

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ (СОСТОЯНИЕ И ЗАДАЧИ)

М.С. Ройтман

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

Излагаются подходы к построению прецизионных делителей как постоянных, так и переменных напряжений. Отмечается, что особого внимания заслуживают комбинированные делители, содержащие в своем составе многодекадные индуктивные делители, по которым осуществляется корректировка всей системы, а в перспективе – делители на матрицах из джозефсоновских переходов и криоэлектронные.

Ключевые слова:

Прецизионные делители, комбинированные делители, напряжение, криоэлектроника.

Key words:

Precision dividers, combined dividers, voltage, cryoelectronics.

Делители напряжения, а в более общем случае масштабные преобразователи, являются узлами, обеспечивающими метрологические и эксплуатационные характеристики всего средства измерения (СИ). Именно поэтому в одной из первых и лучших монографий, посвященных цифровым СИ, делителям отведена целая глава [1].

В приборостроении используются следующие типы делителей: резистивные; на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и многозвенного активного фильтра; а также комбинированные. ШИМ делители применяют только для постоянных и низкочастотных напряжений. Фирма Datron Instruments [2], благодаря использованию высококачественных быстродействующих ключей микропроцессора и 7-полюсного активного фильтра, создала делитель с ШИМ с нелинейностью менее $5 \cdot 10^{-5} \%$ в течение всего срока службы и отсутствием нестабильностей (он применен в калибраторах типа 4000A и 4200). Следует отметить, что еще ранее был реализован ШИМ-делитель фирмой Take-do-Riken.

Отечественный калибратор В1–18А имеет погрешность воспроизведения напряжения на основном пределе относительно опорного источника 0,0003 %. Достигнуто это было дорогой ценой. Делитель выполнялся нанесением на массивную плату манганиновой или маргаленовой фольги с последующей фотолитографией и тщательной трудоемкой подгонкой резистивных звеньев.

В прецизионных делителях применяются высокостабильные резисторы в совокупности с различными методами коррекции.

Последние можно разделить на: базирующиеся на сопоставлении падений напряжений [1], на использовании комбинаторики [2], сличением резистивного делителя с индуктивным (ИДН) и коррекцией первого по второму (комбинированные). Относительные неравенства падений напряжений на каждом из последовательно соединенных резисторов легко поочередно измерить неуравновешенным компенсационным методом либо мостовым. Очевидно, что диапазон рабочих частот такого делителя определяется степенью однородности

его структуры. В многодекадном прецизионном делителе 720А фирмы Fluke имеется встроенная мостовая схема, позволяющая реализовать указанную возможность. Однако оговоримся, что этот делитель ни простым, ни дешевым никак не назовешь. Каждая декада выполняется не из 10 последовательных резисторов, а из 11, поскольку на каждом этапе к двум последовательным резисторам подключаются параллельно 2 таких же резистора, и образуется мост. В итоге получают делитель на 10, затем по результатам измерения осуществляется корректировка элементов.

В качестве иллюстрации возможностей комбинаторики в [3] рассмотрены алгоритмы реализации точного деления на 2 и на 10. Большим достоинством комбинаторики является то, что она позволяет получить результирующую погрешность $\delta_{кр} \sim \delta_r^2$. Если погрешность резисторов делителя будет $\delta \sim 0,1 \%$, то погрешность всего делителя будет $\delta_d \sim 0,0001 \%$. Особо следует сказать, что комбинаторика практически не эффективна для широкополосных делителей.

Нельзя не отметить исследования, проводившиеся еще в начале 70-х гг. прошлого века в конструкторском бюро Краснодарского завода измерительных приборов по получению требуемых градаций постоянного напряжения по алгоритму: постоянное напряжение прецизионными быстродействующими ключами преобразуется в переменное (меандр), переменное поступает на ИДН, а затем стробирующий импульс включает схему выборки-хранения. Этот вариант преобразования не нашел широкого применения. Отчасти это обусловлено быстрым прогрессом микроэлектроники и появлением на мировом рынке 24-х разрядных ЦАП (AD1853) и АЦП с Σ - Δ модуляцией. Последние обладают малым низкочастотным шумом и очень высокой степенью линейности.

