

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ (СОСТОЯНИЕ И ЗАДАЧИ)

М. С. Ройтман

Институт кибернетики Национального исследовательского
Томского политехнического университета, 634034, Томск, Россия

УДК 621.317

Изложены подходы к построению прецизионных делителей как постоянных, так и переменных напряжений.

Ключевые слова: напряжение, прецизионный делитель.

The approach to construction of precision dividers as constants and variable voltage are stated.

Key words: voltage, precision dividers.

Делители напряжения, а в более общем случае масштабные преобразователи, являются узлами, определяющими метрологические и эксплуатационные характеристики всего средства измерения [1].

В приборостроении используются резистивные делители напряжения, основанные на широтно-импульсной модуляции (ШИМ), делители многозвенного активного фильтра, а также комбинированные делители. ШИМ-делители применяются только для постоянных и низкочастотных напряжений. За счет использования высококачественных быстродействующих ключей микропроцессора и 7-полюсного активного фильтра фирма Datron Instruments создала ШИМ-делитель с нелинейностью менее $5 \cdot 10^{-5} \%$ в течение всего срока эксплуатации и отсутствием нестабильностей (применяется в калибраторах типа 4000A и 4200). Следует отметить, что еще ранее ШИМ-делитель был реализован фирмой Takedo-Riken.

Отечественный калибратор В1-18А имеет погрешность воспроизведения напряжения на основном пределе относительно опорного источника, равную 0,0003 %. Это было достигнуто за счет того, что делитель изготавливался путем нанесения на массивную плату манганиновой или маргаленовой фольги с последующей фотолитографией и тщательной трудоемкой подгонкой резистивных звеньев.

При изготовлении прецизионных делителей применяются высокостабильные резисторы и используются различные методы коррекции, основанные на сопоставлении падений напряжений [1, 2], на использовании комбинаторики [2] (в [1] этот подход назван дуально-реверсивным), сопоставлении резистивного делителя с индуктивным делителем напряжения (ИДН) и

коррекции первого по второму (комбинированные). Относительные неравенства падений напряжений на каждом из последовательно соединенных резисторов легко измерить с помощью неуравновешенного компенсационного либо мостового метода. Очевидно, что диапазон рабочих частот такого делителя определяется степенью однородности его структуры. В многодекадном прецизионном делителе 720 А фирмы Fluke имеется встроенная мостовая схема, позволяющая реализовать указанную возможность. Однако следует отметить, что этот делитель не является ни простым, ни дешевым. Во-первых, каждая декада выполняется не из 10 последовательно включенных резисторов, а из 11, поскольку на каждом этапе к двум последовательно включенным резисторам подключаются параллельно два таких же резистора, вследствие чего образуется мост. В итоге получаем делитель на 10. Затем по результатам измерения осуществляется корректировка элементов.

В [2] в качестве иллюстрации возможностей комбинаторики рассмотрены алгоритмы реализации точного деления на 2 и на 10. Преимуществом комбинаторики является то, что она позволяет получить результирующую погрешность $\delta_{кр} \sim \delta_r^2$. Если погрешность резисторов делителя составляет $\delta \sim 0,1\%$, то погрешность всего делителя равна $\delta_d \sim 0,0001\%$. Заметим, что комбинаторика неэффективна для широкополосных делителей.

