
ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Гуз Ю.М.¹, Добролюбова М.В.¹, Артюхова Ю.В.¹, Струнина Ю.А.¹,
Боднарук В.И.² Гащук Д.Д.²

¹Национальный технический университет Украины «КПИ»,
просп. Победы, 37, Киев, 03056, Украина;
²Институт термоэлектричества, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина)

- Представлены результаты исследований термопреобразователей типа ТВБ и ДТПТ на стабильность и погрешность разнополярности, а также пути схемного и алгоритмического совершенствований при их использовании в составе эталона единицы электрического напряжения от 0.1 до 1000 В переменного тока в диапазоне частот от 10 Гц до 30 МГц, разработанного в НИИ АЭИ НТУУ «КПИ».

Введение

Актуальным является вопрос обеспечения единства измерений, основой которого является система государственных и первичных эталонов, обеспечивающих воспроизведение определенной физической величины и передачу размера ее единицы рабочим и/или выходным эталонам, от которых размер единицы этой величины передается рабочим средствам измерения. Требуется постоянное совершенствование систем измерений, контроля и испытаний при разработке, производстве и применении продукции.

Как известно, эталон должен иметь наивысшие метрологические характеристики среди средств измерения данной единицы, которые есть в государстве, на предприятиях, в организациях или учреждениях [1, 2]. Наивысшие метрологические характеристики эталона обеспечиваются благодаря различным методам повышения точности, а именно: конструктивно-технологическим, защитно-предохранительным и структурно-алгоритмическим. Другими словами, в комплект аппаратуры эталона должны входить составляющие, обладающие высокой точностью, надежностью и зачастую многофункциональностью. При этом достаточно весомым критерием является стоимость используемого оборудования.

Государственный эталон переменного тока Украины в настоящее время не обеспечивает воспроизведения тока в очень важном для радиотехнических приборов диапазоне частот 1 МГц – 30 МГц при уровнях напряжения до 30 В. Кроме того, государственный эталон Украины периодически калибруется в Германии. Поэтому создание эталона единицы напряжения переменного тока для широкого диапазона частот является актуальной задачей.

Напряжение переменного тока является довольно сложной величиной, так как не существует физического явления, которое создавало бы среднеквадратическое значение напряжения переменного тока

$$U_{\text{СКЗ}} = \sqrt{\frac{1}{nT} \int_0^{nT} U^2(t) dt}, \quad (1)$$

где T – период сигнала, n – количество периодов, $U(t)$ – зависимость напряжения от времени.

В большинстве Национальных Метрологических Институтов (НМИ) [3] в основу

воспроизведения единицы напряжения переменного тока положен процесс его сравнения с известным значением напряжения постоянного тока, то есть передача малой неопределенности единицы напряжения постоянного тока на переменный ток.

Отличие национальных эталонов различных стран заключается в обосновании погрешностей воспроизведения среднеквадратического значения переменного напряжения.

Основными источниками погрешностей для эталонов термокомпараторного типа являются [4, 5]:

- погрешность перехода от напряжения постоянного тока к напряжению переменного тока, которая обусловлена фундаментальными явлениями Томсона и Пельтье;
- частотная погрешность, обусловленная влиянием вихревых токов, наличием реактивных составляющих сопротивления как в самих термопреобразователях, так и в дополнительных сопротивлениях, элементах соединения, переключателях и т.д.;
- погрешность разновременного сравнения, обусловленная сравнением в разные моменты времени постоянного и переменного напряжений;
- погрешность воспроизведения постоянного напряжения, которое используется в качестве переданной единицы среднеквадратического значения постоянного напряжения;
- суммарная погрешность других составляющих комплекта аппаратуры, при помощи которых реализуется передача единицы от постоянного напряжения к переменному.

Совместными усилиями Института термоэлектричества (Черновцы) и Черновицкого национального университета им. Ю. Федьковича разработаны и внедрены в производство базовые конструкции ряда полупроводниковых дифференциальных преобразователей тока (ДТП) и напряжения (ДТПН) [6]: ДТП503-(1-5) (погрешность компарирования на частотах $\leq 0.003\%$ (1 кГц), $\leq 0.005\%$ (20 Гц – 100 кГц)); ДТПН-2401–2403 (погрешность компарирования на частотах $\leq 0.003\%$ (1 кГц), $\leq 0.01\%$ (20 Гц – 100 кГц), $\leq 0.3\%$ (100 кГц – 30 МГц)); ДТП-1305 (погрешность компарирования на частотах $\leq 0.01\%$ (20 Гц – 100 кГц), $\leq 0.02\%$ (100 Гц – 200 кГц), $\leq 0.1\%$ (20 кГц – 1 МГц)).

В ФГУП НИИПИ «Кварц» разработан и внедрен в производство комплект электротепловых преобразователей В9-14 для высокоточного измерения сигналов переменного напряжения низких и высоких частот [7] (взамен устаревших изделий ПНТЭ-6 и ПНТЭ-12), которые не требуют применения вспомогательного оборудования (микровольтметров и калибраторов постоянного напряжения), имеют малую тепловую инерционность и устойчивы к воздействию значительных перегрузок, а также обладают высокими метрологическими характеристиками: предел допускаемой основной погрешности преобразования 0.01%, частотный диапазон 10 Гц – 200 МГц.

Точность измерения величин переменного тока зависит от качества термоэлектрических преобразователей.

У термопреобразователей, которые используются для метрологических целей, нагреватель и термопара близки по геометрическим размерам, поэтому теплопроводность термопары оказывает большое влияние на распределение температуры вдоль нагревателя. Для характеристики термопреобразователя введено понятие вольт-ваттной чувствительности S_w термопреобразователя, которое учитывает теплофизические процессы, происходящие в термопаре:

$$S_{KE} = \frac{Z_T \Delta T}{4F} = \frac{\alpha^2 \sigma_T \Delta T}{4\kappa_T F}, \quad (2)$$

где σ_T – электропроводность материала термопары, Z_T – термоэлектрическая эффективность материала термопары, F – коэффициент, который характеризует рациональность использования тепла в конструкции термопреобразователя.

