

Меры напряжения на прецизионных стабилитронах: метрологические характеристики и область применения

Б. И. АЛЬШИН, В. М. БУХШТАБЕР, О. В. КАРПОВ, В. Н. КРУТИКОВ

Рассмотрены области применения твердотельных мер напряжения, приведены требуемые и реализуемые на практике метрологические характеристики отечественных и зарубежных мер, определены направления дальнейших исследований.

The areas of application of Zener-diode standards for DC voltage metrology are considered. The required and actually achieved metrological characteristics of domestic and foreign — made standards are presented. The directions for further research and development are also determined.

В настоящее время ведущие метрологические лаборатории мира, такие как NIST (США), PTB (Германия), NPL (Великобритания), ETL (Япония), KRISS (Ю. Корея), BIPM (Фран-

ция) и др. используют в своих эталонах вольты джозефсоновские интегральные схемы на 1 и 10 В. Относительная погрешность эталонов на таких схемах, как правило, не превышает $1 \cdot 10^{-9}$.

В России размер вольта также воспроизводится квантовой мерой напряжения, содержащей джозефсоновские интегральные схемы на 1 и 10 В. Данная мера входит в состав государственного первичного эталона вольта (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург) и имеет относительную погрешность менее $3 \cdot 10^{-9}$ [1]. Кроме того, в настоящее время создается сеть вторичных эталонов с использованием джозефсоновских интегральных схем на 1 В с погрешностью воспроизведения напряжения не более $3 \cdot 10^{-8}$ В, в частности, в 1999 г. под номером ВЭТ 13-12-99 утвержден рабочий эталон единицы ЭДС и постоянного напряжения с мерой на основе эффекта Джозефсона [2] (ВНИИМС, Москва). Эти работы ведутся в рамках программы Госстандарта России по созданию и метрологическому обеспечению вторичных эталонов на эффекте Джозефсона для районов Сибири и Дальнего Востока и проекта с РТВ (Германия) TRANSFORM 13 N 7259 «Системы для прецизионного измерения напряжения постоянного тока на основе эффекта Джозефсона».

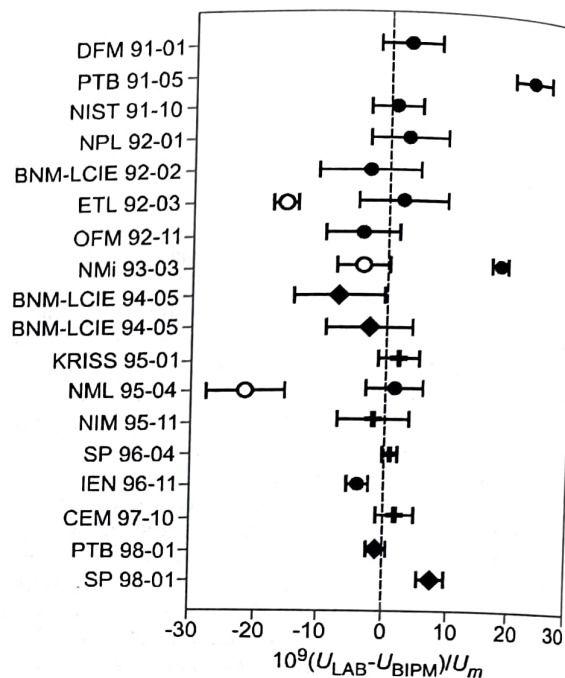
Таким образом, реально появилась потребность как в средствах передачи размера единицы напряжения постоянного тока от джозефсоновских эталонов потребителям для целей калибровки (поверки) рабочих средств измерений (СИ) с относительной погрешностью $(1-3) \cdot 10^{-7}$, так и в средствах проведения (обеспечения) сличений сети вторичных эталонов для целей обеспечения единства измерений с относительной погрешностью $(1-3) \cdot 10^{-8}$.

В мировой метрологической практике для передачи размера единицы ЭДС и постоянного напряжения нашли применение возимые меры напряжения на прецизионных стабилитронах или, как иногда их называют, твердотельные меры напряжения. Типичные метрологические характеристики таких мер, выпускаемых фирмами Wavetek, Fluke, Hewlett Packard: относительная нестабильность выходного напряжения за год $(1-3) \cdot 10^{-6}$, относительное среднеквадратическое значение шумового напряжения $(0,03-0,2) \cdot 10^{-6}$, номинальные напряжения 1 и 10 В.

