

УДК 621.317.727

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ АТТЕНУАТОРОВ**

В.Л. Ким, Д.С. Чебуренко, М.Л. Иванов

Томский политехнический университет  
E-mail: kimval11@rambler.ru

**Ким Валерий Львович**, д-р техн. наук, профессор кафедры вычислительной техники Института кибернетики ТПУ. E-mail: kimval11@rambler.ru  
Область научных интересов: электронные и микропроцессорные системы, автоматизация измерений, контроля и испытаний.

**Чебуренко Денис Сергеевич**, аспирант кафедры вычислительной техники Института кибернетики ТПУ. E-mail: denleader@mail.ru  
Область научных интересов: электронные и микропроцессорные системы, автоматизация измерений, контроля и испытаний.

**Иванов Максим Леонидович**, аспирант кафедры вычислительной техники Института кибернетики ТПУ. E-mail: lydoz@mail.ru  
Область научных интересов: электронные и микропроцессорные системы, автоматизация измерений, контроля и испытаний.

Рассмотрена структура аппаратно-программного комплекса, предназначенного для определения метрологических характеристик аттенуаторов, магазинов затухания и делителей напряжения в диапазоне частот 20...100000 Гц. Приведены технические характеристики генератора, индуктивных делителей напряжения и дифференциального указателя, входящих в состав комплекса.

**Ключевые слова:**

Аппаратно-программный комплекс, аттенуатор, индуктивный делитель напряжения.

**Key words:**

Hardware and software complex, attenuator, inductive voltage divider.

В системах электро- и радиосвязи одними из широко востребованных компонентов являются аттенуаторы, предназначенные для регулируемого ослабления высокочастотных и сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов.

Создание широкодиапазонных аттенуаторов возможно только при совершенствовании методов и средств их метрологического обеспечения. Повышение качества измерений и увеличение объема поверочных (калибровочных) работ достигается путем

использования автоматизированных систем и аппаратно-программных комплексов.

Современные аппаратно-программные комплексы измерения ослабления аттенуаторов (АПКИОА) построены по двухуровневой структуре [1]. Как правило, нижний уровень состоит из одно- и многозначных мер и приборов сравнения, а верхний уровень образует ЭВМ с соответствующим программным обеспечением. Заметим, что АПКИОА могут быть использованы и при определении параметров магазинов затухания, коэффициента передачи делителей напряжения и электронных усилителей

В качестве однозначных мер используются генераторы напряжения. Наиболее приемлемыми многозначными мерами ослабления (отношения) являются индуктивные делители напряжения (ИДН) [1, 2]. В зависимости от требуемой погрешности измерения применяются ИДН с программным или ручным управлением [2]. Последние как более высокоточные в широкой полосе частот и играют роль эталона ослабления в установках высшей точности. Такое решение было принято при создании комплекса, предназначенного для поверки (калибровки) пассивных и активных аттенуаторов в диапазоне частот 0,02...100 кГц.

В состав АПКИОА (рис. 1) входят эталоны ослабления – индуктивные делители напряжения ДИ-3м и ДИ-6м с ручным управлением, генератор синусоидального напряжения

ГСН-2010м и дифференциальный указатель ДУ-2010м, способные работать как в режиме ручного, так и дистанционного управления. Связь генератора и дифференциального указателя с ЭВМ верхнего уровня осуществляется по интерфейсу *USB*.

