

УДК 621.317.727.1

ПРЕЦИЗИОННЫЕ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

В.Л. Ким, В.И. Пругло*, С.В. Меркулов, Д.С. Чебуренко, М.Л. Иванов

Томский политехнический университет

*ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений, г. Москва

E-mail: kimval11@rambler.ru

Приведено описание разработанных шести- и семидекадных эталонных индуктивных делителей напряжения с погрешностью $3 \cdot 10^{-5} \%$ на частоте 1 кГц и 0,01 % на частоте 100 кГц. Делители, как исходные меры ослабления, и дифференциальный указатель с чувствительностью 10 нВ, обеспечивают воспроизведение единицы ослабления в диапазоне частот от 0 до 178 ГГц с наивысшей точностью.

Ключевые слова:

Государственный первичный эталон, единица ослабления, индуктивный делитель напряжения.

Key words:

National primary standard, attenuation unit, inductive voltage divider.

В 2011 г. в Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений завершилась работа по созданию Государственного первичного эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний (ГЭТОЭМК) в диапазоне частот 0...178 ГГц.

Состав эталона и поверочная схема были рассмотрены и утверждены научно-технической комиссией Росстандарта в феврале 2012 г. С этого момента де-факто создан один из важнейших государственных эталонов относительной (безразмерной) величины — *первичный эталон единицы ослабления* — децибел (дБ). Этот эталон, наряду с такими первичными эталонами размерных величин, как эталон единицы массы килограмм, эталон единицы длины метр, эталон единицы времени секунда и др., составляет основу эталонной базы страны.

Напомним, что государственный первичный эталон предназначен для воспроизведения и/или хранения единицы величины и передачи её размера с наивысшей точностью, достижимой в данной области измерений. В соответствии с государственной системой обеспечения единства измерений государственная поверочная схема, оформляемая в виде государственного стандарта, устанавливает соподчинение средств измерений, участвующих в многоступенчатой передаче размера единицы от первичного эталона рабочим средствам измерений с указанием методов и погрешности при передаче.

В настоящее время ВНИИФТРИ готовит к изданию ГОСТ Р «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений ослабления в диапазоне частот от 0 до 178 ГГц». После опубликования этого документа де-юре действие эталона вступит в законную силу.

В статье рассматриваются элементы двух верхних уровней системы передачи размера единицы ослабления ГЭТОЭМК (рис. 1). Описание других уровней будет изложено в последующих статьях.

В основе концепции создания этой системы лежит метод сравнения с мерой — эталонным индуктивным делителем напряжения (ИДН). Как известно, такие делители обеспечивают наивысшую точность деления напряжения на частотах сотни герц — единицы килогерц [1]. Например, погрешность коэффициента передачи K_n шестидекадного ИДН типа T924 (NPL, Великобритания) и семидекадного делителя 6340A (SunJEM Co., Япония) на частоте 1 кГц равна $\pm 5 \cdot 10^{-7} K_n^{-1}$.

На верхнем уровне иерархии используется исходная мера ослабления — эталонный индуктивный делитель напряжения с рабочей частотой 1 кГц (ЭИДН1) типа ДИ-6м, а на втором — широкополосный индуктивный делитель (ЭИДН2) типа ДИ-3м.

Передача размера единицы ослабления от ЭИДН1 к ЭИДН2 и от последнего к нижестоящим устройствам производится прибором сравнения — дифференциальным указателем ДУ-2010 [2], краткое описание которого приведено ниже.

Эталонный делитель ДИ-6м представляет собой шестидекадный делитель с ручным управлением, выполненный по двухступенчатой технологии [1]. При изготовлении каждой декады (рис. 2) используются два соосно расположенных тороидальных ферромагнитных сердечника ТИ1 и ТИ2. На первом сердечнике наматывается намагничивающая обмотка L1. Декадная делительная обмотка L2 выполняется одиннадцатипроводным жгутом, наматываемыми на оба сердечника. При этом одиннадцатый провод жгута образует опорную обмотку L3 и используется при проведении самопроверки декады. Кроме этого на сердечниках размещается обмотка связи L4, соединяемая с обмоткой намагничивания последующего каскада. Коммутация отводов декады осуществляется многопозиционным переключателем S1. Для правильной работы делителя соблюдается следующее соотношение числа витков обмоток: $w_1 = w_2 = 10w_3 = 10w_4$.