Формула (2) соответствует выражению для КПД термоэлектрического генератора при малых перепадах температур на термоэлементах и в предположении, что параметры материала термопары не зависят от температуры. Более точно выражение для S_{KE} может быть записано в виде

$$S_{KE} = \frac{\Delta T \sqrt{1 + ZT} - 1}{(T_H \sqrt{1 + ZT} - \frac{T_X}{T_H}) F}. \quad (3)$$

Здесь T_X и T_H – температура холодного и горячего спаев термопары.

Из анализа формул (2) и (3) следует, что основные эксплуатационные параметры термоэлектрического преобразователя задаются термоэлектрической эффективностью материала термопары Z_T , рабочим перепадом температуры ΔT и коэффициентом F .

Значительное улучшение эксплуатационных и метрологических параметров термопреобразователей в наше время возможно только путем увеличения термоэффективности материала термопары Z_T . По мере роста Z_T , чувствительность преобразователя увеличивается. Особенно существенно это увеличение при переходе от металлических сплавов к полупроводниковым. Например, если для хромель-копелевой термопары чувствительность $S_w = 4.2$ В/Вт, то для сплавов Bi_2Te_3 она достигает 92 В/Вт, т.е. возрастает почти в 20 раз. Аналогично возрастают параметры, которые используются для оценки термопреобразователей R , S_{KE} , E_T .

На возможность повышения чувствительности термоэлектрических преобразователей при использовании полупроводниковых материалов, которые обладают большим коэффициентом термоЭДС α , указано и в работе Т.Б. Рождественской [8].

Применение полупроводниковых материалов создает благоприятные предпосылки для создания преобразователей с предельными значениями чувствительности, которые ограничиваются только флуктуационными шумами.

Важной характеристикой, которая определяет точность и эксплуатационные возможности, является температурная погрешность. Она определяется величиной относительного изменения выходной термоЭДС при изменении температуры окружающей среды:

$$\delta_t = \frac{E_{t_2} - E_{t_1}}{E_{t_1}(t_2 - t_1)} 100\%, \quad (4)$$

где E_{t_2} , E_{t_1} – термоЭДС преобразователя, которые соответствуют температурам t_1 , t_2 .

Для описания температурной зависимости термоЭДС термопреобразователей используют выражение:

$$E_t = \alpha_T \frac{R_H}{R_H R_T} \frac{I_H^2 \rho l^2}{2d^2 R_0} [1 + (Z\alpha - M\beta - NT_0^2 + P\gamma)I^2], \quad (5)$$

где α_T – коэффициент термоЭДС термопары, R_T – сопротивление термопары, R_H – сопротивление нагревателя, ρ – удельное сопротивление нагревателя, l – длина нагревателя, d – поперечное сечение нагревателя, R_0 – теплопроводность нагревателя, α – температурный коэффициент

сопротивления нагревателя, β – температурный коэффициент теплопроводности, T – температура окружающей среды, γ – температурный коэффициент термоЭДС термопары, Z, M, N, P – члены, которые описывают изменение температуры за счет изменения сопротивления нагревателя, изменения теплопроводности нагревателя, излучение, изменения теплопроводности термопары; в силу громоздкости они не приведены в данной работе.

Анализ выражения для температурной зависимости термоЭДС показывает, что наибольший вклад в температурную погрешность вносят температурные свойства материалов нагревателя и термопары, а изменения, обусловленные температурной зависимостью излучения, играют меньшую роль.

Из применяемых для изготовления нагревателей материалов, манганин имеет наименьшую зависимость параметров от температуры. Однако в конструкциях термопреобразователей с металлическими термопарами нагреватели из манганина не применяются. Это обусловлено следующими причинами: а) при нагревании свыше 120°C в манганине происходят необратимые изменения, которые приводят к изменению удельного сопротивления и температурного коэффициента; б) величина удельного сопротивления манганина не разрешает формировать короткие высокоомные нагреватели.

Преобразователи с термоэлементами из полупроводниковых материалов обладают одним принципиально важным преимуществом перед металлическими – достижение необходимого выходного сигнала $10 \div 15$ мВ возможно при значительно меньшем перегреве нагревателя ($10 \div 20^{\circ}\text{C}$).

Для обеспечения малой температурной погрешности полупроводниковый материал необходимо оптимизировать таким образом, чтобы компенсировать изменения температуры спаи термопары, которая подогревается манганиновым нагревателем при изменении температуры окружающей среды, и обеспечивать неизменность выходной термоЭДС в заданном температурном интервале (например, $-5 \div 35^{\circ}\text{C}$). Т.е., для температурных свойств нагревателя и термопары должно выполняться равенство:

$$\frac{\rho_H}{\kappa_H}(t) + \frac{\alpha_T}{\kappa_T} = c, \quad (6)$$

где ρ_H – удельное сопротивление материала нагревателя, κ_H – коэффициент теплопроводности материала нагревателя, α_T – коэффициент термоЭДС материала термопары, κ_T – коэффициент теплопроводности материала термопары, t – принимает значение $50 \div 60^{\circ}\text{C}$, c – постоянная величина.

В преобразователях ДТПТ-6 используются нагреватели из манганинового микропровода и термопары из оптимизированного полупроводникового материала, что позволяет использовать термопреобразователи ДТПТ-6 при построении эталонных преобразователей напряжения.

Руководствуясь мировыми тенденциями и государственными потребностями в вопросах полноты системы эталонов электрических величин в целом и точности измерения электрических величин переменного тока в частности, коллектив НИИ АЭД НГУУ «КПИ» разработал Военный вторичный эталон единицы электрического напряжения от 0.1 до 1000 В переменного тока в диапазоне частот от 10 Гц до 30 МГц.

1. Исследование преобразователей ТВБ и ДТПТ-6 на стабильность и погрешность разнополярности

Основным узлом эталона напряжения термокомпараторного типа является преобразователь напряжения термоэлектрический. Комплекты именно таких преобразователей (ЭПНТЭ и ППНТЭ) и были разработаны в НИИ АЕИ НТУУ «КПИ».