Поскольку ЦАП и АЦП являются «зеркальными» элементами, то возможна реализация получения постоянных напряжений применением прецизионных АЦП. Правда, в такой реализации мы практически приходим к методу оценки отношений напряжений методом прецизионного вольтме-

тра. Отметим, что при определении отношения двух напряжений нас не интересует их истинное значение, важна лишь точность отношения, т. е. отсутствие аддитивной составляющей и линейности передаточной характеристики. Если абстрагироваться от проблем стоимости, весогабаритных характеристик и руководствоваться только достижимой точностью, то мы неизбежно приходим к криоэлектронике. Студент-дипломник Кембриджского университета Брайан Джозефсон открыл в 1962 г. явления, именуемые ныне эффектами Джозефсона, за которые он получил Нобелевскую премию в 1973 г. Дело в том, что если подать на джозефсоновский переход микроволновое излучение с частотой f , то в результате взаимодействия между приложенным напряжением и джозефсоновским током на вольтамперной характеристике контакта при определенных напряжениях появляются ступеньки [4]. Эти ступеньки возника-

ют при напряжениях $V_n = \frac{nh}{2e} f_0$, где f_0 – это частота внешнего излучения; n – номер ступеньки; h – постоянная Планка; e – заряд электрона. Обратим внимание на то, что в выражении напряжение V_n для n -й ступени определяется только фундаментальными физическими константами h и e (или вернее их отношением) и частотой. А частота является величиной, определяемой в настоящее время с наивысшей точностью (по сравнению с другими основными величинами СИ) [5]. Метрологи не могли не воспользоваться возможностью создания «естественного» эталона напряжения.

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

Для исследования прецизионности джозефсоновских стандартов напряжения были проведены несколько экспериментов. В наиболее чувствительном из этих экспериментов измерялась разность напряжений, генерируемых двумя разными джозефсоновскими приборами при одинаковой частоте возбуждения. Для одиночных переходов, согласно измерениям, верхнее предельное значение этой разности составляло $3 \cdot 10^{-19}$ В [6], у последовательных матриц – $2 \cdot 10^{-17}$ В [7]. Таким образом, на практике не требуется какой-либо коррекции джозефсоновского соотношения между напряжением и частотой.

Простота и надежность стандартов напряжения на джозефсоновских матрицах обеспечила им все возрастающее распространение в лабораториях

стандартизации в государственном, военном и промышленном секторах. С 1989 г. такие стандарты функционируют примерно в 20 пунктах разных стран мира.

История последовательного развития квантового эталона напряжения и описание современных эталонов с джозефсоновскими матрицами изложены в [8]. Здесь же ограничимся констатацией того, что фактически матрица многозвенных джозефсоновских переходов позволяет реализовать ЦАП с погрешностью 10^{-8} , а в принципиальном плане и 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 в 1 мкс. Конечно, широта использования криоэлектронных систем определяется стоимостью низкотемпературных криосистем, да и самих больших матриц джозефсоновских элементов. Но и здесь есть существенные подвижки.

Фирма Нургос рекламирует замкнутые системы с рефрижераторами Стирлинга-Эттинсгаузена, а компания CRYO GEMIES рефрижераторы Гриффорда-Макмагона. Не стоит забывать, что проблема охлаждения в космических условиях существенно упрощается, а ВТСП-электроника прогрессирует. Развитие нанотехнологии привело к новым интересным достижениям и в элементной базе электроники. И этот прогресс, судя по интернету, стал особо динамичным в последние годы. В частности, ФГУП НИИ ЭМП (г. Пенза) серийно выпускает функционально полные 18-разрядные ЦАП 427ПА3 [9], фирма Analog Device стала выпускать 20-битные ЦАП AD5792 с максимальным выходным напряжением 16,5 В [10], фирма Texas Instruments рекламирует 32-х разрядный дельта-сигма АЦП [11]. Существенных успехов добилась фирма Vishay в области разработки резисторов и резистивных сборок [12]. Она приступила к серийному выпуску прецизионных тонкопленочных резисторов VCS1610 по технологии Bulk Metal. Резисторы практически безиндуктивны ($<0,08$ мкГн) и беземкостны. Эта же фирма производит по заказу и резистивные сборки SMNH, обладающие практически уникальной стабильностью.

Особо следует отметить, что им удалось в значительной степени решить и проблему коммутации слабых сигналов, создав КМОП 8-ми канальный мультиплексор DG5008В. Поскольку фирма Vishay интенсивно продолжает работы по улучшению параметров резисторов, совершенствованию и освоению более прогрессивной технологии Bulk Metal® z-foil и улучшению конструкции. Выше-сказанное означает, что постепенно облегчается задача построения и широкополосных прецизионных комбинированных масштабных преобразователей.