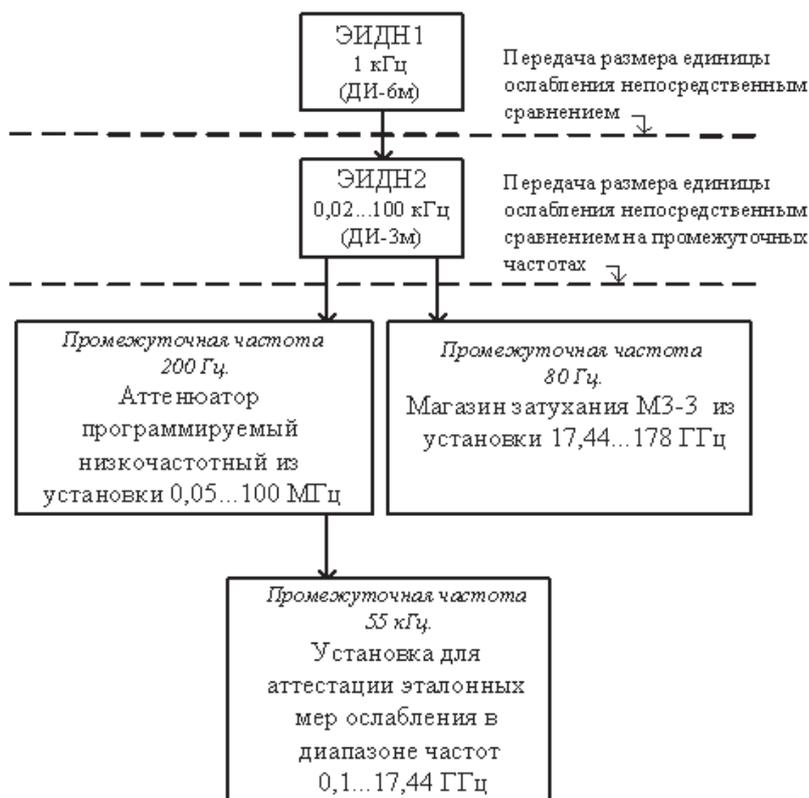


Рис. 1. Схема воспроизведения единицы ослабления Государственного первичного эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот 0...178 ГГц

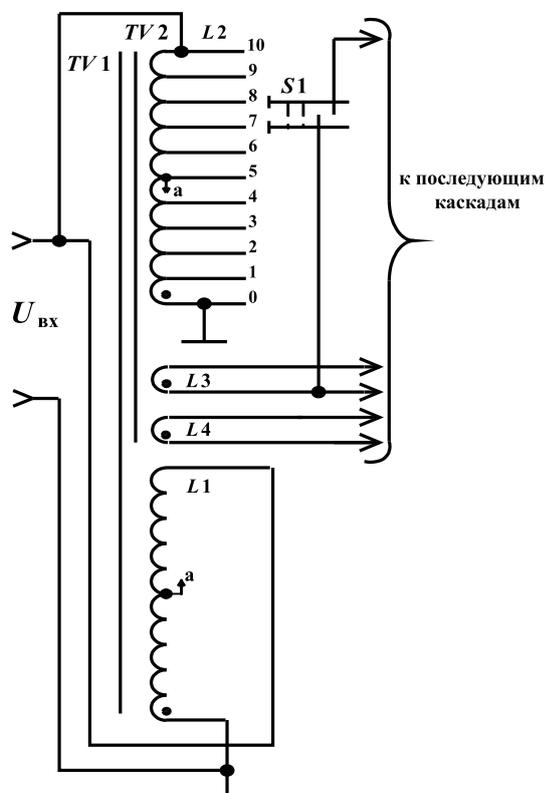


Рис. 2. Принципиальная схема ИДН с самопроверкой

Отличительной особенностью этого делителя является выполнение первой декады в виде ИДН с симметрирующей обмоткой, когда средний отвод намагничивающей обмотки $L1$ соединяется со средним (пятым) отводом делительной обмотки $L2$ [1]. Такая модификация двухступенчатого делителя позволяет при сохранении точности уменьшить его выходное активное сопротивление.

