

# Новый государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы

В. С. АЛЕКСАНДРОВ, А. С. КАТКОВ, Г. П. ТЕЛИТЧЕНКО

*Рассмотрена структура построения, приведены результаты исследований и основные метрологические характеристики нового государственного первичного эталона электрического напряжения и особенности построения вновь разработанной государственной поверочной схемы для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы.*

*The structure of the new State primary electrical voltage standard is considered, the results of investigations and the main metrological characteristics of standard are presented, and the peculiar features of development the renovated State hierarchical chain for direct current electrical voltage and electromotive force measuring instruments are described.*

В области электрических измерений наиболее широко распространены измерения постоянного напряжения. Поэтому парк средств измерений (СИ) постоянного напряжения уже сейчас превышает 100 миллионов единиц и включает СИ классов точности от 0,0005 до 5,0 с пределами измерений до 1000 В. Помимо этого начинают поступать в обращение импортные вольтметры и калибраторы класса точности 0,00001, разрабатываются меры постоянного напряжения на прецизионных стабилизаторах с нестабильностью  $v_0 = (1-5) \cdot 10^{-7}$  и квантовые меры постоянного напряжения с  $v_0 = (3-5) \cdot 10^{-8}$ . С учетом сказанного выше создан и в апреле 2001 г. утвержден новый государственный первичный эталон (ГПЭ) постоянного электрического напряжения [1] ГЭТ 13-01, реализующий квантовый эффект Джозефсона, и разработанная государственная поверочная схема (ГПС), регламентирующая порядок передачи размера вольта.

В состав ГПЭ входят:

мера напряжения для воспроизведения вольта, состоящая из криогенных преобразователей частоты в напряжение на основе эффекта Джозефсона и аппаратуры для синтеза частоты облучения криогенных преобразователей, вклю-

чая стандарт частоты и времени, синтезатор и генератор СВЧ-диапазона, блок фазовой автоподстройки частоты;

аппаратура для контроля условий измерений и неизменности воспроизводимого размера единицы;

аппаратура для передачи размера единицы.

Структурная схема построения ГПЭ приведена на рис. 1. Синтезатор частот формирует опорный сигнал в диапазоне частот 8,5—18 ГГц, синхронизированный с опорной частотой 5 МГц, который подается на смеситель *См*. Сигнал генератора через ферритовый вентиль *ФВ* поступает на аттенюатор *Атт* и через ответвитель на смеситель. Разностная частота со смесителя подается на блок фазовой автоподстройки частоты, который формирует управляющий сигнал на входе генератора для стабилизации частоты на его выходе в диапазоне 60—80 ГГц. С выхода ответвителя сигнал проходит через аттенюатор и подается на криогенный преобразователь, содержащий зонд с интегральной джозефсоновской микросхемой *ИДМ* [2], в которой реализованы последние достижения современной технологии, позволяющей соединять последовательно десятки тысяч переходов Джозефсона. Рабочая температура микросхемы составляет 4 К и обеспечивается погружением зонда в жидкий ге-

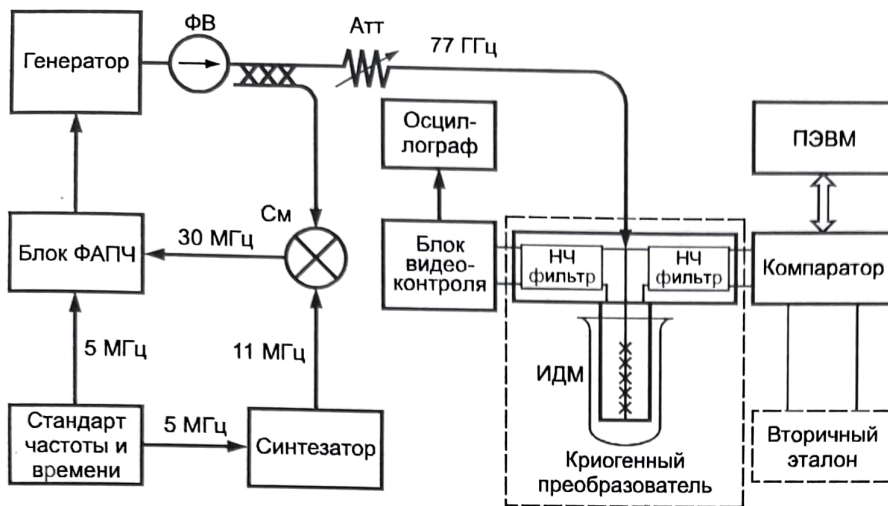


Рис. 1 Структурная схема государственного первичного эталона единицы электрического напряжения:

ФВ — ферритовый вентиль; Атт — аттенуатор; См — смеситель; ИДМ — интегральная джозефсоновская микросхема; ФАПЧ — фазовая автоподстройка частоты

лий. Для установки необходимых выходных напряжений (1 и 10 В) и контроля параметров микросхемы служат блок видеоконтроля и осциллограф.