Комплект ЭПНТЭ применяется для термокомпарации напряжения постоянного тока с напряжением переменного тока. ЭПНТЭ являются эталонами сравнения с другими эталонами и состоят из последовательно соединенных: дополнительного резистора, ПНТЭ типа ДТПТ-6 и дополнительного сопротивления, смонтированных в одном корпусе.

Комплект ППНТЭ предназначен для использования в нестационарных условиях. ППНТЭ конструктивно совпадают с ЭПНТЭ кроме того, что в ППНТЭ вместо ПНТЭ типа ДТПТ-6 использованы ПНТЭ типа ТВБ-3.

В обоих комплектах применены специально отобранные термопреобразователи по признаку минимума погрешности асимметрии при действии разнополярного напряжения и максимума кратковременной стабильности. Изготовленные изоляции из высокотеплопроводной керамики способствуют кратковременной стабильности.

При создании данных комплектов использовались конструктивно-технологические методы повышения точности, к которым относятся критерии нестабильности и разнополярности [9, 10]. По этим критериям определялось, может ли войти в состав ЭПНТЭ и ППНТЭ тот или иной исследуемый термопреобразователь. При этом рассматривались доступные типы наиболее распространенных тепловых преобразователей, таких как вакуумные однотермопарные преобразователи типа ТВБ-3 и ТВБ-4; дифференциальные термопреобразователи ДТПТ-6; преобразователи напряжения термоэлектрические ПНТЭ-6, на основе вакуумных однотермопарных преобразователей типа ТВБ; многоэлементный пленочный термопреобразователь РТВ; преобразователи напряжения термоэлектрические ПНТЭ-12; преобразователи напряжения термоэлектрические ПНТЭ-12/2; разработанные эталонные преобразователи напряжения термоэлектрические разных номиналов. ТВБ-3, ТВБ-4, ДТПТ-6 анализировались с целью «отбраковки» и исследовались на процент выхода термопар каждого типа, критерии разнополярности и стабильности которых были бы приемлемыми для того, чтобы войти в состав ЭПНТЭ и ППНТЭ.

1.1 Исследование вакуумных однотермопарных преобразователей типа ТВБ

Термопреобразователи вакуумные бесконтактные (ТВБ) благодаря их широкополосности получили широкое распространение при воспроизведении и передаче единицы Вольта напряжения переменного тока. Одним из наиболее существенных недостатков ТВБ есть неодинаковость выходной термоЭДС при изменении полярности одного и того же по значению постоянного тока из-за явлений Томсона и Пельтье. В режиме термокомпарирования из-за этого возникает погрешность передачи значения постоянного тока к переменному.

Были проведены исследования партий ТВБ-3, ТВБ-4 на погрешность от разнополярности при номинальных токах $1.0 I_n$, $0.5 I_n$ и $0.3 I_n$. Получены дифференциальные и интегральные гистограммы погрешностей (рис. 1 – 4), из которых очевидно, что только 10% ТВБ имеют погрешность разнополярности меньше 100 ppm, 20% меньше 200 ppm, 50% меньше 500 ppm, то есть количество ТВБ, пригодных для использования в эталонной аппаратуре весьма невелико.

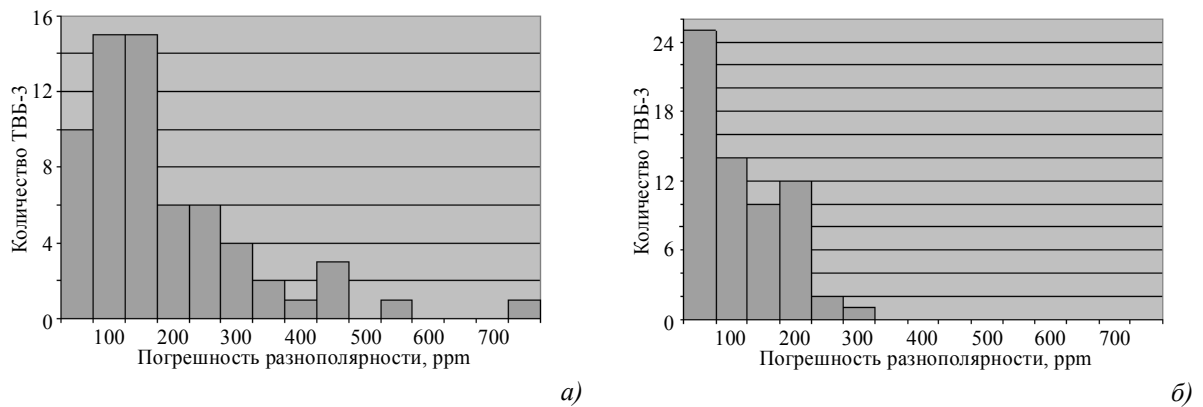


Рис. 1. Дифференциальная гистограмма погрешности разнополяризации ТВБ-3 при 3 мА (а) и 5 мА (б).

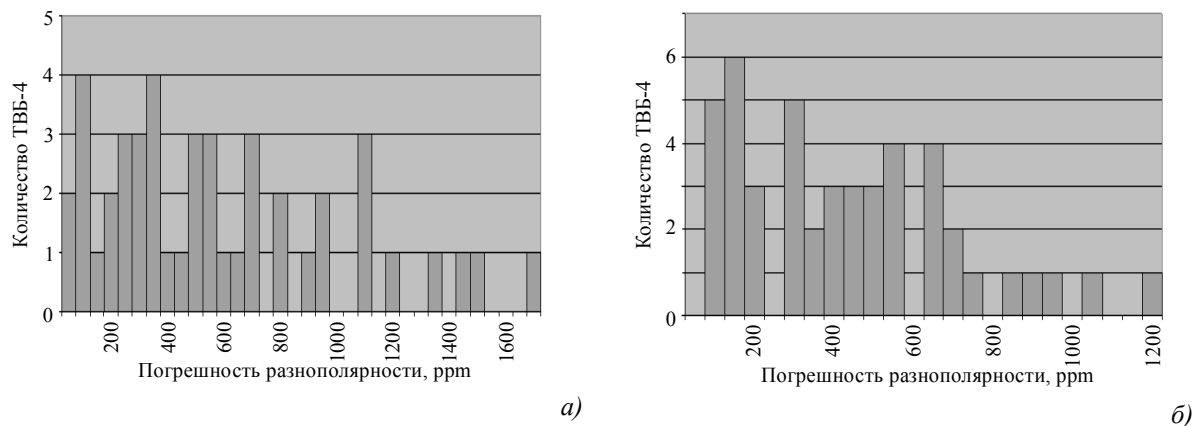


Рис. 2. Дифференциальная гистограмма погрешности разнополяризации ТВБ-4 при 5 мА (а) и 10 мА (б).