Следует отметить исследования с целью получения требуемых градаций постоянного напряжения, проводившиеся еще в начале 70-х гг. XX в. на Краснодарском заводе измерительных приборов с использованием следующего алгоритма: постоянное напряжение прецизионными быстродействующими ключами преобразуется в переменное напряжение (меандр), которое поступает на ИД, после чего стробимпульс включает схему выборки-хранения. Этот вариант преобразования не нашел широкого применения, что отчасти обусловлено быстрым прогрессом микроэлектроники и появлением на мировом рынке 24-разрядных ЦАП (АД 1853) и АЦП с (Σ - Δ)-модуляцией. Последние обладают малым низкочастотным шумом и очень высокой степенью линейности. Поскольку ЦАП и АЦП являются "зеркальными" элементами, возможна реализация постоянных напряжений с использованием прецизионных АЦП. Однако в этом случае оценка отношений напряжений выполняется практически методом прецизионного вольтметра. Заметим, что при определении отношения двух напряжений их истинное значение не представляет интереса, важна лишь точность отношения, т. е. отсутствие аддитивной составляющей и линейности передаточной характеристики. Отвлечение от проблем стоимости, весогабаритных характеристик и руководствоваться только достижимой точностью приводит к к криоэлектронике. В 1962 г. студент-дипломник Б. Джозефсон открыл явления, называемые теперь эффектами Джозефсона, за которые он в 1973 г. получил Нобелевскую премию. Дело в том, что если на Джозефсоновский переход подать микроволновое излучение с частотой f , то в результате взаимодействия между приложенным напряжением и джозефсоновским током при определенных напряжениях на вольт-амперной характеристике контакта появляются ступеньки [3]. Эти ступеньки возникают при напряжениях

$$V_n = \frac{nh}{2e} f,$$

где f_0 – частота внешнего излучения; n – номер ступеньки; h – постоянная Планка; e – заряд электрона. Следует отметить, что в этом выражении напряжение V_n для n -й ступеньки опреде-

ляется только фундаментальными физическими константами h и e (точнее, их отношением) и частотой, а частота является величиной, определяемой в настоящее время с наивысшей точностью (по сравнению с другими основными величинами СИ). Это позволило создать "естественный" эталон напряжения.

Данный подход оказался наиболее продуктивным и перспективным. С 1972 г. стандарт вольты в США, а позднее и в СССР, Германии, Великобритании и других странах устанавливается с помощью эффекта Джозефсона, позволяющего связать напряжение с частотой и резко повысить точность. Дальнейшие исследования по обеспечению высокой точности генерируемого квантованного напряжения, воспроизводимости и стабильности параметров туннельных тонкопленочных переходов позволили разработать последовательные матрицы.

Для исследования прецизионности джозефсоновских стандартов напряжения было проведено несколько экспериментов. В наиболее чувствительном эксперименте измерялась разность напряжений, генерируемых двумя разными джозефсоновскими приборами при одинаковой частоте возбуждения. Согласно результатам измерений для одиночных переходов верхнее предельное значение этой разности составляло $3 \cdot 10^{-19}$, для последовательных матриц – $2 \cdot 10^{-17}$ [3]. Таким образом, на практике не требуется какой-либо коррекции джозефсоновского соотношения между напряжением и частотой.

Простота и надежность стандартов напряжения на джозефсоновских матрицах обусловили их использование в лабораториях стандартизации в государственном, военном и промышленном секторах. С 1989 г. такие стандарты функционируют примерно в 20 пунктах разных стран мира.

История развития квантового эталона напряжения и описание современных эталонов с джозефсоновскими матрицами изложены в [3]. Следует отметить, что фактически матрица многозвенных джозефсоновских переходов позволяет реализовать ЦАП с погрешностью, равной 10^{-8} , а в принципиальном плане – и с существенно меньшей. Два эталона NIST с синхронизированными генераторами позволяют получить любое требуемое соотношение как постоянных, так и переменных напряжений, частотный диапазон которых пока ограничен временем установления, равным 1 мкс. Заметим, что область применимости криоэлектронных систем определяется стоимостью низкотемпературных криосистем и больших матриц джозефсоновских элементов. Тем не менее фирма Nurgos рекламирует замкнутые системы с рефрижераторами Стирлинга – Эттинсгаузена, а компания CRYO GEMIES – рефрижераторы Гриффорда – Макмагона. Следует отметить, что проблема охлаждения в космических условиях существенно упрощается, а ВТСП-электроника прогрессирует. Развитие нанотехнологий обусловило прогресс в элементной базе. В частности, появились цифровые потенциометры компании Semiconductor; сигма-дельта АЦП Texas Instruments типа ADS 1281 (32-разрядный и с интегральной нелинейностью 0,6 ppm); прецизионное сопротивление Texas Instruments класса 0,001 %. В 2010 г. компания Analog Devices анонсировала наиболее точный 20-разрядный ЦАП в отрасли AD 5791, обеспечивающий в четыре раза бóльшую точность и разрешение, чем у аналогичных изделий других производителей.