Особый интерес к последним обусловлен тем, что наиболее высокой точностью в узком диапазоне частот обладают индуктивные делители (ИД)

с тесной индуктивной связью. Они представляют собой автотрансформаторы с мультифилярной обмоткой на высококачественном магнитопроводе. Первое сообщение о трансформаторе с тесной индуктивной связью обмоток появилось в 30-е гг. прошлого века. Особый интерес к устройствам с тесной индуктивной связью был проявлен в 60-х гг. Был проведен ряд фундаментальных исследований по определению точности коэффициента деления ИДН и созданы весьма качественные делители, выпускаемые за рубежом серийно фирмами Hewlett Packard, Digital Measurement, Avel Products и др. Но отечественная промышленность ИДН не выпускала. Кафедра радиотехники ТПУ (ныне кафедра компьютерных измерительных систем и метрологии) подключилась в 1963 г. к решению актуальной проблемы по метрологическому обеспечению средств измерений переменного тока. Вскоре сотрудники кафедры пришли к выводу о необходимости разработать многозначную меру переменных напряжений в диапазоне частот 20 Гц...200 кГц. Выполнение этой проблемы привело к разворачиванию исследований в целом ряде направлений, включая изыскание методов расширения частотного диапазона индуктивных делителей.

В 1972 г. Томским заводом измерительной аппаратуры была выпущена серия из 10-и шестидесяти индуктивных делителей. С 1973 г. Харьковский завод «Эталон» стал выпускать наши калибраторы под шифром В1-20. В его состав входили однозначная мера напряжений 10 В, высоковольтный прецизионный усилитель с нормированным коэффициентом 30 и максимальным выходным напряжением 300 В и 6-декадный индуктивный делитель [3]. Подробности оригинальных решений опубликованы в обобщающей монографии [11].

Коррекция резистивного делителя по индуктивному может быть осуществлена в различных вариантах. Некоторые из них рассмотрены в обзорах и диссертации [13]. Отметим, что учитывая весьма высокую точность индуктивных делителей и относительную простоту их изготовления (для работы в сравнительно узком диапазоне частот) данное направление представляется перспективным. Добавим, что отпадает необходимость широкого «вторжения» в сам резистивный делитель. А это означает возможность увеличения его широкополосности. В то же время любая коррекция оправдана лишь в той степени, насколько нестабильность резисторов меньше (хотя бы в пределах десятков минут) их погрешности, т. к. временная стабильность резисторов определяет межкорректировочный интер-

вал. В значительной степени именно из-за отсутствия достаточно стабильных малореактивных резисторов мы оказались вынужденными искать различные пути увеличения широкополосности индуктивных делителей, включая кодоуправляемые.

Поскольку в диссертации [13] приведена обширная библиография (247 источников) и подробно изложены наши взгляды на проблему ИД, можно ограничиться лишь некоторыми замечаниями. *Во-первых*, действительно, первая декада должна выполняться по двухступенчатой схеме [13. С. 12–14]. *Во-вторых*, вторую обмотку (вторая декада ИДН) целесообразно намотать на общий «сэндвич», но сам способ намотки первой декады необходимо модифицировать. Например, выполнить ИДН в криоэлектронном варианте. В качестве магнитопровода можно взять торы из криоперма (модифицированный пермаллой), а обмотки намотать проводом из ниобия. Всю конструкцию следует вставить в ниобиевый экран – два полых тора с различными диаметрами и с изоляцией на меньшем. В результате практически исчезнет сопротивление обмоток и резко снизится индуктивность рассеивания, а затем и уровень наводок.

В итоге, выигрыш может быть весьма существенный. Быстрый прогресс криоэлектроники, развитие технологий RFSQ – Rapid Sing Flux-Quantum Technology (быстродействующие приборы с переносом кванта потока) способствовали реализации многих традиционных задач на качественно новом уровне. Основателями технологии RFSQ 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. Наиболее полный обзор по RSFQ-технологии представлен в препринте [14].

Выводы

Рассмотренные подходы к построению прецизионных делителей напряжений позволяют утверждать, что наиболее предпочтительными являются комбинированные делители с корректированием по индуктивному делителю напряжения, а в перспективе, с точки зрения получения наивысшей точности, криоэлектронные.