В ГПЭ реализуется уравнение измерения

$$U = fn / K_J,$$

где  $U$  — воспроизводимое напряжение, В;  $f$  — частота облучения, ГГц;  $n$  — номер ступени на вольт-амперной характеристике ИДМ;  $K_J$  — константа Джозефсона, ГГц/В. В соответствии с рекомендацией Е1-88, принятой Консультативным Комитетом по электричеству,  $K_J = 483597,9$  ГГц/В и введена в действие с 1 января 1990 г.

При исследовании ГПЭ анализировали составляющие погрешности, вносимые стандартом частоты, синтезатором и системой фазовой автоподстройки частоты СВЧ-генератора; утечками и наличием термо-ЭДС в выходной цепи эталона, а также наличием возможных дефектов в ИДМ, которые могут вызвать появление дополнительных напряжений от наклона ступени на вольт-амперной характеристике (ВАХ) микросхемы, детектирования приложенного СВЧ-сигнала, «перескоков» между ступенями ВАХ.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) случайной погрешности оценивали в соответствии с ГОСТ 8.381—80 [3] и рекомендациями рабочей группы МБМВ (INC-1-80) расчетным путем на основе исследования влияющих факторов, перечисленных выше, по формуле

$$S_0 = \sqrt{\sum S_i^2},$$

где  $S_i$  — оценка  $i$ -й составляющей погрешности. Оценки составляющих случайной погрешности приведены в таблице. Суммарные значения составляющих случайной погрешности:  $S_0 = 0,6 \cdot 10^{-9}$  при воспроизводимом напряжении 1 В и  $S_0 = 0,2 \cdot 10^{-9}$  при воспроизводимом напряжении 10 В.

Оценка границы неисключенной систематической погрешности (НСП) выполнена по формуле [3]:

$$\theta_0 = \pm 1,4 \sqrt{\sum \theta_i^2},$$

где  $\theta_i$  — граница  $i$ -й составляющей неисключенной систематической погрешности,  $i > 4$ .

Оценки составляющих неисключенной систематической погрешности  $\theta_i$  также приведены в таблице. Суммарное значение неисключенной систематической погрешности при доверительной вероятности  $P = 0,99$  составляет  $\theta_0 = 0,9 \cdot 10^{-9}$ .

В соответствии с рекомендацией Е1-88 неопределенность значения  $K_J (u_c = 4 \cdot 10^{-7})$  принимается во внимание только в особых случаях, например таких, как определение фундаментальных физических констант, согласование размеров единиц. Во всех остальных случаях рекомендовано использовать условный размер вольт, в котором принимается  $u_c = 0$ , при условии, что используется рекомендованный размер константы  $K_J$ .

Для подтверждения правильности теоретических оценок погрешности ГПЭ проведены:

сличения с международным эталоном вольт МБМВ посредством группового

транспортируемого эталона, содержащего две меры напряжения типа Fluke 732В, при этом  $U_{\text{ВНИИМ}} - U_{\text{МБМВ}} = 0,00$  мкВ,  $u_c = 0,03$  мкВ [4];

сличения с доставленным во ВНИИМ национальным квантовым эталоном вольты Германии, хранящимся в ПТБ, при этом  $U_{\text{ВНИИМ}} - U_{\text{ПТБ}} = 0,05$  нВ,  $u_c = 0,17$  нВ [5].

Все сличения проводили при напряжении 1 В.

Сравнивая приведенные выше результаты и результаты международных сличений других ведущих зарубежных метрологических организаций, можно сделать вывод, что метрологические характеристики ГПЭ находятся на уровне лучших мировых эталонов.