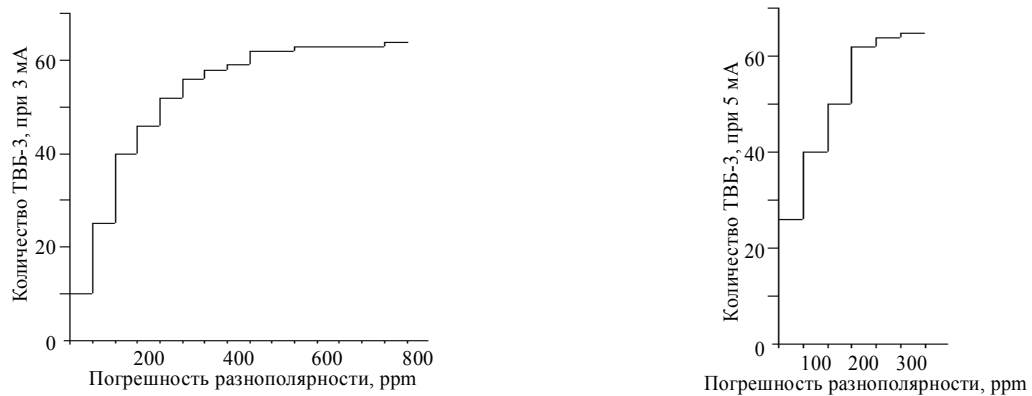


Рис. 3. Интегральная гистограмма погрешности разнополяризации ТВБ-3 при 3 мА и 5 мА

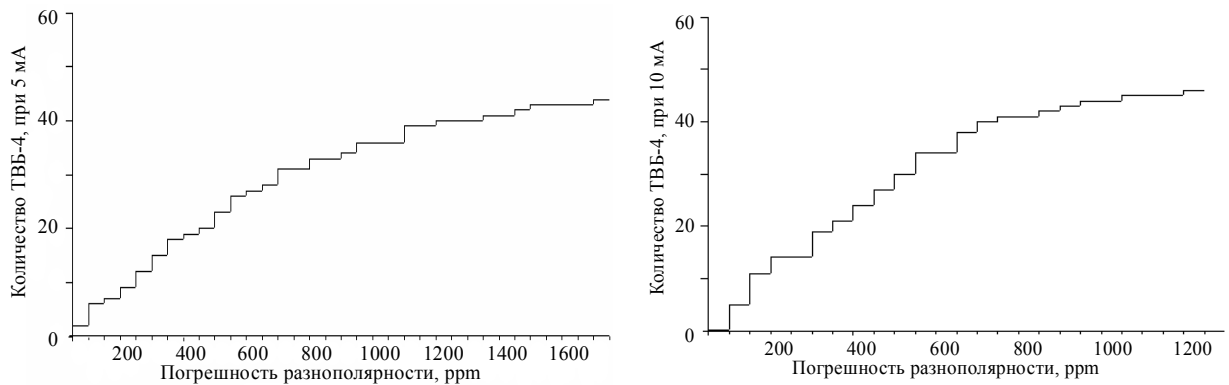


Рис. 4. Интегральная гистограмма погрешности разнополяризации ТВБ-4 при 5 мА и 10 мА.

1.2 Исследование дифференциальных термопреобразователей типа ДТПТ-6

Также были проведены исследования партий ДТПТ-6 на погрешность от разнополярности при номинальных напряжениях 5 В и 8 В (соответственно токи 5 мА и 8 мА).

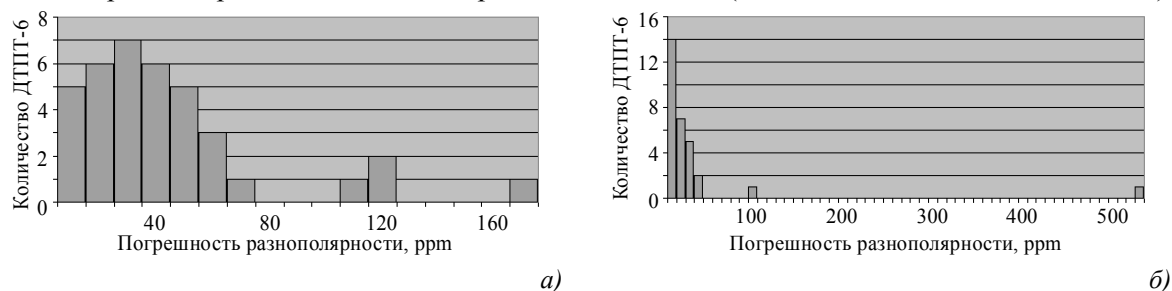


Рис. 5. Дифференциальная гистограмма погрешности разнополярности ДТПТ-6 при 5 В (а) и 8 В (б).

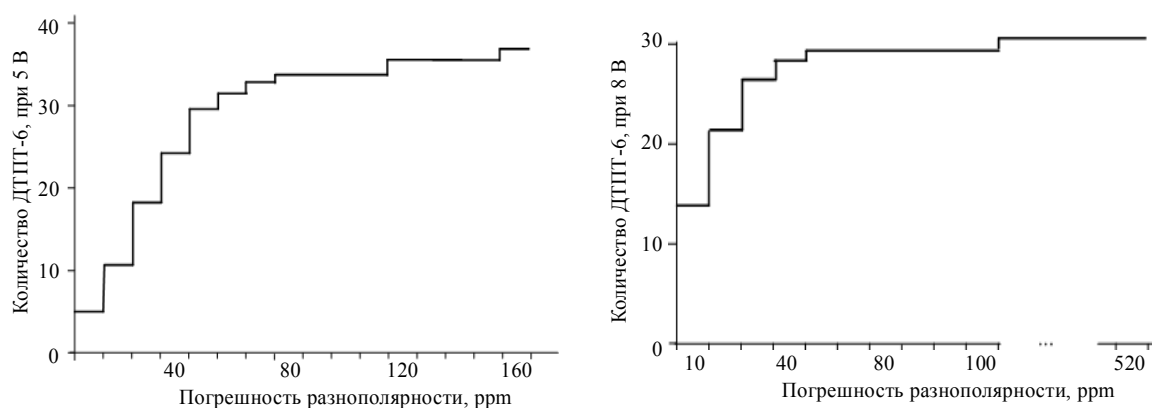


Рис. 6. Интегральная гистограмма погрешности разнополярности ДТПТ-6 при 5 В и 8 В.