В настоящее время ФГУП "НИИЭМП" (Пенза) является единственным в России и СНГ разработчиком сверхточных и особо стабильных постоянных резисторов и прецизионных ЦАП. В 1989 г. на этом предприятии была завершена работа по созданию 16-разрядного умножающе-

го ЦАП с выходом по напряжению 427 ПА4, а несколько позднее – 18-разрядного 427 ПА3. Это свидетельствует о постепенном упрощении задачи построения широкополосных прецизионных комбинированных масштабных преобразователей. К числу таких преобразователей относятся резистивные (на последовательно соединенных сопротивлениях) сборки с коммутацией элементов, умножающие ЦАП и уже упоминавшиеся комбинированные преобразователи. Особый интерес к последним обусловлен тем, что наиболее высокой точностью в узком диапазоне частот обладают делители с тесной индуктивной связью (ИД), представляющие собой автотрансформаторы с мультифилярной обмоткой на высококачественном магнитопроводе. Первое сообщение о трансформаторе с тесной индуктивной связью обмоток появилось в 30-е гг. XX в. Особый интерес к устройствам с тесной индуктивной связью был проявлен в 60-х гг. Был проведен ряд фундаментальных исследований по определению точности коэффициента деления ИД и созданы высококачественные делители, выпускаемые серийно фирмами Hewlett Packard, Digital Measurement, Avel Products и др. Однако отечественная промышленность ИД не выпускала. В 1963 г. к решению актуальной проблемы по метрологическому обеспечению средств измерений переменного тока подключилась кафедра радиотехники ТПУ (ныне кафедра компьютерных измерительных систем и метрологии). Был сделан вывод о необходимости разработки многозначной меры переменных напряжений в диапазоне частот 20 Гц – 200 кГц. Решение этой проблемы потребовало проведения различных исследований включая разработку методов расширения частотного диапазона индуктивных делителей.

В 1972 г. Томским заводом измерительной аппаратуры была выпущена серия из 10 штук 6-декадных индуктивных делителей. В 1973 г. Харьковский завод "Эталон" начал выпускать эти калибраторы под шифром В1-20 в следующем составе: однозначная мера напряжения 10 В, высоковольтный прецизионный усилитель с нормированным коэффициентом 30 и максимальным выходным напряжением 300 В и 6-декадный индуктивный делитель [4]. Более подробно различные оригинальные решения представлены в работах [5–13].

В приборостроении используются делители: резистивные на основе импульсной модуляции и многозвенного активного фильтра, индуктивные с тесной индуктивной связью, а также комбинированные (см., например, [2, 4–6, 13]). Заметим, что весьма высокая точность индуктивных делителей и относительная простота их изготовления (для работы в сравнительно узком диапазоне частот) обуславливают перспективность данного направления. Кроме того, отсутствует необходимость существенного преобразования резистивного делителя, что позволяет увеличить его широкополосность. Следует отметить, что любая коррекция оправдана лишь в той степени, насколько нестабильность резисторов меньше (хотя бы в пределах десятков минут) их погрешности, так как временная стабильность резисторов определяет межкорректировочный интервал. В значительной степени именно вследствие отсутствия достаточно стабильных мало-реактивных резисторов потребовалось искать различные пути увеличения широкополосности индуктивных делителей включая кодоуправляемые [6, 13].