Результаты получены в связи с проведением поисковой научно-исследовательской работы № НК-566П/13 по направлению «Создание электронной компонентной базы» в рамках мероприятия 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швецкий Б.И. Электронные цифровые приборы. – Киев: Техника, 1964. – 187 с.
2. Autocal Standard 4200A // Catalogue Datron Instruments. – 1973. – 268 p.
3. Ройтман М.С. Калибраторы напряжения и тока (состояние и задачи) // Проблемы метрологии. Метрологическое обеспечение средств измерений переменного тока. Математ. межвузовский тематический сборник / под ред. М.С. Ройтмана. – Томск: Изд-во ТПИ, 1985. – С. 3–9.
4. Бароне А., Петерно Дж. Эффект Джозефсона. Физика и применение. – М.: Мир, 1984. – 639 с.
5. Ройтман М.С. Квантовая метрология // Датчики и системы. – 2005. – № 6. – С. 50–61.

6. Sain A.K. Tests for relativistic gravitation effects of charged particles // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – V. 58. – № 3. – P. 1165–1168.
7. Kautz R.L., Lloyd F. L. Precision on series array Josephson voltage standard // *Appl. Phys. Lett.* – 1987. – V. 51. – № 12. – P. 2043–2045.
8. Ройтман М.С. Квантовая метрология. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 187 с.
9. ЦАП 427ПА3. 2011. URL: <http://www.pnzgu.ru> (дата обращения: 05.02.2011).
10. Analog Devices AD5791. 2011. URL: <http://www.rockman.ru/news> (дата обращения: 05.02.2011).
11. Новая звезда Texas Instruments в созвездии дельта-сигма АЦП. 2011. URL: <http://www.russianelectronics.ru> (дата обращения: 05.02.2011).
12. Новые резистивные сборки производства Vishay. 2011. URL: <http://www.radiant.ru> (дата обращения: 05.02.2011).
13. Ким В.Л. Методы и средства повышения точности индуктивных делителей напряжения: дис. ... док. техн. наук: 05.11.01. – Томск, 2009. – 213 с.
14. Darren K.B. RSFQ Technology. Circuits and Systems. HY-PRES/Inc/175 Clerbrook Road, Elmford. N.Y. 10523–1101, USA. Preprint.

Поступила 02.03.2011 г.

УДК 681.2.08

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕДУРЫ ИСПЫТАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Г.В. Злыгостева, С.В. Муравьев

Томский политехнический университет
E-mail: zgv@yandex.ru; muravyov@camsam.tpu.ru

Предложена обобщенная модель процедуры испытаний измерительного программного обеспечения. Выявлены типы процедур: испытания программного обеспечения при утверждении типа средства измерений, аттестация и сертификация. В соответствии с элементами предложенной обобщенной модели дано систематизированное описание каждого типа процедуры.

Ключевые слова:

Измерительное программное обеспечение, испытания, аттестация, сертификация.

Key words:

Measurement software, testing, validation, certification.

Введение

Современные технические средства, предназначенные для измерений, невозможно представить без применения в них измерительного программного обеспечения (ПО). Использование программных продуктов в средствах измерений обеспечивает выполнение их основных функций. Под измерительным программным обеспечением (ИПО) будем понимать программы (совокупность программ) средств измерений, реализующие сбор, передачу, обработку, хранение и представление измерительной информации, а также программную документацию, необходимую для эксплуатации этих программ [1, 2].

Предоставляя большие возможности и преимущества, использование измерительного программного обеспечения может привести к появлению дополнительных погрешностей, связанных, например, с неадекватностью, нестабильностью (необусловленностью) и неправильной реализацией алгоритмов, положенных в основу программы, конечной разрядностью и т. д.

В последнее время актуальны вопросы защищенности ПО и информации (в том числе измерительной) от искажения, неавторизованного доступа, взаимного влияния приложений друг на друга, что для программных средств метрологического

назначения является крайне важным [3]. Таким образом, применение измерительного программного обеспечения связано с рисками, обусловленными как внутренними свойствами программы, так и внешними воздействиями на нее [2].

В статье на основе обобщенной модели процедуры испытаний измерительного программного обеспечения описаны основные особенности трех типов процедур: испытания ИПО при утверждении типа средства измерений (СИ), аттестация и сертификация.

1. Процедуры испытаний измерительного программного обеспечения

Разработчики и пользователи измерительной техники должны быть уверены: использование программного обеспечения сопровождается минимальным риском появления ошибок и недостоверных результатов измерений, что должно документально подтверждаться проверкой (проведением испытаний) независимой организацией. О возможности проявления таких рисков говорится и в статье 9 Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» [4].

Это даёт основание говорить о необходимости проведения независимой оценки используемого ИПО. Анализ нормативной документации и опыт