Анализ дифференциальных и интегральных гистограмм погрешностей разнополярности (рис. 5 – 6) показал, что около 80% ДТПТ-6 имеют погрешность разнополярности меньше 100 ppm, что гораздо лучше, чем для ТВБ. Поэтому они были использованы при изготовлении комплекта ЭПНТЭ.

1.3 Подходы, использованные для уменьшения погрешностей

Для уменьшения погрешности разнополярности было предложено последовательное или параллельное включение нагревателей двух однотермопарных преобразователей с близкими, но противоположными погрешностями разнополярности и последовательным включением термопар. При большом количестве термопреобразователей можно скомпенсировать погрешности разнополярности в парах, используя практически все термопары, получив тем самым количество эталонных преобразователей, достигающее до половины имеющихся.

Другим радикальным методом уменьшения погрешности перехода является калибровка термопреобразователей напряжением известной формы, эффективное значение которого может быть вычислено аналитически. НИИ АЭД НТУУ «КПИ» запатентован преобразователь напряжения в интервал времени, позволяющий осуществить необходимую калибровку и вносить поправку индивидуально для каждого ТВБ [11].

Для минимизации частотной погрешности усовершенствована конструкция ПНТЭ, в которой минимизирована индуктивная составляющая сопротивления. Создана автоматическая система определения разности частотных погрешностей ПНТЭ, использующая мультипликативный алгоритм, благодаря чему снижены требования к стабильности источников переменного напряжения.

Существенно улучшены параметры измерителей постоянного напряжения. Их разрешающая способность доведена до 100 пВ, основная погрешность уменьшена до единиц ppm.

Это позволяет работать при меньших термоЭДС и расширить динамический диапазон.

Противоречие между нестабильностью и временем установления уменьшается отказом от нулевого термокомпарирования и измерением в окрестностях установленного значения с вычислением коэффициентов аппроксимирующего полинома для положительной и отрицательной ветвей параболы, а также нахождением значения переменного напряжения как усредненного корня аппроксимирующих полиномов.

Результаты экспериментальных исследований стабильности коэффициентов преобразования для ТВБ-3 представлены на рис. 7, для ТВБ-4 на рис. 8, для ДППТ-6 на рис. 9 – 12.

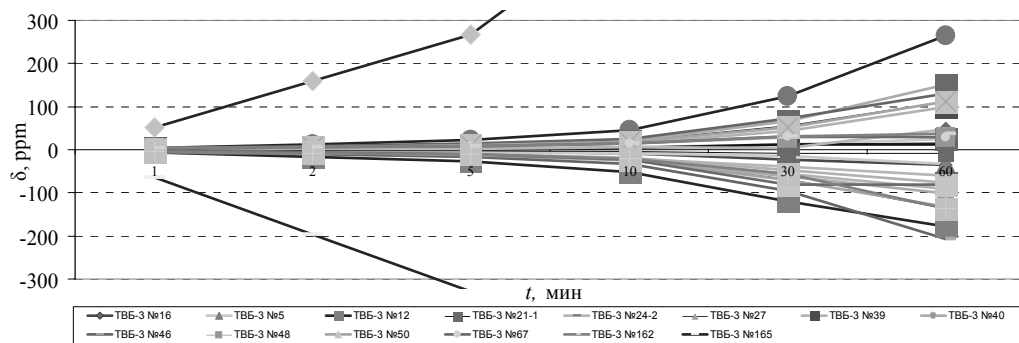


Рис. 7. График зависимости усредненных отклонений коэффициентов преобразования от времени наблюдения для ТВБ-3.

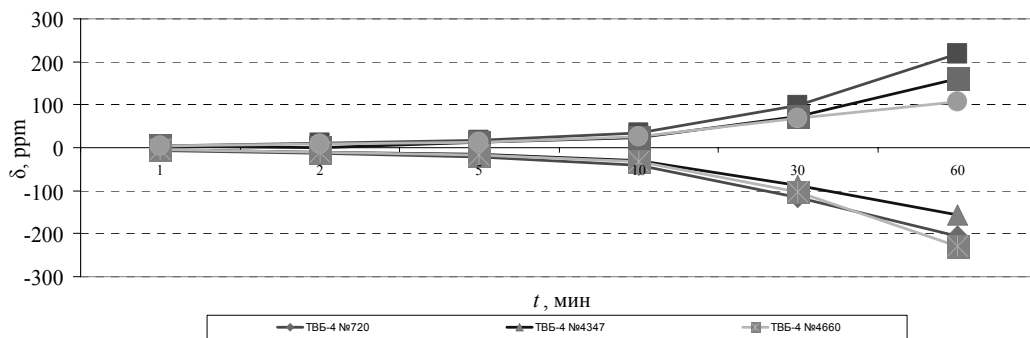


Рис. 8. График зависимости усредненных отклонений коэффициентов преобразования от времени наблюдения для ТВБ-4.

