

Исследования метода и аппаратуры измерения переменного напряжения с применением квантовой меры ВНИИМ

А. С. Катков, И. А. Сладовский

Всероссийский НИИ метрологии им. Д.И. Менделеева

A.S.Katkov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5597-9437>

I.A.Sladovsky@vniim.ru, <https://orcid.org/0009-0001-5448-910X>

Аннотация. Во ВНИИМ были проведены исследования возможности применения квантовой меры напряжения из состава государственного первичного эталона вольты для измерения действующего значения синусоидального напряжения. Измерения проводились для двух значений среднеквадратичного напряжения: 0,75 В и 7 В в диапазоне частот от 10 Гц до 400 Гц. Измерения проводились совместно с цифровым вольтметром, имеющим специально разработанное программное обеспечение для проведения измерений переменного напряжения. Результаты проведённых исследований подтвердили возможность применения квантовой меры напряжения на основе программируемой джозефсоновской микросхемы из состава эталона вольты ВНИИМ для проведения сличений на основе опций 3 и 4 технического протокола МБМВ.

Ключевые слова: измерение переменного напряжения; эффект Джозефсона; джозефсоновские программируемые микросхемы; сличения квантовых эталонов вольты

I. ВВЕДЕНИЕ

В 2023 г. государственный первичный эталон единицы электрического напряжения России был усовершенствован до эталона четвертого поколения [1]. В его состав была включена квантовая мера напряжения МН-3, на основе джозефсоновской микросхемы типа «сверхпроводник-нормальный металл-сверхпроводник» (СНС). МН-3 позволяет измерять переменное напряжение путем аппроксимации сигналов переменного напряжения квантовыми ступенями постоянного напряжения и измерения разности напряжений с помощью быстродействующего аналого-цифрового преобразователя (АЦП) NI – PXI 5922A.

Во ВНИИМ проводятся исследования для изучения возможности проведения сличений квантовых эталонов постоянного и переменного напряжения в рамках Технического Протокола, предложенного МБМВ [2]. Аналогичные исследования с участием ВНИИМ представлены в работах [3–6].

Для контроля воспроизводимого источником переменного напряжения, одновременно с измерениями на квантовом эталоне, проводились измерения среднеквадратического напряжения с помощью

цифрового вольтметра с программным обеспечением [7], подключенного непосредственно к выходу источника переменного напряжения, аналогично [5].

II. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Аппаратура для исследования методов воспроизведения переменного напряжения включает: джозефсоновскую программируемую микросхему МН-3; аналого-цифровой преобразователь (АЦП) PXI-5922A; источник переменного синусоидального напряжения (Fluke 5730A), воспроизводящий UAC и синхронизированный по фазе с УМН-3; цифровой вольтметр Keysight 3458A для контроля напряжения, воспроизводимого источником. Программа управления МН-3 синхронизирует работу АЦП PXI-5922A и дополнительного генератора переменного напряжения Keithley 3390.

Методика исследований основана на опциях III и IV Технического Протокола. Процесс сличения опирается на сравнение показаний квантовых эталонов, измеряющих воспроизводимое источником напряжение. Контроль воспроизводимого напряжения производится с помощью АЦП цифрового вольтметра 3458A и специального программного обеспечения, что позволяет учесть разности значений напряжения, воспроизводимых применяемым источником переменного напряжения. Кратковременная (10 мин.) стабильность цифрового вольтметра 3458A в применяемом режиме оценивается 0,1 мкВ/В.

С целью исследования возможности проведения сличений во ВНИИМ определены метрологические характеристики МН-3 при проведении измерений переменных напряжений 0,75 В и 7 В в диапазоне частот от 10 Гц до 400 Гц.

Время одного измерения составляет около 100 с. В этот интервал времени включена длительность паузы порядка 30 с после подключения МН-3 к калибратору Fluke 5730A для завершения переходных процессов, проведения контрольных измерений со смещением $\pm 0,1$ мА от центра квантовой ступени по току, и основное измерение в центре ступени длительность 9 с, которое фиксируется в протоколе измерений.