По шумовым характеристикам твердотельные меры существенно уступают нормальным элементам. Поэтому для повышения точности измерений используют специальные методики выполнения измерений на основе методов математической статистики и математического моделирования [3-7]. Следует отметить, что интенсивность исследований в последние годы в этом направлении заметно возросла. Такие исследования ведутся в NIST [3, 6, 7], BIPM [4], VTT Automation, Measurement Technology (Финляндия) [5], ВНИИФТРИ, ряде коммерческих фирм, например, Fluke [6].

В [6-9] показана возможность применения твердотельных мер для сличения джозефсоновских эталонов напряжения постоянного тока. Эти работы были выполнены на предварительно отобранных стабилитронах и хорошо изученных мерах напряжения типа Fluke 732F и Fluke 732B. Относительные погрешности измерений в таких экспериментах составляли $(0,8-2) \cdot 10^{-8}$ при напряжении 1 В и $(3-8) \cdot 10^{-9}$ при напряжении 10 В; измерения проводили по специальным методикам, учитывающим специфику нестабильности напряжения твердотельных мер. На рисунке приведены результаты сличений джозефсоновских эталонов вольта некоторых национальных метрологических лабораторий с эталоном BIPM с использованием твердотельных мер [9].

В результате начатых в 1990 г. работ во ВНИИФТРИ созданы твердотельные меры напряжения постоянного тока типа МН-1 и МН-2, зарегистрированные в Государственном реестре средств измерений России под № 18162-99, накоплен значительный экспериментальный материал по статистике нестабильности напряжения этих мер [10-15] и сформулированы подходы к созданию методик выполнения



Результаты сличений джозефсоновских эталонов вольта различных лабораторий с использованием твердотельных мер напряжения и нормальных элементов по данным [5]:

●, ○ — твердотельные меры, выход 1 В; ◆ — твердотельные меры, выход 10 В; + — нормальные элементы; U_m — номинальное напряжение

измерений с использованием современных вычислительных компьютерных технологий (технических средств, пакетов прикладных и сервисных программ, баз данных) [10-13].

Так, для оценки потенциальной точности сличений, которую могут обеспечить твердотельные меры, в 1992-1994 гг. были организованы и проведены исследования четырехканальных мер типа МН-1 на базе ВНИИМ, ВНИИМС, ВНИИФТРИ и 32 ГНИИ МО РФ [11, 12]. Для сравнения результатов измерений, выполненных в разное время, была выбрана традиционная модель линейной регрессии напряжения меры во времени [16]. Такой подход дал согласие результатов измерений в различных лабораториях в пределах погрешности $(2-5) \cdot 10^{-7}$.

В 1995-1996 гг. были проведены аналогичные исследования на базе KRISS (Ю. Корея) и ВНИИФТРИ [13]. Для анализа и обработки результатов измерений использовали компьютерные технологии — программы, реализующие многомерный иерархический метод разбиения экспериментальных данных по классам [17] и метод прогноза на основе линейной модели с графической визуализацией результатов анализа и прогноза. Этот подход дал согласие результатов в пределах относительной погрешности $(1-2) \cdot 10^{-7}$.

В рамках совместного проекта с РТВ TRANSFORM 13 N 7259 и названной выше программы Госстандарта России разработаны и созданы меры типа МН-3, и в течение 1998-1999 гг. на эталонах и измерительных установках ВНИИФТРИ [15], ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, ВНИИМС, НПО «Метрология» (Харьков, Украина) и РТВ проведены исследования трех экземпляров мер данного типа. В таблице приведены оценки нестабильности напряжения (в относительных единицах) исследуемых мер. Оценка M_1 характеризует размах нестабильности напряжения на интервале времени измерения Δt , оценка M_2 — порядок минимально достижимой погрешности сличений СИ с помощью данных

Оценки нестабильности напряжения (в относительных единицах) мер типа МН-3 по данным измерений ВНИИФТРИ, ВНИИМ и РТВ

| Интервал времени измерения, Δt | Выход 1 В | | Выход 10 В | |
|--|-----------|-----------|------------|-----------|
| | M_1 | M_2 | M_1 | M_2 |
| 1 час | 0,04—0,08 | 0,02—0,04 | 0,05—0,08 | 0,02—0,04 |
| 1 день | 0,1—0,2 | 0,03—0,08 | 0,08—0,1 | 0,03—0,05 |
| 1 неделя | 0,5—0,8 | 0,2—0,3 | 0,2—0,3 | 0,09—0,1 |
| 1 месяц | 1,5—1,9 | 0,3—0,5 | 0,3—0,9 | 0,1—0,3 |
| 1 квартал | 2,2—3,2 | 0,5—1,0 | 0,7—2,0 | 0,2—0,5 |
| 1 год | 5,0—9,0 | 1,0—3,0 | 1,0—4,0 | 0,3—0,9 |

мер на интервале времени Δt [10]. Заметим, что по данным таблицы меры МН-3 по своим характеристикам приближаются к мировому уровню СИ данного класса.