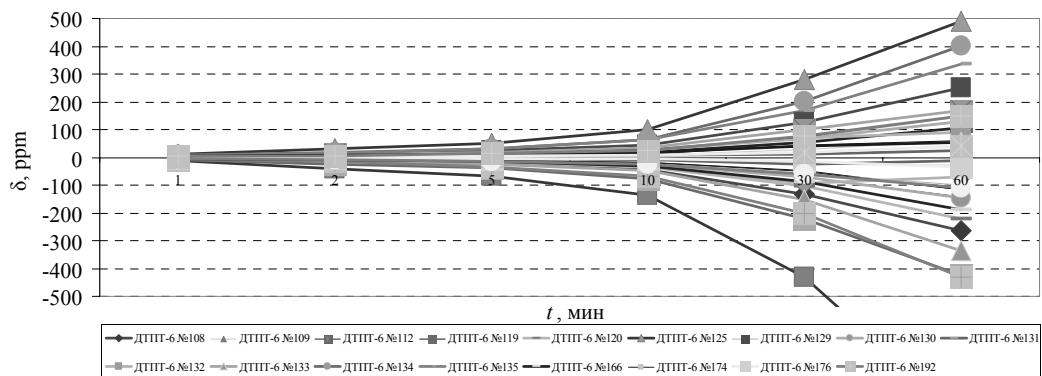


Рис. 9. График зависимости усредненных отклонений коэффициентов преобразования от времени наблюдения для ДППТ-6 (5 В, 1-й нагреватель).

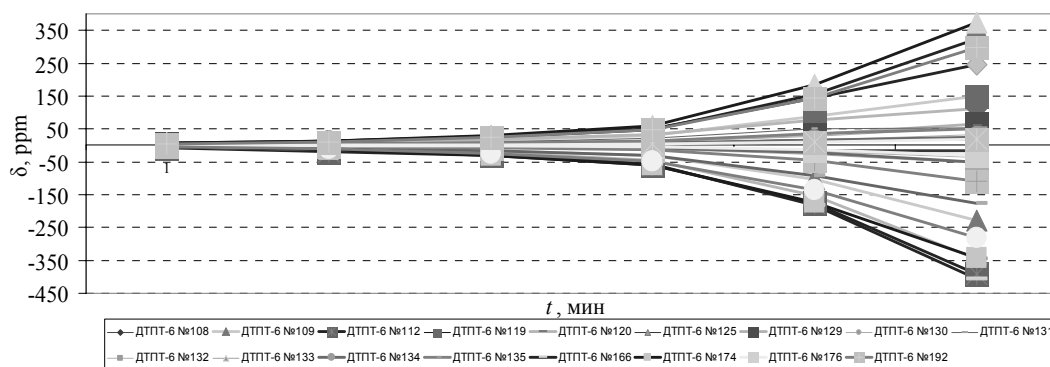


Рис. 10. График зависимости средних отклонений коэффициентов преобразования от времени наблюдения для ДППТ-6 (5 В, 2-й нагреватель).

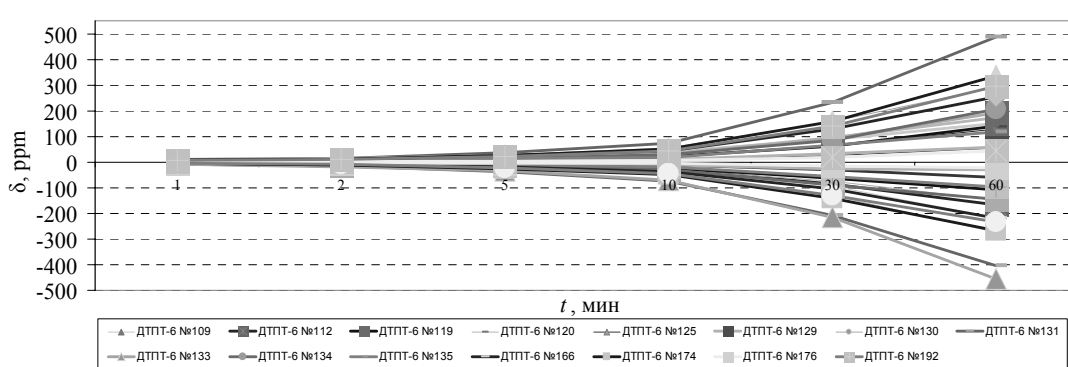


Рис. 11. График зависимости средних отклонений коэффициентов преобразования от времени наблюдения для ДППТ-6 (8 В, 1-й нагреватель).

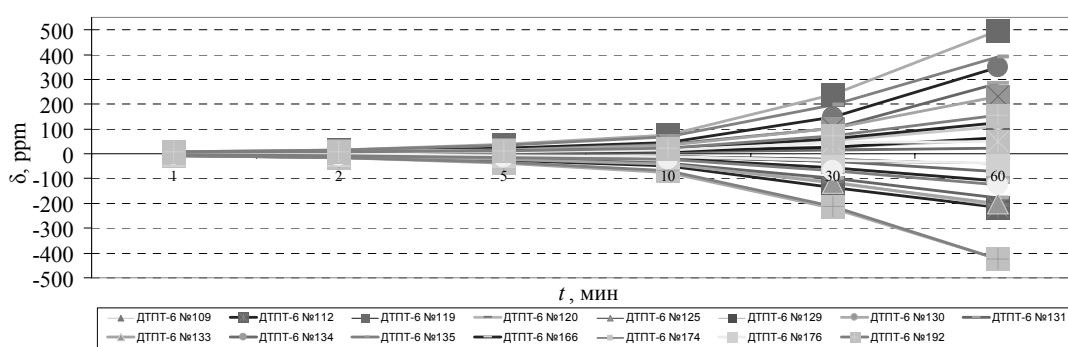


Рис. 12. График зависимости средних отклонений коэффициентов преобразования от времени наблюдения для ДППТ-6 (8 В, 2-й нагреватель).

2. Военный вторичный эталон единицы электрического напряжения от 0.1 до 1000 В переменного тока в диапазоне частот от 10 Гц до 30 МГц

С помощью созданного Военного вторичного эталона единицы электрического напряжения от 0.1 до 1000 В переменного тока в диапазоне частот от 10 Гц до 30 МГц (ВЭ) осуществляется аттестация, поверка и калибровка рабочих эталонов первого разряда преобразователей напряжения термоэлектрических, установок поверочных, калибраторов прецизионных, селективных универсальных, комбинированных вольтметров, генераторов сигналов низкочастотных и высокочастотных.