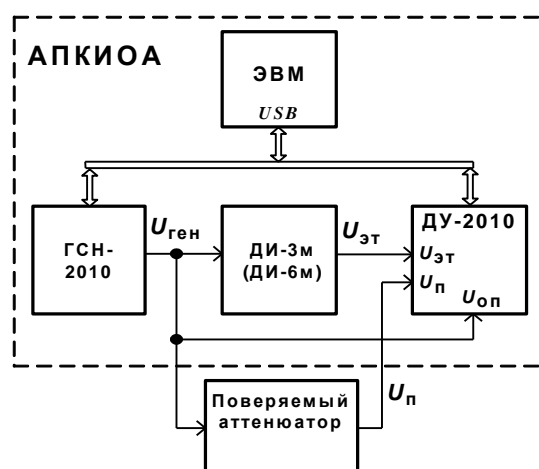


Рис. 1. Структурная схема АПКИОА

Комплекс позволяет исследовать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) поверяемых аттенюаторов, определять их входной и выходной импедансы. При определении неравномерности АЧХ выходное напряжение генератора  $U_{\text{ген}}$  поступает на входы эталонного ИДН, поверяемого аттенюатора и опорный вход  $U_{\text{оп}}$  дифференциального указателя. На измерительные входы  $U_{\text{эт}}$  и  $U_{\text{п}}$  последнего поступают соответствующие напряжения с выходов эталона и поверяемого аттенюатора. Разностное напряжение  $\Delta U = U_{\text{п}} - U_{\text{эт}}$  преобразуется в указателе в напряжение постоянного тока. Это напряжение индицируется на стрелочном приборе и одновременно в цифровом виде передается в ЭВМ для последующей обработки и визуализации.

Погрешность определения метрологических характеристик поверяемых средств измерений зависит от точности эталонных ИДН и разрешающей способности дифференциального указателя.

Широкополосный делитель ДИ-3м построен по многоканальному принципу [2] в виде двух синхронно переключаемых шестидекадных делителей напряжения, работающих в низкочастотном (0,02...20 кГц) и высокочастотном (20...100 кГц) поддиапазонах. Для расширения динамического диапазона до 160 дБ используются понижающие автотрансформаторы с коэффициентом трансформации 0,1 и 0,01, подключаемые к выходам делителей [3]. Такое техническое решение обеспечивает дискретность выходного напряжения 100 нВ (при номинальном входном напряжении 10 В среднеквадратического значения).

При проведении высокоточных измерений в области средних частот 0,4...2 кГц в комплексе используется эталонный делитель ДИ-6м. Последний представляет собой шестидекадный делитель, выполненный по двухступенчатой технологии [4]. Отличительной особенностью этого делителя является выполнение его в виде ИДН с симметрирующей обмоткой [2, 5]. Самопроверка декады осуществляется расчетно-экспериментальным методом опорного потенциала, при этом измерение разностных напряжений секций декад и опорных обмоток производится дифференциальным указателем.

Дифференциальный указатель ДУ-2010м представляет собой устройство, обеспечивающее сравнение значений двух напряжений одной частоты, поступающих с поверяемых средств измерений. Указатель позволяет определять разность двух векторов напряжений по мгновенному значению в диапазоне частот 0,02...100 кГц с разрешающей способностью 10 нВ. Такая высокая чувствительность достигается синхронным детектированием разностного напряжения с использованием синфазного напряжения, поступающего с генератора синусоидального напряжения.

Генератор выполнен по двухканальной структуре [6], состоящей из независимых низкочастотного и высокочастотного задающих генераторов с общим выходным усилителем мощности. Высокочастотный задающий генератор представляет собой функциональный генератор, воспроизводящий синусоидальный сигнал 1,25 В среднеквадратического значения в диапазоне частот 20...100 кГц. Низкочастотный генератор построен по классической схеме инвертора и двух интеграторов. При этом в цепях стабилизации амплитуды используются пиковый детектор, усилитель ошибки и регулирующий элемент на основе аналогового перемножителя. Такая структура позволяет обеспечить высокую стабильность выходного напряжения и его малые нелинейные искажения (коэффициент гармоник менее 0,2 %) в диапазоне частот 0,02...20 кГц.

Управление режимами работ генератора и дифференциального указателя обеспечивается встроенными микроконтроллерами *Atmega 128*. Связь последних с ЭВМ верхнего уровня осуществляется по интерфейсу *USB*.

Программное обеспечение комплекса разработано на C++ и Delphi 7.