Относительные погрешности коэффициента передачи K_n отдельных декад определяются методом опорного потенциала [3], используя формулу

$$\delta K_n = \frac{1}{n \cdot U_{вх}} \sum_{i=1}^n \left(10 \cdot \Delta U_i - \sum_{i=1}^n \Delta U_i \right),$$

где $\Delta U_i = U_i - U_0$ разностное напряжение между напряжением i -й секции U_i и напряжением опорной обмотки U_0 ; $n=0,10$ – номер отвода декадной обмотки.

Предел допускаемой относительной погрешности коэффициента передачи j -й декады рассчитывается по формулам

$$\delta K_{n\Sigma_j} = \delta K_{nj \max} + \delta_{npj},$$

$$\delta_{npj} = \frac{U_{нп}}{K_{nj \min} U_{вх}},$$

где $\delta K_{nj \max}$ – максимальное значение из относительных погрешностей коэффициентов передач j -й декады; δ_{npj} – погрешность коэффициента передачи,

обусловленная напряжением «прямого прохождения» $U_{\text{пр}}$; $K_{j\text{min}}$ – минимальное значение коэффициента передачи j -й декады.

Заметим, что напряжение «прямого прохождения», обуславливающее аддитивную погрешность, представляет собой напряжение на выходе ИДН при нулевом значении его коэффициента передачи. Измерение этого напряжения, как и разностного напряжения ΔU_j производится дифференциальным указателем ДУ-2010.

Дифференциальный указатель представляет собой устройство, обеспечивающее сравнение значений двух напряжений одной частоты, поступающих с поверяемых средств измерений. Указатель позволяет определять разность 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 ГСН-2010.

Генератор выполнен по двухканальной структуре [4], состоящей из независимых низкочастотного и высокочастотного задающих генераторов. Общий выходной усилитель мощности обеспечивает напряжение в нагрузке 10 В среднеквадратического значения. 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.

Генератор и дифференциальный указатель (технические характеристики приведены в [5]) входят в состав низкочастотной компарирующей установки ГЭТОЭМК (рис. 3). Наряду с своим основным назначением – передачей размера единицы ослабления на промежуточных частотах, эта установка имеет широкий спектр применения: калибровка и проверка масштабных измерительных преобразователей (делителей напряжения и усилителей), калибраторов напряжения, трансформаторов напряжения, ЦАП, АЦП и других средств измерений и устройств, используемых в электроэнергетике, электронике, связи в нормальных условиях эксплуатации.

Состав компарирующей установки изменяется в зависимости от решаемых задач. Так, при определении коэффициента передачи делителей напряжения, измерении ослабления аттенюаторов имагазинов затухания до 140 дБ с наивысшей точностью установка работает в диапазоне частот

0,4...2 кГц. В этом случае роль меры играет программируемый семидекадный делитель ДИП-2011.

При работе компарирующей установки в полосе частот 0,02...100 кГц используется другой эталон – широкополосный делитель ДИ-3м. Такой состав приборов позволяет исследовать АЧХ поверяемых средств измерений, определять их входной и выходной импедансы. Например, при определении неравномерности АЧХ, как показано на рис. 3, 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 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 разрешающей способности дифференциального указателя и точности эталонных ИДН.