Из-за нестационарности процесса изменения нестабильности напряжения мер во времени увеличение времени измерения приводит к росту оценок M_1 и M_2 ; максимальное время Δt , при котором можно получить относительную погрешность измерений (сличений) порядка $(2-3) \cdot 10^{-8}$ с помощью мер МН-3, по данным таблицы не превышает 1 день. Возможность мер МН-3 обеспечить такую погрешность при сличениях СИ была показана экспериментально. Однако малое время Δt делает результаты измерений статистически неустойчивыми, резко усложняет, а иногда делает невозможным проведение сличений.

Чтобы снизить оценки M_1 и M_2 долговременной нестабильности напряжения мер и тем самым увеличить время измерения Δt , следует учесть изменения условий измерений (температуры, влажности и давления атмосферного воздуха в помещении) и шумы измерительной аппаратуры. Теоретические и экспериментальные исследования статистических характеристик и особенностей нестабильности напряжения твердотельных мер, проведенные во ВНИИФТРИ, показали, что долговременная нестабильность напряжения мер типа МН-3 на выходе 1 В на 50—60 %, а на выходе 10 В на 30—40 % обусловлена нестабильностью условий измерений. Однако использованный при этом метод множественной линейной регрессии [16] напряжения на данных, характеризующих условия измерений, обеспечивает снижение оценок M_1 и M_2 только для времен измерения более месяца, а на интервале времени измерения 5—15 дней метод не дает существенного снижения этих оценок.

На наш взгляд, для развития указанного подхода перспективно использовать так называемые непараметрические методы многомерной математической статистики [18], позволяющие учесть изменчивость условий измерений, шу-

мовые характеристики измерительной аппаратуры и т. д. без привлечения априори неизвестной функциональной зависимости измеряемой величины от перечисленных условий. Адаптация этих методов к методикам выполнения измерений снизит оценки M_1 и M_2 нестабильности напряжения на интервале времени 5—15 дней и обеспечит возможность выполнять сличения СИ мерами МН-3 с относительной погрешностью $(2-5) \cdot 10^{-8}$. Предварительные исследования нестабильности мер МН-3 с использованием непараметрического метода главных компонент [17], проведенные во ВНИИФТРИ, подтверждают перспективность такого подхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крутиков В. Н., Катков А. С. // Контрольно-измерительная техника. — 2000. — № 3. — С. 25.
2. Краснополин И. Я. // Приборы и техника эксперимента. — 1993. — № 4. — С. 200.
3. Sullivan O. B. e. a. Characterization of Clocks and Oscillators / NIST Tech. Note 1337. — Washington: US Government Printing Office, 1990.
4. Witt T. J. // CPEM-2000. — Digest. — Sydney, 2000. — P. 668.
5. Helisto Panu, Seppa Heikki, Rautiainen Anssi. // Ibid. — P. 401.
6. Rodrigues K. M., Huntley L. // IEEE Trans. Instr. and Meas. — 1995. — V. 44. — N 2. — P. 215.
7. Steiner R. L., Stahley S. // CPEM-92. Digest. — Paris, 1992. — P. 366.
8. Kyu-Tae Kim e. a. // IEEE Trans. Instr. and Meas. — 1997. — V. 46. — N 2. — P. 314.
9. Witt T. J., Josephson. Quantum Hall and other Electrical Comparisons. The Key Comparison Discussion Meeting 19/20. — BIPM Report, January 1999.
10. Карпов О. В., Тертычная М. А. // Измерительная техника. — 2000. — № 5. — С. 63.
11. Карпов О. В. e. a. // IEEE Trans. Instr. and Meas. — 1995. — V. 44. — P. 204.
12. Карпов О. В. e. a. // Metrologia. — 1994. — V. 31. — P. 141.
13. Карпов О. В. и др. // Измерительная техника. — 1996. — № 3. — С. 67.
14. Карпов О. В. и др. // Приборы и техника эксперимента. — 1993. — № 1. — С. 6.
15. Карпов О. В. и др. // Измерительная техника. — 1994. — № 1. — С. 63.
16. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1978.
17. Айвазян С. А. и др. Прикладная статистика. — М.: Финансы и статистика, 1989.

Дата одобрения 05.10.2000 г.