Все это вместе взятое позволило установить следующие метрологические характеристики ГПЭ (ГЭТ 13-01):

- воспроизводимые напряжения 1 и 10 В;
- СКО не более  $1 \cdot 10^{-9}$ , НСП не более  $1 \cdot 10^{-9}$ ;
- стандартная неопределенность типа А  $u_A$  не более  $1 \cdot 10^{-9}$ ;
- стандартная неопределенность типа В  $u_B$  не более  $0,5 \cdot 10^{-9}$ ;
- суммарная стандартная неопределенность  $u_c$  не более  $1,1 \cdot 10^{-9}$ ;
- расширенная стандартная неопределенность  $U_{0,99}$  не более  $3,1 \cdot 10^{-9}$ ;

Источник погрешности	1 В		10 В	
	$S_i$	$\theta_i$	$S_i$	$\theta_i$
Дрейф и флуктуации частоты	$0,04 \cdot 10^{-9}$	$0,6 \cdot 10^{-9}$	$0,04 \cdot 10^{-9}$	$0,6 \cdot 10^{-9}$
Утечки сопротивлений	—	$0,1 \cdot 10^{-9}$	—	$0,1 \cdot 10^{-9}$
Наклон ступени и перескоки на ВАХ, детектирование СВЧ-мощности	$0,15 \cdot 10^{-9}$	$0,15 \cdot 10^{-9}$	$0,2 \cdot 10^{-9}$	$0,2 \cdot 10^{-9}$
Дрейф и флуктуации термо-ЭДС	$0,5 \cdot 10^{-9}$	$0,1 \cdot 10^{-9}$	$0,05 \cdot 10^{-9}$	$0,01 \cdot 10^{-9}$
Суммарная оценка	$0,6 \cdot 10^{-9}$	$0,9 \cdot 10^{-9}$	$0,2 \cdot 10^{-9}$	$0,9 \cdot 10^{-9}$



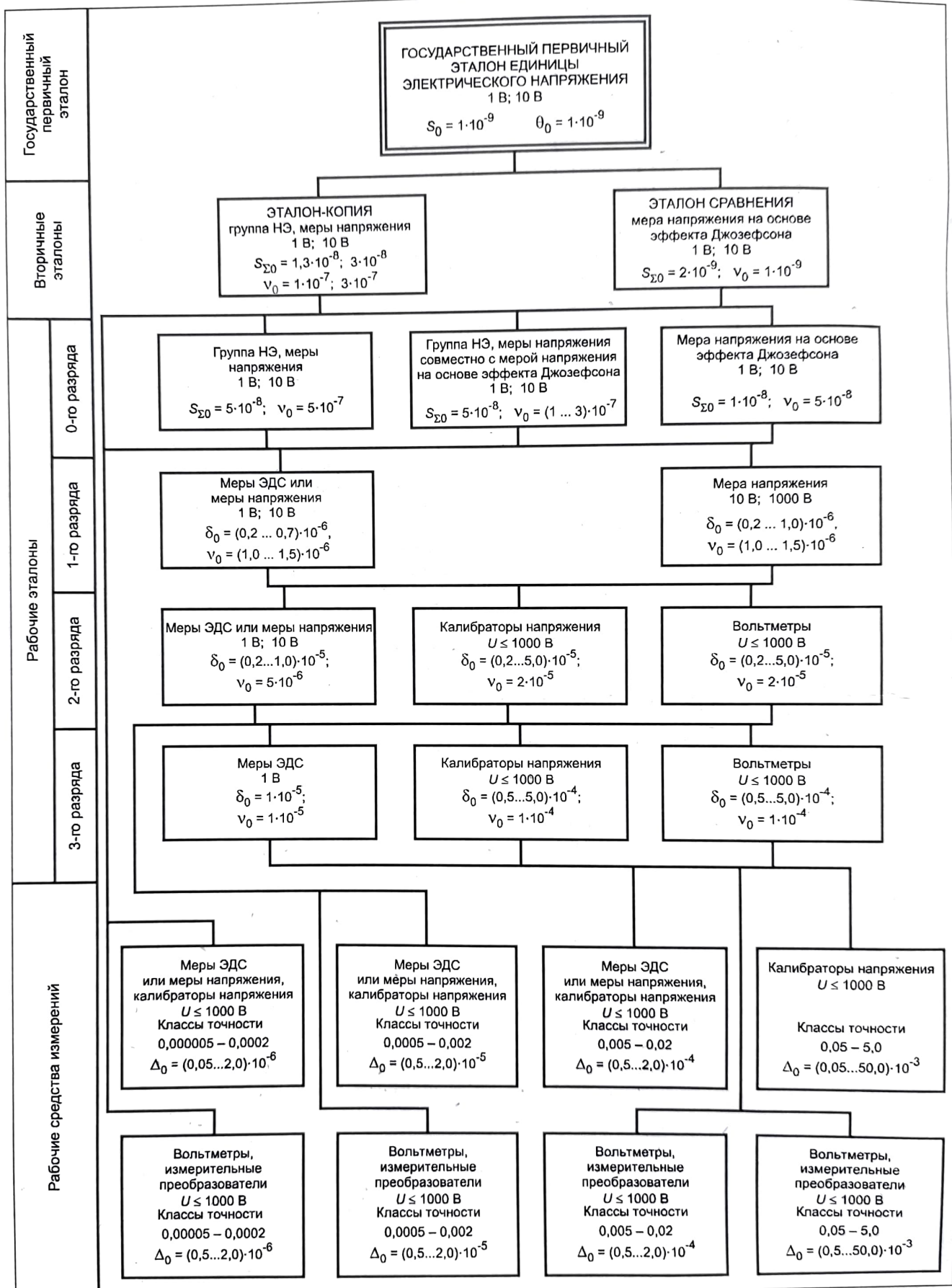


Рис. 2. Поверочная схема для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы

Размер вольта передается вторичным эталонам с помощью компаратора, содержащего нановольтметр и коммутатор, который осуществляет выбор элементов группового вторичного эталона, переключение полярности и измерение разности напряжений. При этом

$$U_{ВЭ} = fnK_J + \frac{\overline{\Delta U}^+ - \overline{\Delta U}^-}{2},$$

где  $\overline{\Delta U}^+$ ,  $\overline{\Delta U}^-$  — усредненные значения разности напряжений встречно включенных первичного и вторичного эталонов при положительной и отрицательной полярностях выходного напряжения эталонов.

Для управления процессом измерений, сбора данных и математической обработки результатов измерений служит персональный компьютер.

Погрешность компарирования при передаче размера единицы  $S_{\epsilon 0}$  характеризуется наличием случайных и неслучайных систематических погрешностей метода и средств измерений, применяемых при передаче размера единицы, и определяется по формуле [3]:

$$S_{\epsilon 0} = \sqrt{S_{\epsilon i}^2 + \frac{1}{3} \sum \theta_{\epsilon i}^2},$$

где  $S_{\epsilon i}$  — СКО случайной погрешности метода и средств измерений;  $\theta_{\epsilon i}$  — НСП метода и средств измерений.

При определении погрешности компарирования исследовали составляющие погрешности, обусловленные утечками в цепи компаратора; шумами, отнесенными ко входу нуля индикатора; погрешностью нуля индикатора; наличием термо-ЭДС в измерительной цепи. Суммарное значение составляющих погрешности компарирования в зависимости от типа вторичного эталона (транспортируемый эталон, эталон-копия) и выходного напряжения эталона (1 В, 10 В) составляет  $S_{\epsilon 0} = (0,5 \dots 5) \cdot 10^{-9}$ .

В соответствии с вновь разработанной ГПС для СИ постоянного электрического напряжения и электродвижущей

силы, приведенной на рис. 2, которая вводится с 1 июля 2002 г., в качестве вторичных эталонов используют эталон-копию и эталон сравнения. Эталон-копия состоит из группы термостатированных нормальных элементов (НЭ) и мер напряжения на стабилитронах. Номинальные значения напряжения 1 и 10 В, СКО результатов сличения с ГПЭ ( $S_{\epsilon 0}$ ) не превышают соответственно  $1,3 \cdot 10^{-8}$  и  $3 \cdot 10^{-9}$  при числе измерений 60. В качестве эталона сравнения используют транспортируемую меру на основе эффекта Джозефсона с номинальными значениями напряжения 1 и 10 В,  $S_{\epsilon 0}$  не превышает  $2 \cdot 10^{-9}$  при числе измерений 30. В качестве рабочих эталонов (РЭ) 0-го разряда используют:

группу термостатированных НЭ с мерами напряжения на стабилитронах или без них;

группу термостатированных НЭ с мерами напряжения на стабилитронах (включая транспортируемые) или без них в комплекте с мерой напряжения на основе эффекта Джозефсона;

меру напряжения на основе эффекта Джозефсона.

В настоящее время в государственной и метрологической службах юридических лиц эксплуатируется девять РЭ 0-го разряда, около ста РЭ 1-го разряда, свыше трехсот РЭ 2-го разряда и более тысячи РЭ 3-го разряда.

Рассмотренная ГПС, возглавляемая новым ГПЭ, разработана с учетом перспектив развития области постоянного электрического напряжения на ближайшие 10—15 лет.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крутиков В.Н., Катков А.С. // Контрольно-измерительные приборы и системы. — 2000. — № 3. — С. 25.
2. Schultze H. e. a. // IEEE Trans. Appl. Superconduct. — 1999. — V. 9. — N 2. — P. 4241.
3. ГОСТ 8.381—80. ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей.
4. Avrons D. e. a. // Rapport BIPM—99/2.
5. Behr R., Niemeyer J., Katkov A.S. // Conf. Digest CPEM2000. — P. 251.

Дата одобрения 12.11.2001 г.