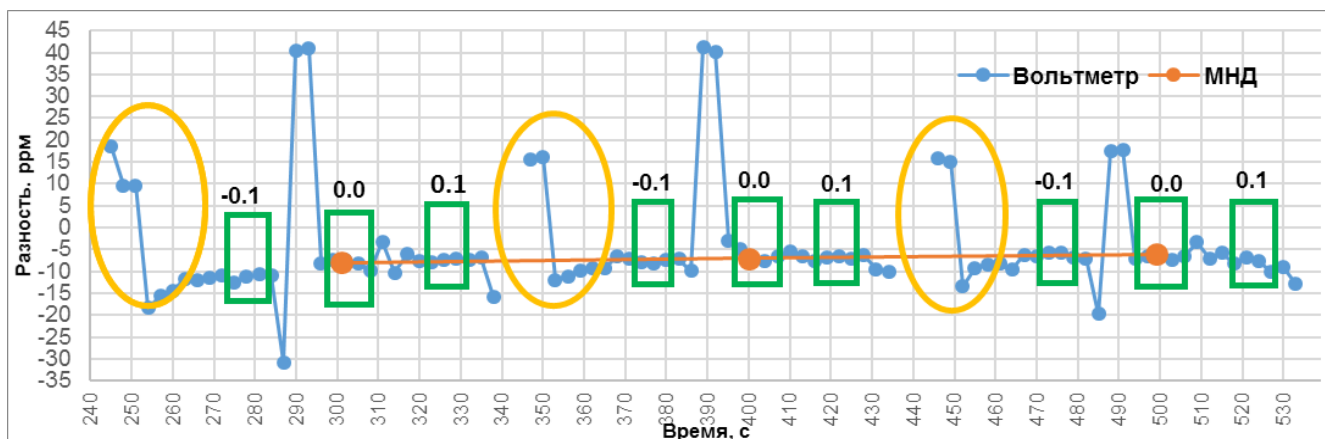


Рис. 1. а. Диаграмма измерений источника переменного напряжения Fluke 5730A для трех последовательных точек измерения мерой МН-3 и вольтметром 3458A при совместных измерениях

Диаграмма измерений источника переменного напряжения представлена на рис. 1а и рис. 1б. На рис. 1а показана диаграмма измерений переменного напряжения калибратора с помощью совместных одновременных измерений мерой МН-3 и вольтметром 3458А. Желтые овалы отмечают область переходных процессов при подключении меры к калибратору. Зеленым – области измерения источника напряжения с помощью меры МН-3 при смещении -0,1 мА, 0 мА и 0,1 мА. Результат этих измерений фиксируется в протоколе на компьютере.

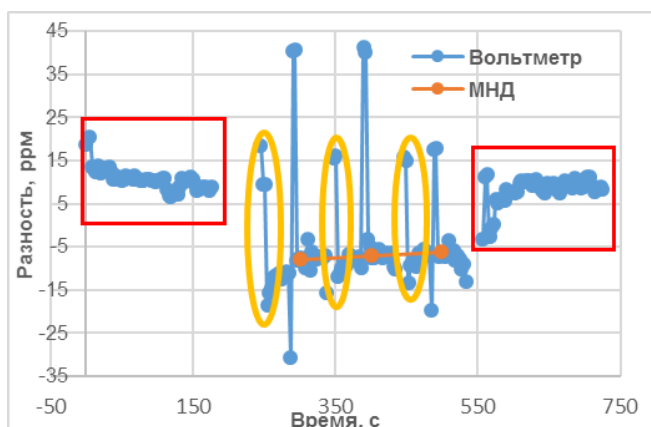


Рис. 1. б. Общая диаграмма измерений источника переменного напряжения Fluke 5730A измерения мерой МН-3 и вольтметром 3458A при совместных и разновременных измерениях.

Рис. 1б демонстрирует общую диаграмму и ход измерений переменного напряжения источника: отдельные измерения вольтметром (отмечено красным квадратом), совместные измерения вольтметра и меры МН-3. Желтым также выделены переходные процессы, аналогично рис. 1а.

При проведении измерений вольтметром 3458А с программой управления выбираются предел измерения (1 В или 10 В), период дискретизации и апертюра АЦП. Время одного измерения переменного напряжения устанавливается примерно 3 с, с целью синхронизации показаний вольтметра в асинхронном режиме со временем усреднения напряжения МН-3. Перед проведением измерений проводится калибровка вольтметра в точке 10 В по постоянному напряжению МН-3.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

А. Действующее значение напряжения 0,75 В

Проведены измерения воспроизводимого калибратором Fluke 5730A переменного напряжения с действующим значением 0,75 В в диапазоне частот от 10 Гц до 400 Гц. Вольтметр 3458А измерял воспроизводимое напряжение как при подключенной мере МН-3, так и отдельно от нее. Результаты представлены на рис 2. Красным представлены измерения переменного напряжения UAC с помощью вольтметра, синим – результаты измерения мерой МН-3.

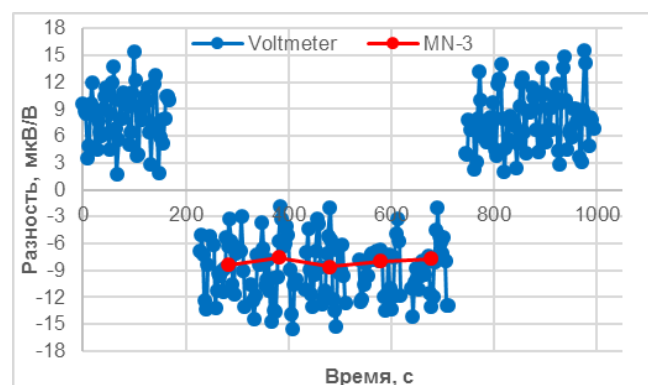


Рис. 2. Результаты измерения переменного напряжения 0,75 В на частоте 400 Гц, воспроизводимого калибратором Fluke 5730A

Результаты показали, что в диапазоне частот от 10 Гц до 400 Гц подключение эталона МН-3 к источнику напряжения вызывает изменение выходного напряжения. Типичное расхождение при совместных и отдельных измерениях составило 17 мкВ/В. Измеренные значения разности напряжений для каждой частоты приведены в табл. 1. При этом при одновременном измерении вольтметром и эталоном разность не превышает 2 мкВ/В.