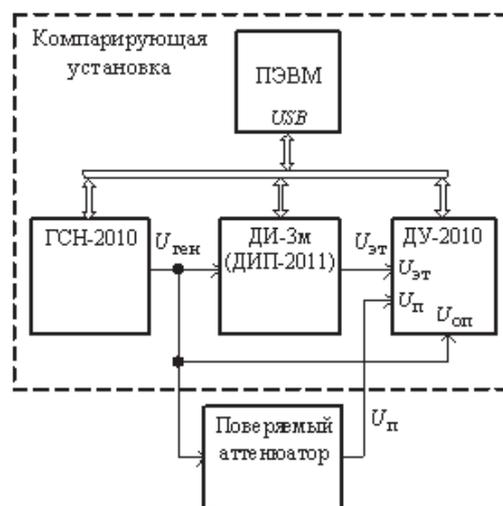


Рис. 3. Структурная схема компарирующей установки

Широкополосный делитель ДИ-3м построен по многоканальному принципу [1] в виде двух синхроннопереключаемых шестидекадных делителей напряжения, работающих в диапазонах частот 0,02...20 кГц и 20...100 кГц. Для расширения динамического диапазона до 160 дБ используются понижающие автотрансформаторы с коэффициентами трансформации 0,1 и 0,01, подключаемые к выходам делителей. Такое техническое решение обеспечивает дискретность выходного напряжения 100 нВ (при номинальном входном напряжении 10 В среднеквадратического значения). По частотному и динамическому диапазонам ДИ-3м находится на уровне лучшего зарубежного аналога – широкополосного ИДН, используемого в *NPL* в качестве национального эталона ослабления [1].

Программируемый делитель ДИП-2011 состоит из двух подсистем – аналоговой и цифровой (рис. 4).

Аналоговая подсистема предназначена для деления входного напряжения в соответствие со значением коэффициента передачи, устанавливаемым цифровой подсистемой. В состав аналоговой подсистемы входят многодекадный автотрансформаторный ИДН (АИДН), модуль релейной коммутации (МРК) и модуль электронных ключей (МЭК). Модуль микроконтроллерного управления (ММУ), модуль клавиатуры (МК), модуль управления индикаторами (МУИ), модуль индикации (МИ) и интерфейсный модуль (ИМ) образуют цифровую подсистему.

Коммутация отводов АИДН осуществляется контактами электромагнитных реле, входящих в МРК. В свою очередь коммутация обмоток реле производится электронными ключами МЭК. Управляющие сигналы на вход МЭК поступают от ММУ. Последний позволяет работать делителю в двух режимах – *местное* и *дистанционное*. В первом режиме требуемое значение коэффициента передачи устанавливается посредством МК и индицируется на МИ. Семисегментный код на цифровые индикаторы поступает от МУИ. В *дистанционном* режиме коэффициент передачи задается на верхнем уровне с помощью ЭВМ. Связь микроконтроллера ММУ с ЭВМ осуществляется по интерфейсу *USB* посредством ИМ. Последний аналогичен интерфейсным модулям генератора и дифференциального указателя.

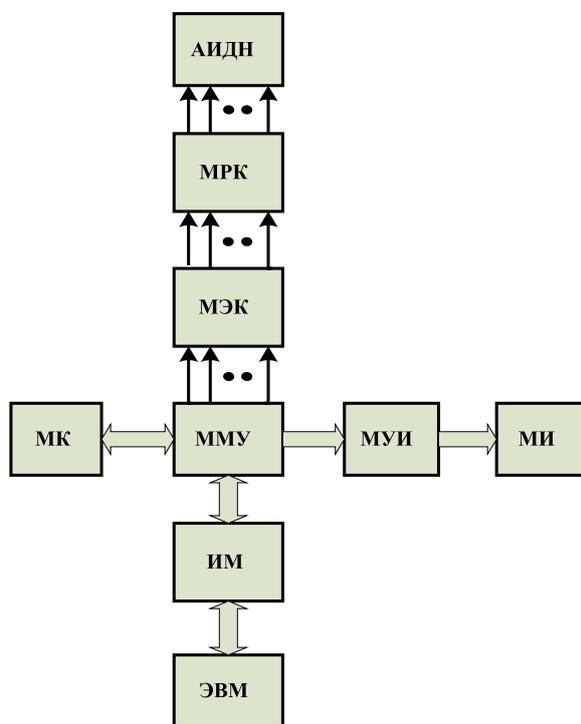


Рис. 4. Структурная схема делителя ДИП-2011

АИДН представляет собой семидекадный ИДН автотрансформаторного типа, выполненный по четырехкаскадной схеме. Первый каскад представля-

ет собой однодекадный делитель, аналогичный рассмотренному ранее (рис. 2), последующие – двухдекадные ИДН, выполненные способом разделения двух декад на общем сердечнике [6].