Поскольку в монографии [13] приведена обширная библиография (247 источников) и сравнительно полно изложены наши взгляды на проблему ИД, нет необходимости излагать материал здесь, а можно ограничиться лишь некоторыми замечаниями. Абсолютно согласен, что первая декада должна выполняться по двухступенчатой схеме ([12]). Вторую обмотку (вторая де-

када ИДН) целесообразно намотать на общий "сэндвич". Однако способ намотки первой декады необходимо модифицировать. Вопрос об эффективности выполнения ИДН в криоэлектронном варианте мало изучен. В качестве магнитопровода можно использовать торы из криоперма (это модифицированный перналой), обмотки лучше делать проводом из ниобия. Всю конструкцию вставим в необиевый экран, представляющий собой два полых тора с различными диаметрами и с изоляцией на меньшем торе. В результате практически исчезнет сопротивление обмоток и резко снизится индуктивность рассеивания, а затем и уровень наводок.

В итоге выигрыш, может быть, и существенный, но какой ценой? И все-таки, учитывая быстрый прогресс криоэлектроники, отработка технологий RFSQ – Rapid Sing Flux-Quantum Technology (быстродействующие приборы с переносом кванта потока) удалось решить многие задачи на качественно новом уровне. Основателями этой технологии по праву считают К. К. Лихарева и его учеников: В. Семенова, Х. Татита, О. Муханова и др. Уже выпускается 24-разрядный АЦП, не имеющий мировых аналогов и обладающий превосходной линейностью.

Список литературы

1. ШВЕЦКИЙ Б. И. Электронные измерительные приборы с цифровым отчетом. Киев: Техника, 1964.
2. РОЙТМАН М. С. Калибраторы напряжения и тока (состояние и задачи) // Проблемы метрологии. Метрологическое обеспечение средств измерений переменного тока: Межвуз. темат. сб. Томск: Изд-во ТПУ, 1985. С. 3–18.
3. Ройтман М. С. Квантовая метрология: Учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2004. 188 с.
4. РОЙТМАН М. С. Калибраторы напряжения и тока. М.: Изд-во стандартов, 1982. 48 с.
5. РОЙТМАН М. С., КАЛИНИЧЕНКО Н. П. Индуктивные делители напряжения // Измерения, контроль, автоматизация: Науч.-техн. сб. обзоров. М.: НИИ ТЭИ приборостроения, 1978. Вып. 2. С. 24–32.
6. РОЙТМАН М. С., КИМ В. Л., КАЛИНИЧЕНКО Н. П. Кодоуправляемые прецизионные делители напряжения // Измерения, контроль, автоматизация. 1985. № 4. С. 58–61.
7. РОЙТМАН М. С., ЦИМБАЛИСТ Э. И., МЕРЖА А. Н. и др. Дифференциальные указатели напряжений // Измерения, контроль, автоматизация. 1994. № 1–2. С. 11–23.
8. СТУДЕНИКИН В. Н. Разработка и исследование методов и аппаратуры для поверки по частотной погрешности ослабителей: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1969.
9. СЕРГЕЕВ В. М. Исследование и разработка прецизионных измерительных усилителей: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1971.
10. ФОМИЧЕВ Ю. М. Исследование и разработка прецизионных широкополосных источников калибровочного напряжения: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1971.
11. КРАМНЮК А. И. Исследование и разработка широкополосных индуктивных делителей напряжения: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1971.
12. КАЛИНИЧЕНКО Н. П. Исследование, разработка и применение индуктивных делителей напряжения с ручным и программным управлением: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1978.
13. КИМ В. Л. Методы и средства повышения точности индуктивных делителей напряжения: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2009.

*Ройтман Марсель Самуилович – д-р техн. наук, проф. Института кибернетики
Томского политехнического университета; тел. (382-2) 41-75-27; e-mail: roitmanmarcel@rambler.ru*

Дата подачи – 08.11.11