Разработанный АПКИОА включен в состав «Установки высшей точности для измерения ослабления электромагнитных колебаний (ЭМК) на фиксированных частотах в диапазоне частот 0-100 МГц (УВТ 52А-87)», хранящейся во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений. На базе этой установки в настоящее время создается Государственный первичный эталон ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот до 178 ГГц.

#### **Основные технические характеристики АПКИОА:**

##### **Генератор синусоидального напряжения ГСН-2010м:**

Диапазон частот, кГц	0,02...100;
Выходное напряжение (среднеквадратическое значение), В	10;
Коэффициент гармоник, %	
в диапазоне частот 0,02...20 кГц	не более 0,2;
в диапазоне частот 20...100 кГц	не более 2;
Нестабильность выходного напряжения за 15 минут, %	не более $\pm 0,3$ .

##### **Индуктивный делитель напряжения ДИ-3м:**

Диапазон частот, кГц	0,02...100;
Диапазон коэффициента передачи $K_n$	0...1 с дискретностью $10^{-6}$
Пределы допускаемой основной погрешности:	
на частоте 1 кГц	$\pm (5 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-7}/K_n)$
на частоте 0,02 кГц и 100 кГц	$\pm (1 \cdot 10^{-4} + 3 \cdot 10^{-7}/K_n)$
Выходной импеданс:	
активное сопротивление, Ом	5
индуктивность, мкГн	5
Входной импеданс, кОм	1...50.

##### **Индуктивный делитель напряжения ДИ-6м:**

Диапазон частот, кГц	0,4...2
Диапазон коэффициента передачи $K_n$	0...1 с дискретностью $10^{-6}$
Пределы допускаемой основной погрешности	$\pm (a_i + 2 \cdot 10^{-8} b_i / K_n)$ при $K_n > 10^{-5}$ , $\pm (a_i + 2 \cdot 10^{-7} b_i / K_n)$ при $K_n \leq 10^{-5}$ , где $i = 1...6$ – номер декады; $a_1 = 5 \cdot 10^{-7}$ ; $a_2 = a_3 = 5 \cdot 10^{-7}$ ; $a_4 = a_5 = a_6 = 5 \cdot 10^{-6}$ ; $b_1 = b_2 = 0,2$ ; $b_3 = b_4 = 0,03$ ; $b_5 = b_6 = 0,02$ .

Выходной импеданс:	
активное сопротивление, Ом	15
индуктивность, мкГн	15
Входной импеданс, кОм	20.

**Дифференциальный указатель ДУ-2010м:**

<i>Диапазон частот, кГц</i>	<i>0,02...100</i>
<i>Динамический диапазон, В (среднеквадратическое значение)</i>	<i>10<sup>-8</sup>...10</i>
<i>Разрешающая способность, нВ</i>	<i>10</i>
<i>Активные входные сопротивления на измерительных входах на частоте 1 кГц, МОм</i>	<i>не менее 50</i>
<i>Средства отображения информации</i>	<i>монитор ЭВМ, стрелочный прибор.</i>

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Iida H. An Accurate Microwave Attenuation Measurement System Using an Inductive Voltage Divider Based on a Single-Channel If Substitution Method // Measurement Science and Technology. – 2006. – V. 17. – № 7. – P. 1947–1949.
2. Ким В.Л. Методы и средства повышения точности индуктивных делителей напряжения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 214 с.
3. Ким В.Л. Повышение точности многокаскадных индуктивных делителей напряжения в диапазоне низких частот // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 8. – С. 44–49.
4. Deacon T.A., Hill J.J. Two-stage Inductive Voltage Divider // Proc. IEE. – 1968. – V. 115. – № 6. – P. 888–892.
5. Ким В.Л. Индуктивный делитель напряжения: пат. 39001 Рос. Федерация. МПК<sup>7</sup> H01F 21/12. Заявл. 04.02.04; опубл. 10.07.04, Бюл. № 19. – 2 с.
6. Бориков В.Н., Ким В.Л., Меркулов С.В. Генераторы тестовых напряжений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 1. – С. 23–26.

Поступила 21.09.2011 г.