В цифровой подсистеме использованы микроконтроллер *Atmega 128* и программируемая логическая схема *EPM3512AQC208* (в модуле микроконтроллерного управления), преобразователь интерфейса *FT232RL* (в интерфейсном модуле), цифровая клавиатура *AK304NWWB* (в модуле клавиатуры), преобразователь кода *74LS247DW* (в модуле управления индикаторами) и индикаторы *SA39-11SRWA* (в модуле индикаторов).

Программное обеспечение ДИП-2011 как и ГСН-2010, ДУ-2010 разработано на языке СИ++ и в среде объектно-ориентированного программирования *Delphi 7*.

Основные технические характеристики индуктивных делителей напряжения, входящих в состав Государственного первичного эталона единицы электромагнитных колебаний:

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 $\pm(a + 2 \cdot 10^{-8} b_i / K_n)$ 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

$a_1=3 \cdot 10^{-7}$; $a_2=a_3=5 \cdot 10^{-7}$

$a_4=a_5=a_6=5 \cdot 10^{-6}$; $b_1=b_2=0,2$

$b_3=b_4=0,03$; $b_5=b_6=0,02$

Выходной импеданс:

- активное сопротивление, Ом 10
- индуктивность, мкГн 15

Входной импеданс, кОм 20

Программно-управляемый делитель
напряжения ДИП-2011:

Диапазон частот, кГц 0,4...2
Максимальное входное напряжение, В 10
Входное полное сопротивление, кОм 30
Выходной импеданс:
• активное сопротивление, Ом 15
• индуктивность, мкГн 15

| Пределы допускаемой основной погрешности | Коэффициент передачи K_n | Дискретность |
|--|----------------------------|--------------|
| $\pm 3 \cdot 10^{-7}$ | $\leq 1,0000000$ | 0,1000000 |
| $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ | $\leq 0,1000000$ | 0,0100000 |
| $\pm 3 \cdot 10^{-5}$ | $\leq 0,0100000$ | 0,0010000 |
| $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ | $\leq 0,0010000$ | 0,0001000 |
| $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ | $\leq 0,0001000$ | 0,0000100 |
| $\pm 3 \cdot 10^{-2}$ | $\leq 0,0000100$ | 0,0000010 |
| $\pm 2 \cdot 10^{-1}$ | $\leq 0,0000010$ | 0,0000001 |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ким В.Л. Методы и средства повышения точности индуктивных делителей напряжения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 214 с.
2. Бориков В.Н., Баранов П.Ф., Цимбалист Э.И., Ким В.Л. Устройство для испытаний и поверки индуктивных делителей напряжения // Контроль, диагностика. – 2011. – № 11. – С. 41–45.
3. Nakase T. Isolated-Section Inductive Divider and Its Self-Calibration // IEEE Trans. Instrum. and Meas. – 1970. – V. IM-19. – № 4. – P. 312–317.

Выводы

1. Разработаны шести- и семидекадные индуктивные делители напряжения с ручным и программным управлением с погрешностью $\pm 3 \cdot 10^{-5} \%$ в диапазоне частот 0,4...2 кГц и 0,01 % на частоте 100 кГц, используемые в качестве исходных мер ослабления высшей точности в составе Государственного первичного эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот 0...178 ГГц.
2. Прецизионные индуктивные делители напряжения и дифференциальный указатель с чувствительностью 10 нВ позволили создать основу высокоточной системы передачи размера единицы ослабления от исходного эталона до рабочих эталонов и средств измерений, не уступающей по частотному и динамическому диапазонам зарубежным аналогам.
4. Бориков В.Н., Ким В.Л., Меркулов С.В. Генераторы тестовых сигналов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 1. – С. 23–26.
5. Ким В.Л., Пругло В.И. Автоматизированная установка для исследования масштабных измерительных преобразователей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 4. – С. 48–50.
6. Ким В.Л., Ройтман М.С. Эталонный индуктивный делитель напряжения // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 88–92.

Поступила 13.03.2012 г.