ВЭ является самодостаточной автоматизированной системой, которая не требует

калибровки от других эталонов напряжения переменного тока, состоит из комплекта аппаратуры объединенной интерфейсом реального времени: прецизионных источников постоянного и переменного напряжения, сверхчувствительных высокоточных измерителей постоянного напряжения, анализатора спектра, устройства автоматической регистрации и обработки результатов измерений и др.

Состав аппаратуры и общий вид эталона представлены на рис. 13.

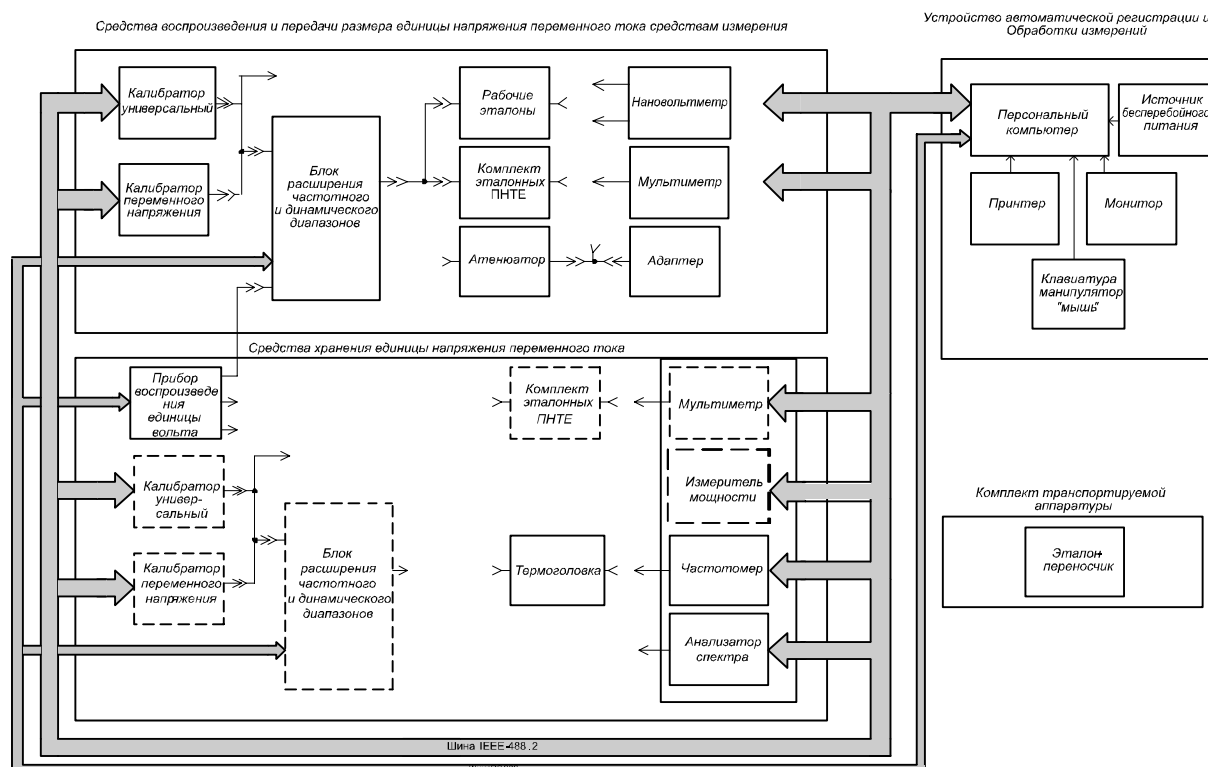


Рис. 13. Состав комплекта аппаратуры эталона единицы электрического напряжения переменного тока, разработанного в НИИ АЭИ НГУУ “КПИ”. Структурная схема.

В комплект аппаратуры вошли разработанные в НИИ АЭИ НГУУ “КПИ” такие уникальные средства измерительной техники (СИТ), как:

- 1) блок расширения частотного и динамического диапазонов (БРЧДД), состоящий из трех усилителей:
 - БРЧДД1 – диапазон частот до 30 МГц, диапазон скз напряжения до 30 В, скорость нарастания сигнала 10000 В/мсек;
 - БРЧДД2 – диапазон частот до 1 МГц, диапазон скз напряжения до 100 В, скорость нарастания сигнала 1000 В/мсек;
 - БРЧДД3 – диапазон частот до 100 кГц, диапазон скз напряжения до 1000 В, скорость нарастания сигнала 1000 В/мсек;
- 2) блок измерительный для определения погрешности ас-dс, генерирующий напряжение на частоте 1 кГц с нелинейными искажениями менее 3 ppm;
- 3) комплект эталонных преобразователей напряжения термоэлектрических (ЭПНТЭ) с номинальными пределами напряжений 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 32 В (рис. 14, 15);
- 4) комплект переносных преобразователей напряжения термоэлектрических (ППНТЭ) с номинальными пределами напряжений 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 32 В (рис. 14, 16).



Рис. 14. Внешний вид комплекта эталонных (слева) и переносных (справа) преобразователей напряжения термоэлектрических, разработанных в НИИ АЭИ НТУУ “КПИ”.

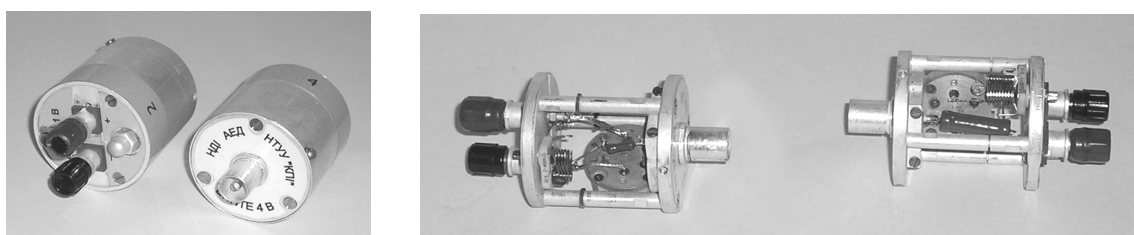


Рис. 15. Общий вид отдельных ЭПНТЭ и вид отдельных ЭПНТЭ без корпуса.

