной задачей является замена механической обработки деталей с использованием универсальных прецизионных станков на более современные с применением обрабатывающих центров с числовым программным управлением (ЧПУ) и совершенного твердосплавного инструмента, что позволит резко повысить производительность труда. Внедрение новых технологий обеспечит скоростную сверхпрецизионную обработку каналов и прилегающих поверхностей на специализированных трехосевых обрабатывающих центрах с использованием обработанных на станках с ЧПУ заготовок.

Для скоростной обработки каналов и деталей узлов должны применяться специальные фрезы (0,3—3,0 мм) из мелкодисперсных твердых сплавов, у которых уменьшение «зерна» существенно повышает твердость и изгибную прочность. Это, в свою очередь, повышает прочность режущей кромки и уменьшает износ.

Применение автоматизированного оборудования с ЧПУ в сочетании со скоростной прецизионной обработкой позволяет проводить своевременную технологическую подготовку производства типовых и унифицированных деталей, создавать и проверять соответствующие программы для станков с ЧПУ с использованием необходимого инструмента и оснастки, ограничивать количество прецизионного оборудования и увеличивать загрузку станков при мелкосерийном производстве узлов и деталей, сокращать трудозатраты.

**Метрологическое обеспечение РИП миллиметрового диапазона.** При разработке нового прибора требуется значительное количество различных РИП, каждый из которых обеспечивает измерение того или иного параметра. При измерении различных параметров могут потребоваться приборы СВЧ и КВЧ. Ситуация с измерением СВЧ-параметров нового прибора не вызывает опасения, в то время как измерения КВЧ-параметров в ряде случаев затруднены (измерения спектральных составляющих сигналов и др.). Сложность разработки требуемых приборов связана с тем, что с целью метрологического обеспечения всю совокупность работ необходимо проводить одновременно. Зависимость каждого из предлагаемых к разработке приборов от остальных приборов с точки зрения метрологии поясняется табл. 7.

В том случае, если нужный для проведения измерений прибор отсутствует, его необходимо заменить набором устройств. Например, вместо отсутствующего синтезатора частот при измерении фазовых шумов сигнала генератора использовать синтезатор частот СВЧ-диапазона и стробоскопический преобразователь или гармониковый смеситель для переноса спектра сигнала генераторов в диапазон СВЧ.

**Выводы.** Приведенный анализ показывает необходимость создания нового поколения радиоизмерительных приборов, технические возможности для этого в настоящее время имеются.

Л и т е р а т у р а

1. **Борзов А. Б. и др.** Научно-технические достижения и проблемы развития техники миллиметрового диапазона радиоволн // Зарубежная радиоэлектроника. 2001. № 4. С. 18—80.

2. **Борзов А. Б. и др.** Радиолокационные системы: научно-технические достижения и проблемы развития техники миллиметрового диапазона радиоволн // Успехи современной радиоэлектроники. 2001. № 5. С. 3—49.

3. **Бецкий О. В., Ярошенко Ю. Г.** Миллиметровые волны и перспективные области их применения // Зарубежная радиоэлектроника. 2002. № 5. С. 42—50.

4. **Мальтер И. Г. и др.** Отечественная и зарубежная радиоизмерительная аппаратура миллиметрового диапазона // Измерительная техника. 2009. № 9. С. 50—55; **Mal'ter I. G. et al.** Russian and foreign millimeter band radio measuring instruments // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 9. P. 997—1005.

5. **Krupnov A. F., Pavlovsky O. P.** Commercial Frequency Synthesizer of 118—178 GHz Range // Intern. J. Infrared and Millimeter Waves, 1994. V. 15. N 10. P. 1611—1624.

6. **Коршунов В. А., Павловский О. П.** Первый отечественный синтезатор частот Г7-15 миллиметрового диапазона // Вестник метролога. 2008. № 2. С. 21—24.

7. **ГОСТ 9788—89 (СТ СЭВ 5403—85).** Генераторы сигналов измерительные. Общие технические требования и методы испытаний.

8. **ГОСТ 13605—91.** Ваттметры СВЧ. Общие технические требования и методы испытаний.

9. **ГОСТ 22335—98.** Частотомеры электронно-счетные. Общие технические требования и методы испытаний.

10. **ГОСТ Р 51914—2002.** Элементы соединения СВЧ-трактов электронных измерительных приборов. Присоединительные размеры.

11. **Кудрявцев А. М. и др.** Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы: Коллективная монография / Под. ред. А. М. Кудрявцева. М.: Радиотехника, 2006. С. 208.

Дата принятия 06.07.2010 г.

## ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

621.039.8.002:621.039.554:539.16.163

### Ядерно-физические методы контроля закрытых радионуклидных источников на основе высокоактивного радионуклида $^{60}\text{Co}$

**Н. Ф. ДЕМЧЕНКО, Р. Н. МИНВАЛИЕВ, И. В. РОГОЖИНА, М. М. САЛИКОВ, В. И. ШИПИЛОВ**

Государственный научный центр научно-исследовательского института атомных реакторов (ГНЦ НИИАР), Димитровград, Россия, e-mail: nik\_demchenko@mail.ru

Рассмотрены два основных метода для измерения мощности экспозиционной дозы (МЭД) и определения активности источников гамма-излучения на основе радионуклида  $^{60}\text{Co}$ : прямых измерений и относительных измерений (метод компаратора), а также схема передачи размера единиц МЭД и эквивалентной ей активности от средств измерений 1-го разряда серийным источникам 3-го разряда.

**Ключевые слова:** источники ионизирующего излучения, мощность экспозиционной дозы, эквивалентная активность.

Two basic methods for exposure dose capacity measurement (EDC) for gamma-radiation sources based on  $^{60}\text{Co}$  radionuclide are considered: the method of direct measurements and the method of relative measurements (the comparator method), also the transfer of the EDC unit size and of equivalent activity from measuring instruments of 1<sup>st</sup> category to series sources of 3 category.

**Key words:** sources of radiation, exposure dose capacity, equivalent activity.

Источники  $\gamma$ -излучения на основе  $^{60}\text{Co}$ , выпускаемые в ГНЦ НИИАР, изготавливают из металлического природного  $^{59}\text{Co}$ , облученного в нейтронном потоке реактора. Высокая плотность нейтронного потока реактора позволяет получать  $^{60}\text{Co}$  с удельной активностью до  $1,5 \cdot 10^{13}$  Бк/г (400 Ки/г). Это дает возможность при сохранении типоразмеров изготавливать источники с более высокими значениями мощности экспозиционной дозы (МЭД) или при ее сохранении полу-

чать источники меньших размеров, что повышает их конкурентоспособность на российском и мировом рынках.

Измерение активности высокоактивных источников ионизирующего излучения (ИИИ) при их массовом изготовлении представляет собой непростую задачу. Это связано, прежде всего, с тем, что необходимо сочетать оперативность измерений с достаточной степенью точности. В связи с этим в радиохимическом объединении ГНЦ НИИАР разработан и