В. Действующее значение напряжения 7 В

На рис. 3 представлены результаты измерений при действующем значении переменного напряжения 7 В на частоте 400 Гц. Процесс измерений аналогичен процедуре, применявшейся при измерениях на уровне 0,75 В. Установлено, что, в отличие от случая с 0,75 В, для уровня 7 В существенного изменения выходного напряжения не наблюдается. При этом расхождение

между показаниями вольтметра и эталона МН-3 в режиме одновременного измерения также оказалось не более 1,9 мкВ/В. Суммарные значения разности напряжений между измерениями вольтметра и эталона МН-3 для уровня 7 В также приведены в табл. 1.

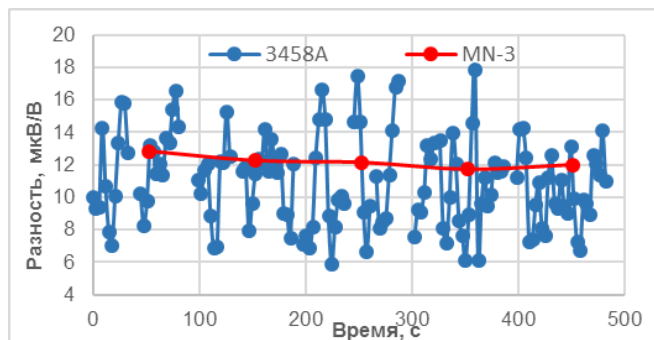


Рис. 3. Результаты измерения переменного напряжения 7 В на частоте 400 Гц

ТАБЛИЦА I. РАЗНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПЕРЕМЕННЫХ НАРЯЖЕНИЙ 0,75 В И 7 В НА ЧАСТОТТАХ 10 Гц – 400 Гц

Частота, Гц	Разность разновременных измерений, мкВ/В		Разность показаний 3458A и МН-3, мкВ/В	
	0,75 В	7 В	0,75 В	7 В
10	14,7	-0,7	2,0	0,7
40	13,9	-0,2	0,2	0,1
62,5	17,1	0,3	0,2	-0,3
200	17,1	0,3	-0,05	1,9
400	17	0,3	0,8	1,1

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования показали, что при измерении напряжения 0,75 В в поддиапазоне 2,2 В калибратора, а также напряжения 7 В в поддиапазоне 22 В, необходим контроль вольтметром переменного напряжения, воспроизводимого калибратором. Данная функция предусмотрена Техническим протоколом МБМВ (BIPM).

Расхождения в результатах измерений по сравнению с представленными в цитируемых работах обусловлены различиями в реализации методики измерений, разным программным обеспечением для чипа джозефсоновской батареи, различиями во времени усреднения и процедурах обработки результатов, а также взаимным влиянием между эталоном МН-3 и калибратором переменного напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Катков А.С., Шевцов В.И., Громова Ю.А. Государственный первичный эталон вольты четвертого поколения. // Измерительная техника. 2023, (7). 4-8 с. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-7-4-8>
- [2] Solve S. 2023. On-site comparison of dc and ac voltages from Josephson arrays, Technical Protocol for BIPM.EM-K10 comparisons, BIPM KCDB. <https://www.bipm.org/kcdb/comparison?id=1779>
- [3] Solve S., Chayramy R., Stock M., Palafox L. and behr R. 2025. AC voltage comparison of thr Josephson Voltage Standards of the PTB and the BIPM (part of the ongoing BIPM key comparisons BIPM.EM-K10.c and d), Technical Protocol for BIPM.EM-K10 comparisons, BIPM KCDB
- [4] Катков А.С., Гублер Г.Б., Шевцов В.И., Сладовский И.А. Исследование квантовой меры напряжения ВНИИМ в режиме измерения переменного напряжения. // Измерительная техника. 2025. 74 (1), 113-118 с. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2025-1-113-118>
- [5] Solve S., Kim M. -S., Palafox L., Behr R., Budovsky I. and Gluber G. B. Update on the future BIPM on-site comparison program for Josephson ac voltage standards. 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Denver, CO, USA, 2020, pp. 1-2. <https://doi.org/10.1109/CPEM49742.2020.9191727>
- [6] Katkov A., Shevtsov V. and Gubler G. VNIIM 10 V Programmable Josephson Voltage Standard. Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018), Paris, France, 2018, pp. 1-2. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8500892>
- [7] Gubler G.B. and Shapiro E.Z., Implementation of Sampling Measurement System for new VNIIM power standard. 2012 Conference on Precision electromagnetic Measurements, Washington, DC, USA, 2012, pp. 294-295. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2012.6250918>