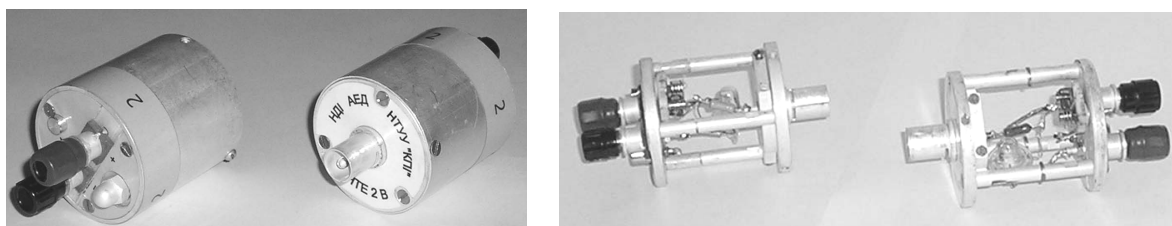


Рис. 16. Общий вид отдельных ППНТЭ и вид отдельных ППНТЭ без корпуса.

При этом разработаны методики, алгоритмы и программное обеспечение для:

- решения задачи цифровой стабилизации выходных сигналов калибраторов и усилителей с применением итерационных алгоритмов, что минимизирует время установки заданного уровня и снижает требования к источникам сигналов;
- определения погрешности разнополярности;
- определения максимального отклонения с заданной вероятностью параметров устройств (термопреобразователей, усилителей, калибраторов и т. д.) от математического среднего в зависимости от времени наблюдения;
- определения разности частотных характеристик эталонных и поверяемых ПНТЭ;
- определения погрешности перехода с напряжения постоянного тока на напряжение переменного тока поверяемых ПНТЭ по отношению к эталонным;
- самокалибровки ЭПНТЭ без сверки с государственным эталоном.

Выводы

1. Совокупность алгоритмических и схематических решений позволила повысить точность и широкополосность ПНТЭ, используя серийные ТВБ.
2. По результатам исследований процент выхода для термпар ТВБ-3 – относительно высокий; ТВБ-4 – низкий, ДППТ-6 – высокий.

3. По результатам исследований в состав эталонных преобразователей напряжения термоэлектрических вошли следующие дифференциальные термопреобразователи ДТПТ-6: ЭПНТЭ Е0.5 – ДТПТ-6 №131-1; ЭПНТЭ Е1 – ДТПТ-6 №174-1; ЭПНТЭ Е2 – ДТПТ-6 №134-2; ЭПНТЭ Е2-1 – ДТПТ-6 №125-2; ЭПНТЭ Е4 – ДТПТ-6 №176-1; ЭПНТЭ Е8 – ДТПТ-6 №192-2; ЭПНТЭ Е16 – ДТПТ-6 №133-2; ЭПНТЭ Е32 В – ДТПТ-6 №129-2.
4. По результатам исследований в состав переносных преобразователей напряжения термоэлектрических вошли следующие вакуумные однотермопарные преобразователи типа ТВБ-3: ППНТЭ П0.5 – ТВБ-3 №2; ППНТЭ П1 – ТВБ-3 №39, ППНТЭ П2 – ТВБ-3 №162, ППНТЭ П2-1 – ТВБ-3 №3, ППНТЭ П4 – ТВБ-3 №46, ППНТЭ П8 – ТВБ-3 №67, ППНТЭ П16 – ТВБ-3 №27, ППНТЭ П32 – ТВБ-3 №В 24-2.
5. Сочетание индивидуального подбора, конструкторско-технологических и структурных методов повышения точности позволило создать Военный вторичный эталон единицы электрического напряжения от 0.1 до 1000 В переменного тока в диапазоне частот от 10 Гц до 30 МГц ВВЕТУ 08-07-01-09.

Литература

1. ДСТУ 2681-94 Метрология. Термины и определения.
2. Закон Украины «О внесении изменений в Закон Украины «О метрологии и метрологической деятельности» от 15.06.2004 г.
3. M. Klonz. CCE Comparison of AC-DC Voltage Transfer Standards at the Lowest Attainable Level of Uncertainty // IEEE Trans. Instrum. Meas., April 1997, Vol. 46, №2. – P. 342 – 346.
4. Туз Ю.М. Эталонные преобразователи переменного напряжения / Ю.М. Туз, О.В. Рахмаилов, М.В. Добролюбова // Научные вести, НТУУ”КПІ”. – 2008. – №2. – С. 74 – 80.
5. Исследование стабильности комплекта аппаратуры воспроизведения единицы напряжения переменного тока / Ю.М. Туз, В.В. Литвих, М.В. Добролюбова [и др.] // Украинский метрологический журнал, Харьков. – 2004. – №1.
6. Лукьян Иванович Анатычук. К 70-летию со дня рождения / Под. ред. Л.Н. Вихор. – Черновцы. Институт термоэлектричества НАН та МОН Украины, 2007. – 720 с.
7. Гуревич М.Л. Комплект электротепловых преобразователей В9-14 для высокоточного измерения сигналов переменного напряжения низких и высоких частот / М.Л. Гуревич, А.В. Черемохин // Радиоизмерения и электроника “Кварц”. – 2007. – №13.
8. Рождественская Т.Б. Электрические компараторы для точных измерений тока, напряжения и мощности / Т.Б. Рождественская. – М.: Стандартгиз, 1964. – 187 с.
9. Туз Ю.М. Оптимизация времени термокомпарирования / Ю.М. Туз, М.В. Добролюбова, А.А. Ульянова // Системы обработки информации. Харьков. – 2010. – Выпуск 5 (86). – С. 139 – 143.
10. Туз Ю.М. Методики определения кратковременной нестабильности выходного сигнала прецизионных источников напряжения. / Ю.М. Туз, М.В. Добролюбова // Системы обработки информации. Сборник научных трудов. Харьков. – Выпуск 1 (91). – 2011. – С. 143 – 147.
11. Туз Ю.М., Каминський В.Ю., Литвих В.В. Способ воспроизведения синусного напряжения. Декларационный патент на изобретение 30988А, МКІ G 01R 17/02.

Поступила в редакцию 21.08.2012.